



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.27.18.16-TDI

## SIMPLIFICAÇÃO DE SUBDIVISÕES PLANARES DERIVADAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Mário Rocco Pettinati

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,  
orientada pelos Drs. Gilberto Câmara, e Lúbia Vinhas, aprovada em 30 de março  
de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39PFA7H>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

## **PUBLICADO POR :**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.27.18.16-TDI

## SIMPLIFICAÇÃO DE SUBDIVISÕES PLANARES DERIVADAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Mário Rocco Pettinati

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,  
orientada pelos Drs. Gilberto Câmara, e Lúbia Vinhas, aprovada em 30 de março  
de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39PFA7H>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

P453s Pettinati, Mário Rocco.  
Simplificação de subdivisões planares derivadas de processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto / Mário Rocco Pettinati. – São José dos Campos : INPE, 2011.  
xx+66 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.27.18.16-TDI)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.  
Orientadores : Drs. Gilberto Câmara, e Lúbia Vinhas.

1. Simplificação. 2. Generalização . 3. Topologia. 4. Classificação. 5. Segmentação. I. Título.

CDU 004:528.914

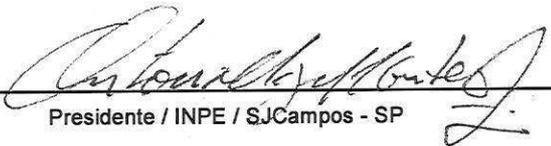
---

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

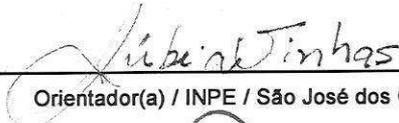
Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. Antonio Miguel Vieira Monteiro

  
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

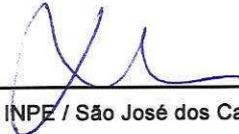
Dra. Lúbia Vinhas

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

Dr. Gilberto Câmara

  
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Laércio Massaru Namikawa

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

Dr. Clodoveu Augusto Davis Junior

  
Convidado(a) / UFMG / Belo Horizonte - MG

Aluno (a): Mário Rocco Pettinati

São José dos Campos, 30 de março de 2011



*“O que eu espero senhores, é que depois de um razoável período de discussão, todo mundo concorde comigo”.*

WINSTON CHURCHILL  
*Primeiro Ministro do Reino Unido durante a Segunda  
Guerra Mundial*



*A meus pais Marinho e Fátima*



## AGRADECIMENTOS

A Deus por toda graça, ajuda e por estar sempre ao meu lado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de estudo.

Ao Dr. Gilberto Câmara, pela orientação e ensinamentos.

À Dra. Lúbia Vinhas, por sua orientação e ensinamentos, mas também por estar sempre presente em todos os momentos deste trabalho, sempre me passando confiança e ânimo para que eu não desistisse de buscar meus objetivos.

Aos docentes do Instituto e funcionários da DPI, em especial ao Dr. Antônio Vieira Miguel Monteiro e ao Dr. Júlio César Lima d'Alge, por suas dicas e conselhos.

Aos amigos Gilberto R. Queiroz e Ubirajara M. de Freitas, pela idéia maluca de me colocar para fazer disciplina isolada no INPE que culminou com esta dissertação.

A toda a equipe da FUNCATE, pelo apoio e pelos momentos de descontração.

A meus pais, Mário Vicente Pettinati e Fátima Passos Pettinati, por todo amor, paciência e incentivo, não só nesta etapa, como em toda minha vida. Com certeza aquele leitinho com Nescau de manhã direto da roça me manteve forte e nunca me deixou desanimar. Sem vocês nada disto seria possível. Muito obrigado.

A meu irmão Danilo, por sua companhia não só em shows de rock, festas e no futebol, como em tudo que eu faço na vida.

A família Pettinati, pelo amor e por sempre me incentivar a buscar coisas melhores.

À Pathy, pelo o apoio e por estar comigo nos momentos mais críticos deste trabalho.

Ao amigo Gilson Braga Nogueira (Gilsoft), pela primeira oportunidade de trabalho, e pelo incentivo, amizade e ensinamentos tanto pessoais e quanto profissionais.

A todos os meus amigos lá da terrinha, Santa Branca, pelas festas, churrascos, doideras e momentos de descontração. Lekkaa!

Ao bom e velho Rock and Roll, por estar ao meu lado em todos os momentos, me dando o gás necessário para terminar mais essa etapa da minha vida. Up the Irons.



## RESUMO

O uso de imagens de Sensoriamento Remoto (SR) para obtenção de mapas de uso e cobertura da terra é uma atividade comum em aplicações SIG. Técnicas de segmentação e classificação delimitam regiões homogêneas nas imagens e posteriormente são associadas às classes de uso e cobertura. O resultado desse processamento são mapas em formato digital, que representam partições completas do espaço representadas por conjuntos de polígonos. Como as imagens de SR possuem uma representação matricial, os polígonos resultantes são geometrias complexas, formadas por um grande número de vértices, o que torna seu armazenamento, transmissão ou uso posterior custosos. Além disso, podem ser geradas geometrias que não devem ser representadas nas escalas de trabalho apropriadas para o uso desses dados derivados. Esse trabalho estuda como aplicar o processo de generalização cartográfica aos dados de uso e cobertura a fim de diminuir sua complexidade. Para isso, usam-se algoritmos de simplificação de linhas adaptados para manutenção da consistência topológica do dado original. Adicionalmente, apresentam-se também adaptações que tem por objetivo minimizar as variações na área dos polígonos originais durante o processo de generalização. Finalmente, apresenta-se o resultado da aplicação da metodologia proposta para generalização de dados de desflorestamento da Floresta Amazônica, gerados pelo projeto PRODES.



# **SIMPLIFICATION OF PLANAR SUBDIVISIONS DERIVED FROM THE PROCESSING OF REMOTE SENSING DIGITAL IMAGES**

## **ABSTRACT**

The use of remote sensing imagery to obtain land cover and land use maps is a common task in GIS applications. Segmentation and classification techniques delimit homogeneous regions in images which are then associated to use and coverage classes. This processing generates digital maps that represent complete partitions of the space, represented by sets of polygons. As images have a matrix representation, the polygons are complex geometries formed by a large number of vertices, which makes their storage, transmission and use costly. Furthermore, this process can generate geometries that are not appropriate for the use of derived data in smaller scales. This work studies how to apply the process of cartographic generalization to land use and land cover data in order to reduce its complexity. For this, adapted line simplification algorithms are used to maintain the topological consistency of the original data. Additionally, adaptations that aims to minimize variations in area of the original polygons during the process of generalization are presented. Finally, the result of applying the proposed methodology for generalization of deforestation data of the Amazon Forest, generated by the project PRODES is presented.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Excesso de pontos para representar um polígono. . . . .	1
1.2 Artefatos incompatíveis com a escala do mapa. . . . .	2
2.1 Representação de uma imagem digital. . . . .	6
2.2 Exemplo de classificação de imagem de SR. . . . .	8
2.3 Representações para resultado da classificação. . . . .	10
2.4 Operações para obtenção de um mapa de cobertura baseado em dados de SR. . . . .	11
2.5 Um exemplo de subdivisão planar. . . . .	12
2.6 Exemplo de modelo <i>arco-nó-polígono</i> para topologia. . . . .	14
2.7 Exemplo do algoritmo de Douglas & Peucker . . . . .	17
2.8 Exemplo do algoritmo de Área Efetiva. . . . .	18
2.9 A região da chamada Amazônia Legal. . . . .	22
3.1 Exemplo dos problemas de regiões sobrepostas ou sem informação . . . .	26
3.2 Vértices-âncoras ( $v1, v2, v5$ e $v6$ ) . . . . .	28
3.3 Propagação da simplificação . . . . .	29
3.4 Exemplo da área de influência do polígono . . . . .	30
3.5 Processo completo de simplificação para mapas que possuem uma grande quantidade de polígonos. . . . .	31
4.1 Mapa matricial categórico da região da Amazônia Legal, gerado pelo projeto PRODES. . . . .	35
4.2 Os mapas dos casos de estudo em relação a Amazônia Legal . . . . .	36
4.3 Resultado da simplificação do Mapa 1 . . . . .	39
4.4 Resultado da simplificação do Mapa 2a . . . . .	42
4.5 Resultado da simplificação do Mapa 2b . . . . .	45
4.6 Resultado da simplificação do Mapa 2c . . . . .	48
7.1 Diagrama de classes. . . . .	63
7.2 Tela do plugin de simplificação, desenvolvido neste trabalho. . . . .	66



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1	Informações sobre o Mapa 1. . . . . 33
4.2	Lista das classes presentes no Mapa 2 . . . . . 34
4.3	Informações sobre o Mapa 2 . . . . . 36
4.4	Resultados da simplificação do Mapa 1 . . . . . 38
4.5	Comparação entre as alterações de área do Mapa 1 e os mapas simplifi- cados usando os algoritmos implementados. . . . . 40
4.6	Resultados da simplificação do Mapa 2a . . . . . 41
4.7	Comparação entre as alterações de área do Mapa 2a e os mapas simpli- ficados usando os algoritmos implementados. . . . . 43
4.8	Resultados da simplificação do Mapa 2b . . . . . 43
4.9	Comparação entre as alterações de área do Mapa 2b e os mapas simpli- ficados usando os algoritmos implementados. . . . . 46
4.10	Resultados da simplificação do Mapa 2c . . . . . 47
4.11	Comparação entre as alterações de área do Mapa 2c e dos mapas simpli- ficados. . . . . 49



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	2
1.2 Organização . . . . .	3
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Mapeamento do uso solo baseado em dados de SR . . . . .	5
2.2 Representações computacionais para dados geográficos . . . . .	8
2.2.1 Estruturas de dados para mapas categóricos vetoriais . . . . .	11
2.2.2 Topologia . . . . .	12
2.3 O Open Geospatial Consortium . . . . .	14
2.4 Generalização de Mapas . . . . .	15
2.4.1 Algoritmos de Simplificação de Linhas . . . . .	16
2.4.2 A questão da escala . . . . .	20
2.5 PRODES . . . . .	20
2.6 Contextualização do problema . . . . .	23
<b>3 METODOLOGIA PARA SIMPLIFICAÇÃO DE MAPAS OBTIDOS A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO</b> . . . . .	<b>25</b>
3.1 Adaptações Propostas . . . . .	26
3.1.1 Vértices-âncora . . . . .	27
3.1.2 Contexto da vizinhança . . . . .	28
3.1.3 Área de influência . . . . .	29
3.2 Processo de Simplificação . . . . .	30
<b>4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS</b> . . . . .	<b>33</b>
4.1 Dados Utilizados . . . . .	33
4.2 Experimentos . . . . .	36
4.2.1 Primeiro Experimento . . . . .	37
4.2.2 Segundo Experimento . . . . .	40
4.2.3 Terceiro Experimento . . . . .	43
4.2.4 Quarto Experimento . . . . .	46

4.2.5	Discussão . . . . .	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>53</b>
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	54
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE A - QUESTÕES DE IMPLEMENTAÇÃO . . . . .</b>	<b>63</b>
7.1	Detalhes de implementação . . . . .	63
7.1.1	Processo de simplificação . . . . .	63
7.1.2	Divisão do mapa em regiões e consultas por bloco . . . . .	64
7.1.3	Área de influência . . . . .	65
7.1.4	Algoritmos . . . . .	65
7.2	Interface do <i>Plugin</i> . . . . .	66

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos principais usos de imagens de Sensoriamento Remoto (SR) se dá para obtenção de mapas de uso e cobertura do solo, uma vez que esse tipo de dado representa uma fonte atualizada de informação, além de poder recobrir grandes extensões da superfície terrestre. Esse processo, em geral, é feito de maneira automatizada ou semi-automatizada, através da aplicação de algoritmos de processamento digital de imagens, como a segmentação e a classificação. O que se espera obter como resultado é um mapa que defina uma subdivisão planar topologicamente consistente, ou seja, um mapa formado por uma coleção de polígonos que não possuem auto-intersecções e que não sobrepõem os outros polígonos da subdivisão. Outra característica existente é que não existem espaços em branco no mapa, isto é, o mapa é uma partição completa da região analisada.

O processo de geração de mapas de uso e cobertura de maneira automatizada, em geral, produz conjuntos de polígonos que possuem uma quantidade exagerada de vértices, acima do que seria necessário para representá-los com um grau adequado de aproximação. Isso implica em custo desnecessário de armazenamento, apresentação, transmissão ou ainda processamentos subsequentes. A Figura 1.1 ilustra esse caso, onde em destaque pode ser visto um polígono que poderia ser representado por uma quantidade menor de pontos.

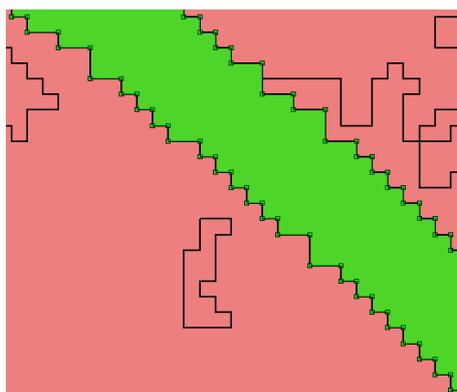


Figura 1.1 - Excesso de pontos para representar um polígono.

Além da complexidade do dado resultante, dada pela quantidade de vértices que formam os polígonos, podem ser gerados pequenos artefatos que não são compatíveis com a escala de uso recomendada para esse dado. A Figura 1.2 exemplifica

este segundo problema, onde em destaque podem ser vistos polígonos que não são compatíveis com sua escala.

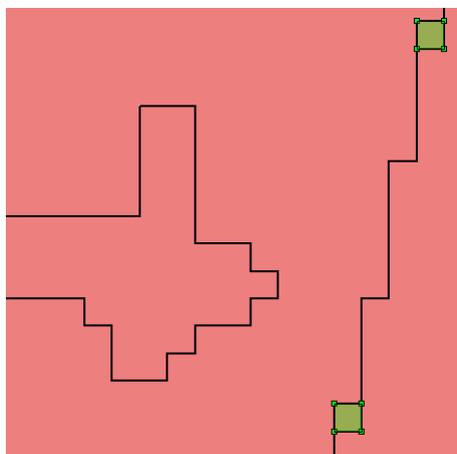


Figura 1.2 - Artefatos incompatíveis com a escala do mapa.

Sendo assim, é desejável dispor de técnicas que permitam diminuir a complexidade dos dados brutos resultantes dos processamentos sobre imagens de SR, porém mantendo a sua representatividade. Essa preocupação já existe na disciplina da Cartografia em relação a mapas em geral e é genericamente conhecida como o problema de generalização cartográfica.

## 1.1 Objetivo

Esse trabalho estuda técnicas de generalização cartográfica aplicadas a mapas resultantes do processamento de imagens de SR, em particular na classificação. Parte-se do seguinte pressuposto: o resultado direto do processo é uma subdivisão planar da área estudada.

O objetivo desse trabalho é propor métodos de generalização cartográfica que possam ser aplicados a mapas de uso e cobertura gerados a partir de imagens de SR, e que resultem em dados menos complexos, mais compatíveis com a escala de trabalho e que continuem sendo topologicamente consistentes e semanticamente significativos. As alterações de área do mapa também serão estudadas neste trabalho.

O trabalho é validado aplicando tais técnicas aos dados de desflorestamento produzidos operacionalmente pelo INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -

dentro do programa PRODES - Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia. Dessa forma, além de uma contribuição teórica em geoinformática, o resultado desse trabalho terá uma contribuição prática dentro da agenda de pesquisa do instituto.

## 1.2 Organização

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica sobre o processo de transformação da representação matricial em vetorial, bem como os problemas que são decorrentes deste processo. Ele também apresenta uma revisão sobre métodos de simplificação de geometrias.
- O Capítulo 3 apresenta uma proposta de adaptação para diferentes métodos de simplificação de geometrias, de forma que estes possam fazer a simplificação buscando a manutenção da topologia e controlando as alterações de área das geometrias.
- O Capítulo 4 traz três experimentos que foram realizados em mapas de uso e cobertura extraídos a partir do projeto PRODES. Este Capítulo também analisa e comenta os resultados da simplificação realizada nestes mapas.
- O Capítulo 5 apresenta a conclusão deste trabalho, resumindo tudo o que foi realizado e sugerindo trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse trabalho trata do problema da generalização de mapas de uso e cobertura do solo, obtidos através de técnicas de processamento de imagens de Sensoriamento Remoto (SR). Esse capítulo revisa os principais conceitos necessários para em seguida contextualizar o trabalho desenvolvido.

### 2.1 Mapeamento do uso solo baseado em dados de SR

Mapas de cobertura do solo são mapas que descrevem a cobertura biofísica de uma porção da superfície terrestre e são formados por padrões que ocorrem devido a processos naturais e causados pelo homem. Mapas de uso do solo, por sua vez, descrevem as atividades humanas conduzidas na área observada. Fatores econômicos, políticos e históricos, entre outros, influenciam a ocorrência dessas atividades (BROWN et al., 2000). Dados de Sensoriamento Remoto (SR), especialmente imagens, são usados para criar mapas de uso e cobertura do solo, uma vez que eles permitem criar rapidamente versões atualizadas dessa informação, o que é de fundamental importância para cientistas, tomadores de decisão e responsáveis por planejamento. Uma discussão detalhada sobre as questões envolvidas na criação de mapas de uso a partir de dados de sensoriamento remoto pode ser vista nos trabalhos de Cihlar (2000) e Rogan e Chen (2004).

Imagens de SR são imagens da superfície terrestre que são obtidas através de sensores que não estão em contato físico direto com a área imageada. Essas imagens são obtidas através de sensores colocados a bordo de aeronaves ou de satélites artificiais, também chamados de satélites de observação da Terra. Os sensores óticos são aqueles que formam imagens medindo a radiação solar refletida pelos diferentes alvos (ex. vegetação, solo exposto, água, etc.) presentes na área imageada. Os diferentes materiais presentes na superfície da Terra refletem e absorvem, de maneira distinta, os diferentes comprimentos de onda presentes na radiação solar. Dessa maneira, é possível distinguir os diferentes alvos imageados através das imagens de Sensoriamento Remoto (NOVO, 2010).

Três características básicas dos sensores definem a imagem que é produzida, sendo as resoluções espectral, espacial e temporal. A resolução espectral de um sensor define as faixas de frequência dentro do espectro eletromagnético que um sensor é capaz de detectar. A resolução espacial refere-se ao tamanho do menor objeto que pode

ser diferenciado e a resolução temporal refere-se ao intervalo de tempo em que uma área pode voltar a ser imageada.

Imagens de SR são imagens digitais, ou seja, têm uma representação discreta quanto às faixas de frequência, ao espaço e ao tempo. Assim, uma imagem digital pode ser representada como na Figura 2.1: uma matriz bidimensional de valores, onde cada célula da matriz é chamada de *pixel* e que possui o valor de intensidade da radiação medida, discretizado para um tamanho de palavra de computador (ex. 8, 16 ou 32 bits). Cada *pixel* possui um tamanho, chamado de resolução espacial. O valor de intensidade se refere a toda a área do *pixel*.

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 1 & 4 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 5 \\ 1 & 4 & 1 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & 6 & 5 & 4 \\ 1 & 3 & 4 & 6 & 5 \end{bmatrix}$$

Figura 2.1 - Representação de uma imagem digital.

Essas características são exploradas através do uso de técnicas de processamento de imagens para a extração de informações úteis. Existem diversas técnicas de processamento digital de imagens, largamente disponíveis em diferentes pacotes de software comerciais e livres, e o seu uso depende das características específicas de cada aplicação ou problema sendo atacado.

Entre as técnicas mais comuns podem ser citadas as que permitem o realce das imagens para ajudar na interpretação visual das mesmas; técnicas para a correção e restauração das imagens a fim de minimizar distorções geométricas, reduzir ruídos e efeitos indesejados; e finalmente, algoritmos de segmentação e classificação, que são usados para delimitar áreas dentro da imagem, de maneira que sejam homogêneas internamente e que subsequenteiramente possam ser associadas a classes temáticas. Esses mapas temáticos podem ser combinados com outros dados de uma base de dados para que sejam futuramente explorados e visualizados.

A produção de mapas temáticos a partir de imagens de SR é tipicamente feita

através do processo chamado de classificação. A **classificação** pode ser feita através de interpretação visual ou através de métodos automatizados por computador. O uso de métodos automatizados visa maximizar os benefícios do uso dos dados de SR, de forma que a pesquisa em Sensoriamento Remoto, processamento digital de imagens e geoinformação têm encontrado métodos cada vez mais automáticos, eficientes e precisos para a classificação de imagens.

A classificação automática de imagens é feita através de algoritmos que buscam agrupar os *pixels* de acordo com sua similaridade espectral (classificação não-supervisionada) ou de acordo com sua similaridade a um conjunto de classes previamente caracterizadas espectralmente (classificação supervisionada) (FRANKLIN et al., 2003). Nos dois casos o resultado pode ser considerado como um mapa temático que descreve a cobertura do solo da região.

Sob outro critério, algoritmos de classificação podem ser divididos naqueles baseados em *pixels* e naqueles baseados em regiões. No primeiro, o elemento a ser considerado para classificação é um pixel da imagem digital, enquanto que no segundo, o elemento a ser classificado é uma região homogênea previamente definida por um processo de **segmentação** (SCHOWENGERDT, 2007). O processo de segmentação pode ser definido como o agrupamento de *pixels* contíguos com base em algum critério de similaridade (ex. valor espectral ou textura). Como os objetos existentes nas áreas imageadas por Sensoriamento Remoto são geralmente homogêneos, estes podem ser coerentemente detectados por algoritmos de segmentação. Assim, quando se faz uma classificação por regiões, o número de elementos a serem classificados é menor em relação a quando se faz uma classificação por *pixels*.

O resultado final da classificação de uma imagem SR é uma imagem classificada, ou seja, cada *pixel* da imagem é associado a uma dentre um conjunto de possíveis classes que representam os tipos de cobertura observados na área imageada. Como exemplo, a Figura 2.2(a) mostra uma banda de uma imagem do sensor TM (Thematic Mapper), que está a bordo do satélite LANDSAT, e a Figura 2.2(b) mostra o resultado de uma operação de classificação executada sobre a imagem.

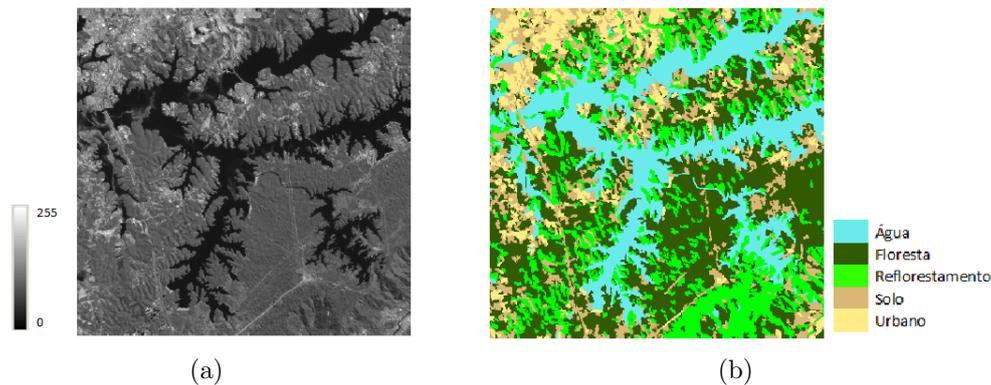


Figura 2.2 - Exemplo de classificação de imagem de SR. (a) Uma banda de uma imagem do sensor TM; (b) O resultado de uma operação de classificação

As imagens classificadas são uma representação para mapas de cobertura do solo, porém esses também podem ter uma representação vetorial. Esse trabalho trata desse tipo de representação, que é então discutida na seção seguinte.

## 2.2 Representações computacionais para dados geográficos

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são sistemas computacionais capazes de capturar, modelar, armazenar, recuperar, manipular, analisar e apresentar dados geográficos (WORBOYS; DUCKHAM, 2004). Ao utilizar um SIG, o usuário traduz os dados que definem a sua percepção do espaço geográfico para estruturas computacionais que permitem a sua manipulação dentro do ambiente computacional (CAMARA, 2005).

As estruturas de dados usadas para representar dados geográficos podem ser de duas naturezas: **matriciais** ou **vetoriais**. As estruturas matriciais usam uma grade regular sobre a qual se representa, célula a célula, o elemento que está sendo representado. A cada célula, atribui-se um código referente ao atributo estudado, de tal forma que o computador saiba a que elemento ou objeto pertence uma determinada célula. Nesta representação, o espaço é representado como uma matriz  $P(m, n)$  composta de  $m$  colunas e  $n$  linhas, onde cada célula possui associado a ela o valor correspondente ao atributo estudado. Cada célula é individualmente acessada através de suas coordenadas. A representação matricial supõe que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou

documento e a área por ela coberta no terreno (CAMARA, 2005).

Conforme descrito na seção anterior, as imagens de SR têm uma representação matricial, bem como o resultado da classificação automática dessas imagens. No caso da imagem original, o atributo é o valor de intensidade medido pelo sensor e, no caso da imagem classificada, o atributo é um índice para uma tabela que descreve a semântica da classe de cobertura de solo. Normalmente, para fins de visualização, cada classe é representada por uma cor, acompanhada de uma legenda associando a cor à classe (ver a Figura 2.2).

As estruturas vetoriais são baseadas em coordenadas cartesianas que definem primitivas geométricas usadas para representar as fronteiras das entidades geográficas representadas no dado, conforme descritas abaixo (para uma definição teórica mais detalhada deve-se consultar DAVIS JUNIOR e Queiroz (2005)):

- **ponto**: representa uma localização simples no espaço de coordenadas; possui uma abscissa (x) e uma ordenada (y);
- **segmento**: é definida por uma seqüência de dois pontos, ou **vértices**, onde considera-se que localizações existentes entre ambos os pontos são definidas através de uma interpolação linear;
- **linha**: é uma coleção finita de segmentos que podem interceptar-se apenas em seus vértices, e possuem um vértice inicial e um final;
- **linha fechada**: é uma linha onde os vértices de cada um de seus segmentos interceptam o vértice de um outro segmento, ou seja, não existem um vértice inicial ou final;
- **polígono**: um polígono é formado por uma linha fechada, chamada exterior, podendo conter uma ou mais linhas fechadas interiores, também conhecidas como buracos.

A escolha entre uma das duas representações depende mais de uma visão conceitual sobre qual a melhor representação do espaço geográfico e menos de questões tecnológicas, visto que a maioria dos SIGs oferece as duas representações (COUCLIS, 1992). Em geral, representações matriciais estão associadas a dados contínuos no espaço, enquanto que representações vetoriais estão associadas a conjuntos de

entidades com uma identidade única persistente em uma base de dados, e que se distingue de qualquer outra entidade geográfica.

Historicamente, considera-se que a representação matricial pode ser processada mais rapidamente ao passo que representações vetoriais possuem uma precisão maior. Porém existe a preocupação com a diferença entre métricas e outras análises, quando executadas em uma ou outra representação, como pode ser visto no trabalho de [Wade et al. \(2003\)](#).

Os mapas de cobertura do solo derivados de imagens de satélite podem ter tanto uma representação matricial quanto vetorial, uma vez que a conversão entre as duas representações é uma operação comum que pode ser encontrada na maioria dos SIGs, como está ilustrado na Figura 2.3.

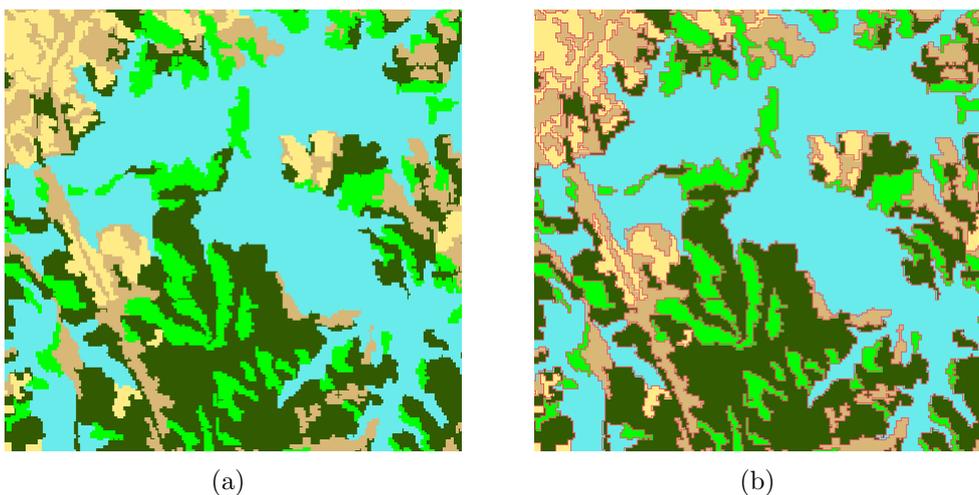


Figura 2.3 - Representações para resultado da classificação. (a) Representação matricial. (b) Representação vetorial.

A Figura 2.4 resume os conceitos apresentados até agora, na forma de uma seqüência de operações executadas para a obtenção de um mapa de cobertura do solo a partir de dados de SR usando técnicas de processamento digital de imagens. Esse trabalho trata da última etapa dessa seqüência de operações, ou seja, de como tratar a representação de mapas de cobertura de solo com representação vetorial, de maneira que possam ser manipulados eficientemente, sejam representativos e possam ser usados em outras operações de análise. A seção seguinte detalha esse tipo de dado.

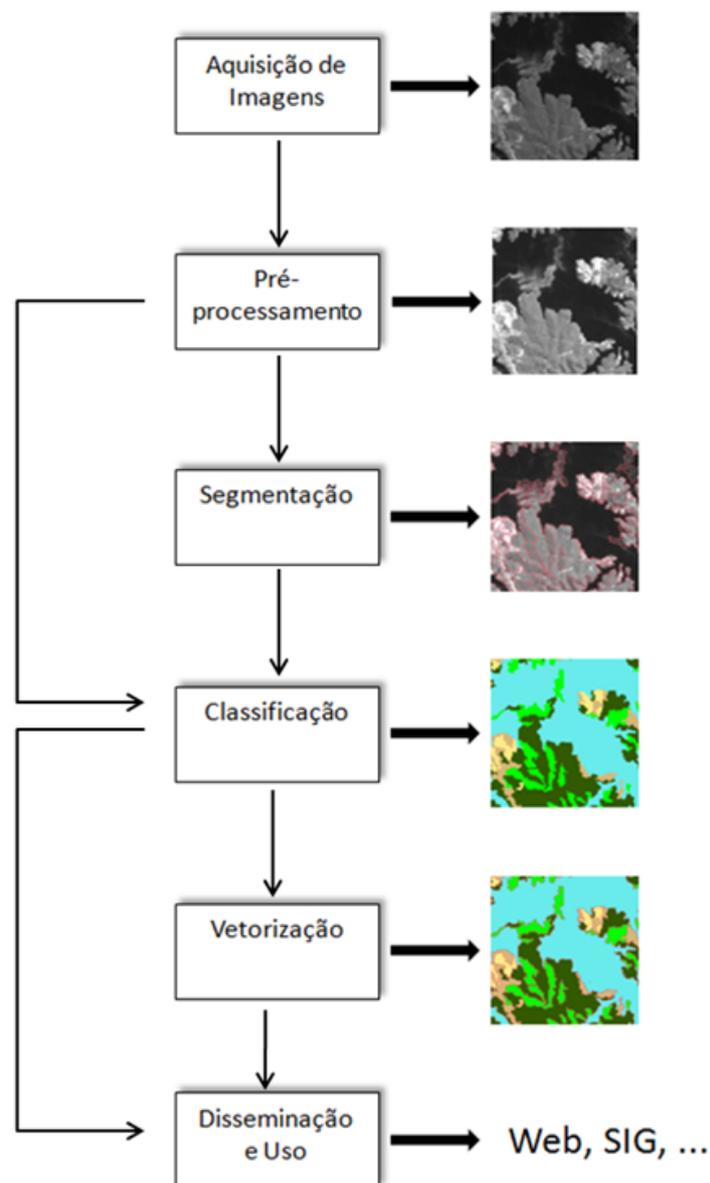


Figura 2.4 - Operações para obtenção de um mapa de cobertura baseado em dados de SR.

### 2.2.1 Estruturas de dados para mapas categóricos vetoriais

Um mapa de cobertura do solo é um dado categórico, ou seja, um dado que representa a variação de uma única variável, assumindo valores dentro um conjunto discreto e finito de categorias nominais. Além disso, o valor da variável é conhecido em qualquer ponto da área mapeada (GOODCHILD et al., 1992).

A representação vetorial de um dado categórico é uma subdivisão planar, ou seja,

uma coleção contínua de polígonos, os quais compartilham segmentos em suas fronteiras. Dado que um mapa categórico apresenta o valor da variável em questão para toda a área mapeada, os polígonos da subdivisão planar não possuem ilhas. A Figura 2.5 mostra um exemplo de uma subdivisão planar.

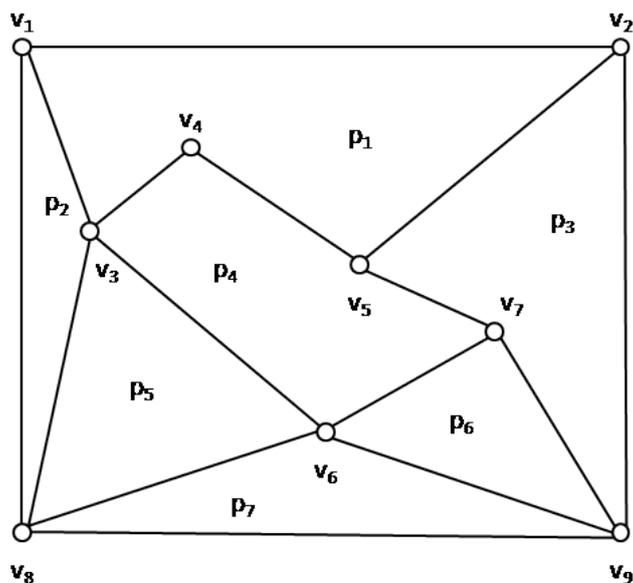


Figura 2.5 - Um exemplo de subdivisão planar.

### 2.2.2 Topologia

O termo **Topologia** na matemática trata de propriedades geométricas que permanecem invariantes sob certas transformações. Em geoinformação, o conceito de topologia refere-se a um conjunto de propriedades geométricas que são invariantes no caso do espaço Euclidiano, como as operações de rotação e translação (WORBOYS; DUCKHAM, 2004). De um ponto vista menos teórico, topologia refere-se a um conjunto de regras e comportamentos que modelam a forma com que pontos, linhas e polígonos compartilham elementos geométricos. Por exemplo, duas feições adjacentes, como dois países vizinhos, compartilham pelo menos uma borda.

Grande parte das operações e consultas implementadas nos SIGs baseiam-se nas propriedades topológicas dos objetos representados. O trabalho de Egenhofer e Franzosa (1991) lista e caracteriza as relações topológicas entre dois objetos. A caracterização proposta no seu trabalho tornou-se padrão de fato para os fabricantes de SIGs. Vol-

tando à subdivisão mostrada na Figura 2.5, podem ser reconhecidos 3 polígonos:  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ , e pode ser dito que o polígono  $p_1$  TOCA o polígono  $p_2$ , onde TOCA é um dos operadores topológicos aceitos pelas especificações do *Open Geospatial Consortium* (OGC) e implementados de maneira inequívoca nos SIGs.

As estruturas de dados usadas para manipular representações vetoriais com **topologia implícita** (WORBOYS; DUCKHAM, 2004) representam cada polígono como um lista de segmentos retos de linha, e nenhum relacionamento topológico (ex. adjacência) é explicitamente armazenado. Tomando como exemplo a Figura 2.5, os polígonos seriam representados pelas seguintes listas de pontos:

$p_1: [v_1, v_2, v_5, v_3, v_4]$

$p_2: [v_4, v_3, v_5, v_6]$

$p_3: [v_1, v_4, v_6, v_5, v_8, v_7]$

O fato de que o polígono  $p_1$  é adjacente ao polígono  $p_2$  pode ser determinado, por exemplo, notando uma seqüência comum nas suas listas de pontos.

Existem ainda outros modelos de estruturas de dados para representações vetoriais com **topologia explícita**, sendo o mais utilizado o modelo *arco-nó-polígono*. Nesse modelo, as linhas (ou arcos) são as unidades básicas. Polígonos (ou áreas) são formados por arcos, que por sua vez são formados por pontos. Um arco é uma linha que possui um ponto inicial e um ponto final, chamados de nós. Arcos podem ter intersecção somente em seus nós. Polígonos adjacentes possuem apenas um arco entre eles. Cada arco possui apenas um área a sua direita e uma área a sua esquerda (WORBOYS; DUCKHAM, 2004). Para a Figura 2.5, o modelo *arco-nó-polígono* de topologia consistiria das estruturas mostradas a seguir na Figura 2.6:

Topologia nós		Topologia arcos					Topologia polígonos	
Nó	Arcos	Arco	Nó Inicial	Nó Final	Pol. Esq.	Pol. Direito	Pol.	Arcos
$v_1$	$s_1, s_6$	$s_1$	$v_1$	$v_2$		$p_1$	$p_1$	$s_1, s_5, s_4, s_3, s_2$
$v_2$	$s_1, s_5$	$s_2$	$v_1$	$v_4$	$p_1$	$p_3$	$p_2$	$s_3, s_4, s_8, s_7$
$v_3$	$s_3, s_4$	$s_3$	$v_4$	$v_3$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$s_2, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_6$
$v_4$	$s_2, s_3, s_7$	$s_4$	$v_3$	$v_5$	$p_1$	$p_2$		
$v_5$	$s_4, s_8, s_9$	$s_5$	$v_1$	$v_5$	$p_1$			
$v_6$	$s_1, s_8$	$s_6$	$v_1$	$v_7$		$p_3$		
$v_7$	$s_6, s_{10}$	$s_7$	$v_4$	$v_3$	$p_3$	$p_2$		
$v_8$	$s_{10}, s_9$	$s_8$	$v_6$	$v_5$	$p_2$	$p_3$		
		$s_9$	$v_5$	$v_8$	$p_3$			
		$s_{10}$	$v_7$	$v_8$	$p_3$			

Figura 2.6 - Exemplo de modelo arco-nó-polígono para topologia.

### 2.3 O Open Geospatial Consortium

O Open Geospatial Consortium (OGC) ([OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM INC., 2011](#)) é um consórcio que agrega companhias, agências governamentais e universidades, e visa promover o desenvolvimento de tecnologias que facilitem a interoperabilidade entre sistemas envolvendo informação espacial e localização. Os resultados do trabalho do OGC são apresentados sob forma de especificações de interfaces e padrões de intercâmbio de dados, e podem ser encontrados no sítio [www.opengeospatial.com](http://www.opengeospatial.com). Dentre as dezenas de especificações criadas pelo OGC estão aquelas que tratam do modelo conceitual para dados geográficos e também do arcabouço conceitual para a construção de serviços geográficos para a web.

A Simple Features Specification (SFS) é uma especificação OGC que define uma arquitetura de representação das geometrias associadas às feições geográficas. Ao seguirem essa arquitetura, as aplicações podem trocar dados sem necessidade de conversões sintáticas. Além da arquitetura, a SFS também define uma representação textual (*Well-known Text Representation for Geometry* (WKT)) e binária (*Well-known Binary Representation for Geometry* (WKB)) para as geometrias. Essas representações são utilizadas no armazenamento de dados geográficos em Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados (SGBD), bem como na expressão de consultas espaciais e como resultados delas. Novamente, a motivação principal para a produção dessas especificações é alcançar interoperabilidade entre aplicações. Para represen-

tar dados categóricos com representação vetorial (subdivisões planares), de acordo com o padrão SFS, devem ser usadas estruturas de dados que seguem modelo de topologia implícita.

## 2.4 Generalização de Mapas

Mapas podem ser considerados representações em escala de objetos selecionados de uma porção do mundo real. No domínio convencional da cartografia, generalização de mapas é um processo dependente da escala que inclui seleção, simplificação e síntese dos objetos que devem compor um determinado mapa. É um processo claramente voltado à visualização ou à comunicação eficiente daquilo que está representado num mapa. Como regra geral, a complexidade de um mapa deve diminuir com a escala do mapa. Essa é uma área de pesquisa ativa e muitos trabalhos na literatura tratam da busca por modelos conceituais abrangentes para generalização e, além disso, na busca por algoritmos que produzam soluções cada vez melhores. Com o advento da tecnologia de SIG, a generalização passou também a ser um processo orientado à informação, que envolve a derivação de uma base de dados menos complexa para atender a uma determinada finalidade. [Li e Zhilin \(2007\)](#) apresenta uma revisão dos desenvolvimentos teóricos e tecnológicos relacionados à generalização cartográfica no ambiente digital.

No contexto de cartografia digital e SIG, a generalização de mapas envolve dois tipos distintos de tarefas: generalização cartográfica e generalização de dados. Generalização cartográfica tem como objetivo derivar produtos gráficos a partir de um banco de dados, onde a clareza e consistência lógica têm prioridade sobre a precisão espacial do mapa. Por outro lado, generalização de banco de dados lida com a produção de banco multi-níveis que contém diversos conjuntos de dados em diferentes escalas. Métodos de generalização de dados não consideram componentes intuitivos ou artísticos, nem lidam com problemas de simbolização, mas priorizam a precisão espacial e a perfeição do mapa. [Jones e Ware \(2005\)](#), considerando o predomínio do acesso à informações geográficas na internet, reconhecem dois tipos de tarefas associadas à generalização de mapas: generalização semântica e generalização geométrica. Generalização semântica diz respeito à escolha da informação categórica que deve ser representada, enquanto generalização geométrica está preocupada com a simplificação de formas e estruturas que representam feições individuais.

A generalização geométrica pode ser considerada uma parte de todo o processo de

generalização de mapas e é realizada a partir da aplicação de operadores que representam ações simples ou atômicas. Simplificação, exagero, agregação, eliminação e deslocamento são alguns dos operadores de generalização. Eles podem ser implementados a partir de diferentes algoritmos, e um razoável conjunto de ferramentas tem sido implementadas como parte das funcionalidades de um SIG (FOERSTER et al., 2008). Uma revisão sobre operadores de generalização e sua aplicação aos diferentes tipos de feições pode ser encontrada em Choe e Kim (2007).

Restrições cartográficas têm sido estabelecidas como um conceito para selecionar o operador de generalização apropriado, ou para controlar a seqüência em que eles serão aplicados na automação do processo de generalização. Estas restrições são fatores como topologia, proximidade, tamanho e forma que podem ser usadas para descrever as características e relacionamentos das feições de um mapa, e são necessários para produzir o melhor resultado para uma determinada escala (NEUN et al., 2009). Uma restrição pode ser descrita como uma medida apropriada que captura a propriedade que ela expressa, por exemplo, a área de uma região é uma medida para a restrição de tamanho (STEINIGER; WEIBEL, 2007).

Simplificação é um operador usado para remover detalhes desnecessários dos dados geométricos de feições lineares e de área sem alterar fundamentalmente as suas formas básicas. Ele não afeta o componente não-espacial do dado, e deve preservar relacionamentos topológicos e espaciais entre as feições. Este operador pode ser implementado a partir de diferentes algoritmos e não existe uma teoria geral que explica qual algoritmo é mais conveniente para o mapa inteiro, bem como para feições individuais. D'Alge () também aborda o processo de generalização no domínio digital, considerando especialmente dados categóricos. Ele realizou uma série de experimentos de generalização para um conjunto de dados que consistiam em mapas de vegetação da Amazônia Brasileira usando uma adaptação do modelo proposto por McMaster e Shea (1992) e conclui que operadores como o de simplificação de linhas poderiam ser usados para gerar mapas de vegetação em diferentes escalas, embora algumas melhorias deveriam ser feitas nos algoritmos a fim de sanar possíveis problemas topológicos.

#### **2.4.1 Algoritmos de Simplificação de Linhas**

Um dos mais citados algoritmos de simplificação de linhas é o algoritmo de Douglas & Peucker (DOUGLAS; PEUCKER, 1973). O propósito do algoritmo é o de, a partir de

uma linha formada por um conjunto de vértices, criar outra linha similar, porém com menos vértices. Ele é um algoritmo recursivo. Inicialmente, ele seleciona o primeiro e o último ponto da linha, analisa o segmento de linha formado entre estes dois pontos, marcando ambos os pontos para que sejam mantidos. Nesta análise, ele primeiramente localiza o vértice mais distante - em distância perpendicular - do segmento formado. Se esta distância entre o vértice e o segmento criado for menor que o valor da tolerância usada (um parâmetro de entrada do algoritmo), então todos os pontos que não estão marcados para serem mantidos poderão ser removidos. Porém, caso esta distância seja maior que a tolerância, então este vértice deverá ser mantido, e o algoritmo é aplicado recursivamente nas duas partes da linhas, entre o primeiro vértice e este mais distante, e em seguida, entre o vértice mais distante e o último vértice. A Figura 2.7 ilustra um exemplo deste algoritmo.

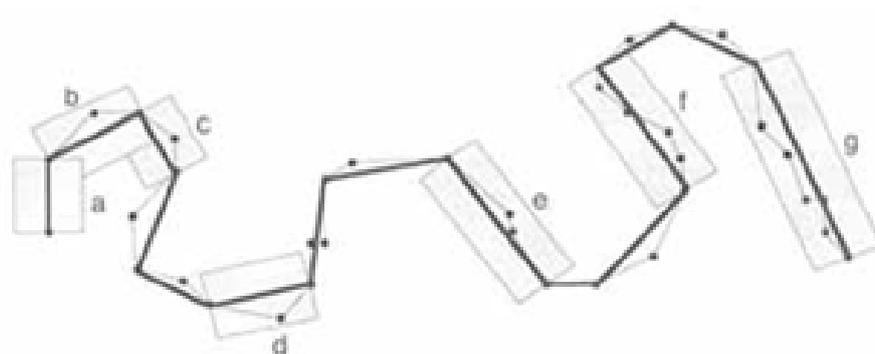


Figura 2.7 - Exemplo do algoritmo de Douglas & Peucker, onde a linha clara ilustra a linha original e a linha escura ilustra a linha simplificada.  
 Fonte: Adaptada de McMaster e Shea (1992).

Outro algoritmo de simplificação existente é o baseado no conceito de Área Efetiva (VISVALINGAM, 1993). Este algoritmo consiste em criar triângulos para cada três vértices consecutivos da linha e calcular sua área, conforme pode ser visto na Figura 2.8. O vértice central do triângulo de menor área é removido e o algoritmo é aplicado recursivamente usando os vértices restantes. A recursão para quando uma determinada condição for alcançada como, por exemplo, um dado número de pontos for removido ou a área efetiva do triângulo atinge um limiar prédefinido.

Os métodos citados anteriormente não garantem a manutenção da topologia original da subdivisão poligonal. Isso se dá devido ao fato de que estes algoritmos processam

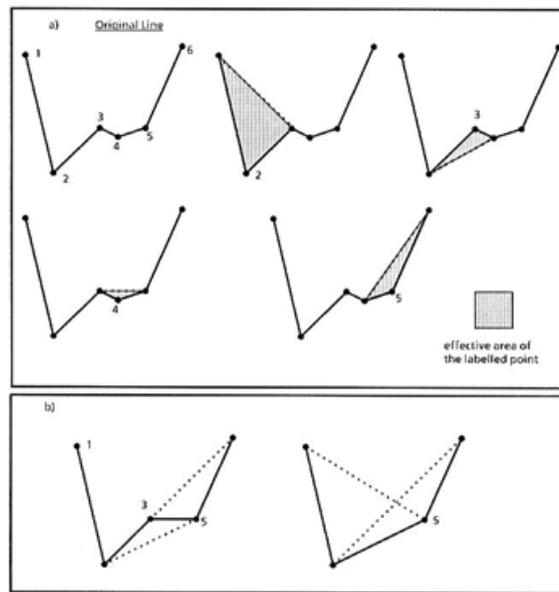


Figura 2.8 - Exemplo do algoritmo de Área Efetiva.  
 Fonte: Adaptada de Visvalingam (1993).

cada polígono de forma independente, não considerando os seus relacionamentos topológicos com os outros objetos do mapa. Isso faz com que inconsistências possam ser geradas, como auto-interseção em um polígono, sobreposição de polígonos entre si ou áreas que não são cobertas por nenhum polígono.

Alguns autores se preocuparam com estes problemas. Zhan e Mark (1993) realizaram um estudo cognitivo sobre simplificação onde tentaram explorar o processo de resolução de conflitos usando o conhecimento humano. Foram dados dois mapas vetoriais para um conjunto de pessoas, sendo o mapa original e o mapa simplificado, onde ambos continham uma linha e uma variedade de polígonos. Em seguida, as pessoas analisaram e apontaram os conflitos no mapa simplificado, e sugerindo maneiras para resolvê-los. Na primeira fase, foram analisados quais conflitos as pessoas detectaram. Na segunda fase, foram analisadas as soluções que foram propostas. Como conclusão, obteve-se que as pessoas não foram unânimes nem na detecção dos conflitos e nem na sugestão de soluções, pois esse é um processo complexo. Os autores sugeriram que métodos automatizados de resolução de conflitos fossem aplicados após a simplificação e em dois passos. No primeiro passo, ocorre a detecção dos conflitos e no segundo passo ocorre a resolução dos conflitos detectados.

Muller (April 1990) propôs algumas técnicas que podem ser usadas para evitar as auto-intersecções, bem como evitar que partes dos polígonos simplificados passem a se localizar sobre os seus polígonos vizinhos. O autor sugere que estas técnicas de correção de feições possam ser aplicadas depois do processo de simplificação, independentemente do algoritmo que tenha sido usado. Estas técnicas tentam detectar os vértices onde estas intersecções e sobreposições ocorreram, deslocando em seguida as coordenadas envolvidas, de forma a corrigir estes problemas.

Falls et al. (2005) também estudaram os conflitos que podem ser gerados durante a aplicação de algoritmos de simplificação. Eles sugerem a aplicação de um teste antes de se remover um vértice, que consiste em formar um triângulo com vértices sequenciais, onde o vértice intermediário é o candidato a ser removido. Caso existam quaisquer outros vértices no interior deste triângulo, o vértice candidato não poderá ser removido, evitando que inconsistências indesejadas sejam geradas.

Outro autor que propôs um pós-processamento para a resolução de conflitos foi Saalfeld (1999). Ele sugeriu algumas modificações ao algoritmo de Douglas & Peucker que adicionaram a ele a capacidade de recuperar a consistência topológica do mapa simplificado, tanto com relação à geometrias vizinhas quanto às auto-intersecções. Sua estratégia foi a de detectar conflitos e reinserir vértices que anteriormente haviam sido removidos da geometria, repetindo este processo até que a geometria recupere sua consistência topológica. No pior caso, a geometria simplificada voltaria a ter todos os vértices que estavam contidos na geometria original. Devido a sua forma de detecção de conflitos, em determinados casos as geometrias não recuperavam sua consistência. Silva e Wu (2006) propuseram uma modificação na forma de detecção de conflitos deste algoritmo, de forma que os casos particulares de inconsistências que não eram detectados passaram a ser detectados, fazendo com que o mapa não perdesse sua consistência topológica após o processo de simplificação.

Em seu trabalho, Williams (1987) fez um estudo sobre a preservação de área dos polígonos após um processo de simplificação ou um processo de adição de detalhes. Neste estudo, ele propôs um pós-processamento sobre cada polígono do mapa de forma que sua área original pudesse ser restaurada. Seu algoritmo se baseou no deslocamento de vértices, de forma que o polígono era expandido ou contraído até que sua área voltasse a ser igual a área antes do processo aplicado.

### 2.4.2 A questão da escala

No caso de mapas de uso e cobertura derivados de imagem de SR, a escala cartográfica do dado relaciona-se com a resolução espacial da imagem da qual o mapa foi derivado, e essa é uma questão importante para os usuários de imagens de SR: qual a escala cartográfica mais apropriada para gerar os produtos derivados? Não existe uma abordagem definitiva, porém uma padronização de determinação da escala em imagens de SR, utilizada tanto no meio acadêmico quanto no mercado comercial, é dada pela Equação 2.1, onde RES é a resolução espacial nominal da imagem da qual o mapa foi derivado (BOGGIONE et al., 2009).

$$Escala = \frac{1}{2 * RES * 1000} \quad (2.1)$$

Por exemplo, imagens da classe do sensor LANDSAT, que tem 30 metros de resolução podem ser usadas para gerar mapas de cobertura na escala 1:60.000 ou menores. Essa informação é relevante para o caso da generalização porque, em geral, algoritmos de simplificação de linha dependem de um fator de tolerância. Esse valor relaciona-se com a escala associada ao mapa sendo simplificado.

Outra informação importante está relacionada à exatidão de um mapa. O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) é um decreto de 1984 (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO NACIONAL CARTOGRÁFICA, ) que define parâmetros para classificar a qualidade de um mapa baseando-se na sua exatidão. Ele define três classes, onde para cada classe, 90% dos pontos bem definidos do mapa, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao definido no PEC. Para mapas classe A, por exemplo, o PEC define um erro de 0,5mm, na escala do mapa. Desta forma, um mapa de cobertura na escala 1:60.000 deverá ter um erro máximo de 30 metros.

## 2.5 PRODES

A Floresta Amazônica é uma floresta tropical localizada na região norte da América do Sul. Além de ocupar boa parte do território brasileiro, ela também ocupa territórios da Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa, sendo que ela é a maior floresta tropical do mundo. Um dos principais problemas enfrentados por esta floresta é o desflorestamento ilegal. Com a finalidade

principal de extrair árvores nobres ou criar áreas de cultivo e pastos, madeireiras e fazendeiros tem se instalado na região e atuado de forma ilegal. Com o objetivo de mapear a Floresta Amazônica e mensurar anualmente essa destruição, foi criado um projeto chamado PRODES, em 1988, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O Projeto de Monitoramento do Desflorestamento da Amazônia Legal (PRODES) é um projeto desenvolvido pelo INPE com o objetivo de produzir estimativas anuais das taxas de desflorestamento e tem como área de atuação uma região no Brasil conhecida como Amazônia Legal (AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (ADA), 2011). A Amazônia Legal é uma região definida a partir de um conceito político e não apenas geográfico, e compreende nove estados brasileiros que possuem trechos da Floresta Amazônica em seus respectivos territórios. Ela possui uma área total de  $5.217.423 \text{ Km}^2$ , o que corresponde a cerca de 61% do território brasileiro. A lista de estados que fazem parte da Amazônia Legal é a seguinte: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e Maranhão. Dentre os estados listados, apenas o Maranhão não está em sua totalidade dentro da Amazônia Legal. A Figura 2.9 ilustra a região que compreende a Amazônia Legal.

O PRODES é baseado em interpretação de imagens de satélite e foi realizado de forma analógica no período de 1988-2002. Durante este período, a interpretação era feita analisando-se imagens impressas em papel fotográfico, onde uma folha de papel vegetal era colocada sobre a imagem impressa e polígonos para representar o desflorestamento, hidrografia, etc., eram então desenhados. A partir destes polígonos, era possível calcular estimativas das áreas desflorestadas. A partir de 2003, buscando uma precisão maior no georreferenciamento dos polígonos, este processo de interpretação passou a ser assistido por computadores, fazendo uso do sistema SPRING (CAMARA et al., 1996), e o projeto passou a se chamar PRODES Digital.

Segundo sua metodologia (CAMARA et al., ), o PRODES faz uso de um subconjunto de imagens do satélite Landsat. Estas imagens formam uma grade que cobre toda a região da Amazônia Legal. Cada subdivisão dessa grade é chamada de cena e possui identificadores de órbita e ponto que identificam de forma única cada uma delas. Caso uma cena ou parte dela esteja coberta por nuvens, impedindo a visão da cobertura do solo, imagens de outros satélites poderão ser usadas para a interpretação. Ao final da interpretação, tanto as regiões interpretadas quanto as que estão cobertas por nuvens são levadas em consideração para o cálculo da taxa de desmatamento

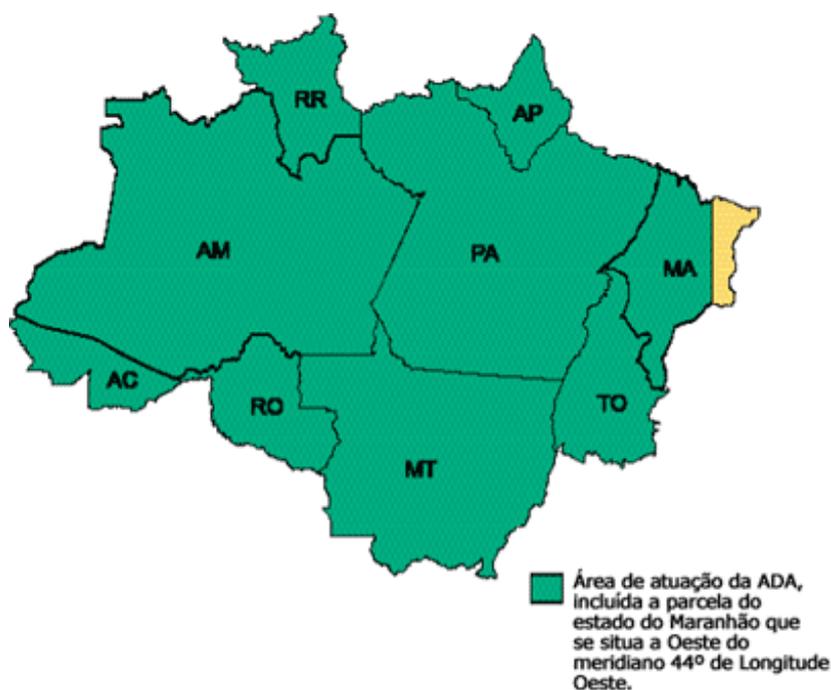


Figura 2.9 - A região da chamada Amazônia Legal.

Fonte: Adaptada de Agência de Desenvolvimento da Amazônia (ADA) (2011)

anual da Amazônia Legal.

A partir do ano de 2005, o sistema usado no PRODES Digital passou a ser o TerraAmazon (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2011). Este sistema é baseado na biblioteca TerraLib (CAMARA et al., 2008), desenvolvida pelo INPE, e possui todas as funcionalidades necessárias para realizar todas as fases envolvidas neste processo de cálculo das taxas, como a importação das imagens de satélite, processamento de imagens, interpretação e a disseminação dos dados. Uma motivação para a criação deste sistema foi a de integrar todas as informações existentes em um único banco de dados. Anteriormente, cada cena analisada ficava armazenada em um banco de dados distinto do sistema SPRING (CAMARA et al., 1996). Esta integração de dados possibilitou a realização de um mapeamento do desflorestamento de forma menos complexa, onde os resultados passaram a ser gerados com maior agilidade. Por outro lado, grandes mosaicos de dados vetoriais acabaram sendo criados, aumentando o seu tempo de acesso, desenho e processamento.

## 2.6 Contextualização do problema

Este Capítulo revisou o processo de geração de mapas vetoriais a partir de imagens de Sensoriamento Remoto. Em razão dessa origem, estes mapas são compostos por polígonos que de forma geral tem uma complexidade acima do que seria necessário para representá-los. Além deste fato, esses mapas também podem conter polígonos que não são compatíveis com a escala de trabalho do mapa, ou seja, não possuem representatividade na sua escala. Estes problemas aumentam o espaço de armazenamento necessário para o mapa, diminuem o desempenho na sua transmissão, apresentação e posterior processamento. Para minimizar estes problemas, se faz necessário o uso de generalização cartográfica, mais precisamente o uso de algoritmos de simplificação.

O uso de algoritmos de simplificação tem como o objetivo reduzir a complexidade do mapa, minimizando estes problemas. No caso do mapa ser uma partição completa do espaço e estar armazenado em uma estrutura topológica implícita, como é o caso deste trabalho, a simplificação acaba criando outros problemas que também precisam ser gerenciados num processo de simplificação, como é o caso da geração de inconsistências. As principais inconsistências geradas são a criação de polígonos com auto-intersecção, ou a criação de regiões sobrepostas ou de regiões sem informação.

No capítulo seguinte, estes problemas são analisados de forma mais detalhada. Uma metodologia para a simplificação dos mapas originados a partir de imagens de SR será proposta e detalhada.



### 3 METODOLOGIA PARA SIMPLIFICAÇÃO DE MAPAS OBTIDOS A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Como destacado anteriormente, o foco deste trabalho está nos mapas vetoriais de uso e cobertura da terra, originados a partir de imagens de Sensoriamento Remoto. Estes mapas, de forma geral, possuem polígonos com detalhes excessivos e com aspecto serrilhado em razão de sua origem, além de polígonos incompatíveis com sua escala ideal de trabalho. Alguns operadores de generalização cartográfica podem ser usados para minimizar ou até resolver estes problemas, como os operadores de simplificação e de agregação. Algoritmos baseados no operador de simplificação são capazes de reduzir a complexidade dos polígonos do mapa, removendo vértices que são considerados desnecessários para representá-los. Porém, a maioria destes algoritmos de simplificação analisa cada um dos polígonos de forma individual, ou seja, sem considerar a existência dos outros polígonos adjacentes presentes no mapa e que também fazem parte da subdivisão planar. Desta forma, estes algoritmos acabam gerando inconsistências que não são desejáveis, como a sobreposição entre os polígonos do mapa e a criação de regiões onde não existe informação alguma.

A Figura 3.1 mostra uma região de um mapa de cobertura antes e depois da simplificação, ilustrando os problemas de sobreposição e de regiões vazias. Essas regiões inconsistentes são geradas, pois o contexto da vizinhança dos polígonos não é levado em conta durante o processo de simplificação. A Figura 3.1(a) mostra, em destaque na cor verde, um polígono antes da sua simplificação e a Figura 3.1(b) mostra a sua versão simplificada, bem como a de seus vizinhos. As regiões em escuro são as regiões onde existem sobreposições entre os polígonos, enquanto as regiões em branco são as que ficaram sem informação após a simplificação.

No caso deste trabalho, o operador de agregação é usado para tratar polígonos que não são compatíveis com a escala ideal do mapa. Este operador também é usado para tratar polígonos que, após o processo de simplificação, deixaram de ser compatíveis com esta escala ideal. Em ambos os casos, ao invés de remover o polígono incompatível, o algoritmo irá agregar este polígono a algum outro polígono adjacente, de forma que não seja criada uma região sem informação no local onde este polígono estava.

Outro detalhe que deve ser citado é que os algoritmos de simplificação em geral têm apenas a preocupação de diminuir a quantidade de vértices de uma geometria.

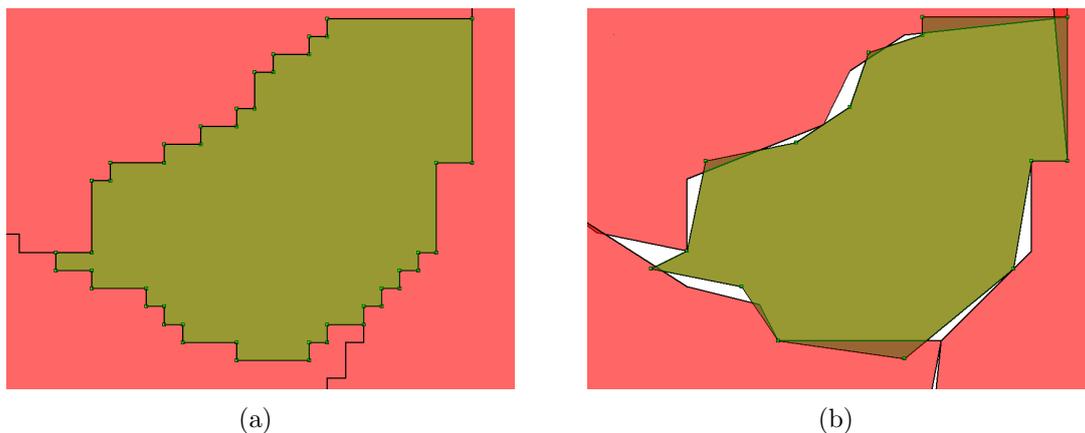


Figura 3.1 - Exemplo dos problemas de regiões sobrepostas ou sem informação. (a) Versão original de uma região, destacando um determinado polígono; (b) Resultado da simplificação, bem como os problemas de regiões sobrepostas ou sem informação

Estes algoritmos não têm a preocupação de controlar outras características, como por exemplo, a área da geometria. Grandes alterações na área das geometrias podem ser um fator impeditivo ao uso do mapa simplificado, como é o caso dos mapas de desflorestamento do PRODES, onde a área é um dos principais atributos, senão o principal. Desta forma, alguma forma de controle desta variável deve ser considerada durante um processo de simplificação de polígonos.

### 3.1 Adaptações Propostas

Considerando as características dos mapas vetoriais de cobertura originados a partir de imagens de SR descritas anteriormente e tendo em vista os problemas de inconsistências apresentados, este trabalho propõe três adaptações, que podem ser aplicadas a diferentes algoritmos de simplificação de linhas:

- a) Incorporar o conceito de *Vértices-âncora*;
- b) Considerar o contexto da vizinhança de cada polígono;
- c) Limitar a simplificação baseando-se em uma área de influência do polígono.

A primeira e a segunda adaptações têm como objetivo fazer que o mapa simplificado mantenha a consistência topológica que existia antes do processo de simplificação,

no que diz respeito às regiões sobrepostas e às regiões sem informação. A terceira adaptação tem como objetivo minimizar as alterações de área dos polígonos do mapa resultante. Estas adaptações são descritas a seguir.

### 3.1.1 Vértices-âncora

A primeira adaptação proposta por este trabalho tem o objetivo de buscar a manutenção da consistência topológica do mapa resultante da simplificação. A característica principal desta adaptação é fazer com que o algoritmo de simplificação passe a considerar não só o polígono a ser simplificado, mas também o contexto de vizinhança existente no mapa durante o processo de simplificação. Desta forma, algoritmos de simplificação cujas versões originais não consideravam o contexto de vizinhança passariam a considerá-la.

Esta adaptação se refere ao conceito de vértices-âncora, que são definidos como sendo vértices que fazem parte de três ou mais segmentos de linha distintos presentes no mapa. Estes vértices especiais se diferem dos demais vértices pelo fato de que eles se localizam nos pontos onde ocorrem as alterações de topologia entre os polígonos presentes no mapa. A lista de vértices-âncora de um mapa é mantida durante o processo de simplificação, ou seja, nenhum dos vértices presentes nesta lista poderá ser removido pelo algoritmo adaptado.

Exemplificando o conceito de vértices-âncoras, a Figura ?? representa uma pequena região de um mapa de cobertura. Esta região é composta pelos polígonos  $P1$ ,  $P2$  e  $P3$ . Os vértices  $v1$ ,  $v2$ ,  $v5$  e  $v6$  são considerados âncoras, significando que eles não deverão ser removidos durante o processo de simplificação. Neste exemplo, os vértices  $v3$  e  $v4$  não são âncoras e poderão ser removidos.

A detecção da lista de vértices-âncora deve ser realizada antes de se iniciar o processo de simplificação, de forma que esta lista contendo os vértices que não serão removidos possa ser utilizada como restrição pelo algoritmo de simplificação. Para que a detecção dos vértices-âncora seja realizada de forma correta, ela deve considerar todos os polígonos vizinhos ao polígono que será simplificado.

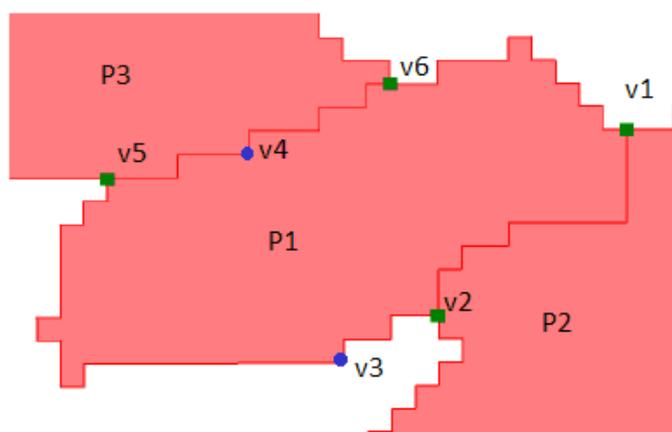


Figura 3.2 - Vértices-âncoras ( $v1$ ,  $v2$ ,  $v5$  e  $v6$ )

### 3.1.2 Contexto da vizinhança

O uso dos vértices-âncora como restrição durante o processo de simplificação minimiza, porém não garante a manutenção da consistência topológica do mapa de saída. A remoção de vértices que não são considerados âncoras pode ainda gerar regiões sobrepostas e regiões sem informação. A segunda adaptação complementa o processo de busca de manutenção da consistência topológica, pois ela complementa a modificação ao algoritmo de forma que ele possa considerar o contexto da vizinhança no processo de simplificação.

Esta adaptação se baseia na propagação da simplificação do polígono que está sendo analisado para os seus polígonos vizinhos: cada vez que um vértice é removido de um determinado polígono durante sua análise, ele também é removido de qualquer outro polígono adjacente que também possua este mesmo vértice. O objetivo de propagar a remoção de vértices é o de evitar que regiões sobrepostas e regiões sem informação sejam criadas no mapa. Vale lembrar que, neste trabalho, a subdivisão poligonal possui uma representação de acordo com especificação OGC-SFS, ou seja, sua topologia é implícita e há repetição dos vértices de borda nos polígonos vizinhos.

A Figura 3.3 ilustra a propagação da simplificação. A Figura 3.3(a) mostra que o vértice  $V$  está presente em ambos os polígonos  $A$  e  $B$ . A Figura 3.3(b) mostra um passo da simplificação de  $A$ , removendo o vértice  $V$  e criando temporariamente uma região sem informação. A Figura 3.3(c) mostra a propagação da simplificação, que propagou a remoção do vértice  $V$  para o polígono  $B$  e fez com que o mapa voltasse

a ser uma partição completa do espaço, sem regiões sobrepostas e sem regiões sem informação.

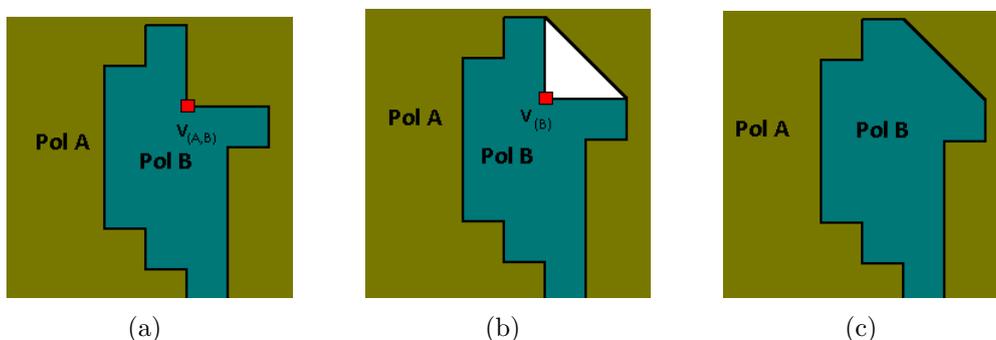


Figura 3.3 - Propagação da simplificação: (a) O vértice  $V$  existente nos polígonos  $A$  e  $B$ ; (b)  $V$  removido do polígono  $A$ ; e (c)  $V$  deve ser removido do polígono  $B$

### 3.1.3 Área de influência

De forma geral, os algoritmos de simplificação de geometrias consideram apenas as coordenadas que compõem as geometrias durante o processo de simplificação. Em determinadas situações, pode ser desejável que outras características da geometria não sofram muitas distorções, ou pelo menos que essas distorções possam de alguma forma ser controladas. Este é o caso da área dos polígonos. Para determinados mapas, como é o caso dos mapas estudados neste trabalho, a área das classes existentes no mapa é uma das suas informações mais importantes. Assim, uma alteração significativa nos valores de área após a simplificação pode tornar o mapa simplificado inutilizável.

Desta forma, esta adaptação tem como objetivo controlar as alterações de área dos polígonos que serão simplificados pelos algoritmos. A idéia por trás dela é a de criar uma região que limite a simplificação do polígono, fazendo com que o polígono resultante esteja necessariamente contido dentro dessa região. Essa região é gerada a partir da área de influência no entorno da geometria.

A Figura 3.4 exemplifica essa região de influência, onde o polígono a ser simplificado está em preto e a região de limite está em vermelho, no entorno do polígono. Durante o processo de simplificação, esta região deverá ser usada como uma restrição espacial. Caso a remoção de um determinado vértice ocasione na criação de um segmento que

não esteja dentro dessa região, ou seja, esteja ultrapassando o limite da região, este vértice não poderá ser removido pelo algoritmo.

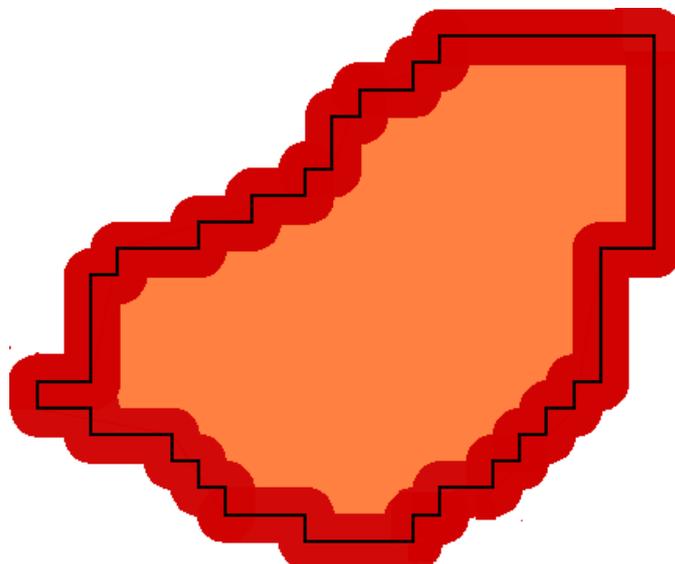


Figura 3.4 - Exemplo da área de influência do polígono, em vermelho, contornando os seus limites, em preto.

### 3.2 Processo de Simplificação

O processo de simplificação como um todo envolve mais do que a simples aplicação do algoritmo de simplificação às geometrias de um mapa. Ele também envolve fatores como a recuperação dos polígonos a partir de um banco de dados, o pré-processamento, a persistência, entre outros. O processo de simplificação como um todo precisa ser capaz de gerenciar a forma de aplicar a simplificação em mapas com grandes quantidades de polígonos, como é o caso deste trabalho, já que pode ser inviável fazer uso apenas da memória do computador.

Para que mapas vetoriais com grandes quantidades de polígonos possam ser processados, uma das alternativas é fazer uso do próprio banco de dados onde os dados se encontram. Junto a isso, se faz necessária uma forma dividir o mapa completo em regiões menores, processando cada uma dessas regiões individualmente, de forma a não sobrecarregar a memória física do computador. Diferentes estratégias poderiam ser usadas dividir o mapa em regiões menores e permitir o processamento por blocos. O mapa poderia ser dividido, por exemplo, baseando-se em uma grade regular ou

então fazendo uso o retângulo envolvente de cada um dos polígonos. Independentemente da estratégia usada, para o processamento de cada uma das regiões, as etapas são definidas da seguinte forma:

- Buscar todos os polígonos da região corrente;
- Realizar o pré-processamento;
- Aplicar o algoritmo de simplificação;
- Persistir os polígonos que foram atualizados.

Este processo continua até que todas as regiões tenham sido analisadas e o mapa inteiro tenha sido simplificado. A Figura 3.5 ilustra o processo de simplificação para mapas que possuem uma grande quantidade de polígonos.

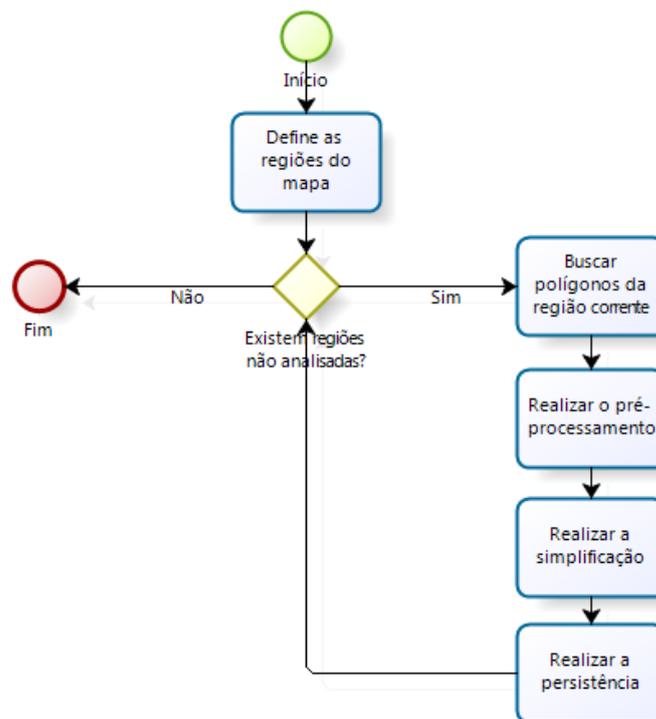


Figura 3.5 - Processo completo de simplificação para mapas que possuem uma grande quantidade de polígonos.

Tomando como base a região corrente a ser analisada, a primeira etapa do processo de simplificação proposto neste trabalho consiste em fazer a consulta ao banco de

dados e buscar os polígonos que fazem parte desta região. Dependendo da estratégia usada, pode acontecer de serem trazidos para a memória polígonos que já foram simplificados. Isso é desejável pois o passo de cálculo dos vértices-âncora necessita da presença do polígono a ser simplificado e também de todos os seus vizinhos, mesmo que eles já tenham sido simplificados.

Em seguida, na segunda etapa, é realizado o pré-processamento da região corrente, que por sua vez envolve alguns passos. O primeiro passo consiste em analisar os polígonos e detectar os vértices-âncora, que serão posteriormente usados na aplicação do algoritmo de simplificação. Em seguida, a partir da versão não simplificada dos polígonos (versão original), são calculadas as áreas de influência para cada um dos polígonos da região corrente. Por fim, são descartados os polígonos que podem estar interceptando a região corrente, porém que já foram simplificados.

A terceira etapa representa a aplicação do algoritmo de simplificação com as adaptações que foram propostas neste trabalho. Assim, cada um dos polígonos da região corrente é processado pelo algoritmo de simplificação. Durante a aplicação do algoritmo, pode acontecer de um polígono ser colapsado, deixando de existir. Outra situação analisada nesta etapa é a detecção de polígonos que são ou se tornaram pequenos demais e devem deixar de existir. Neste caso, estes polígonos são agregados a algum polígono vizinho, evitando assim que sejam criadas regiões sem informação.

O passo final diz respeito à persistência dos polígonos. Todos os polígonos que foram modificados, independentemente da modificação ter ocorrido na simplificação ou na propagação da remoção de vértices, serão persistidos no banco de dados, substituindo a versão existente no banco de dados pela versão que foi modificada.

## 4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Este capítulo apresenta o resultado da aplicação da metodologia proposta ao caso dos mapas de desflorestamento da Amazônia Legal gerados pelo projeto PRODES. Os mapas foram simplificados usando as versões originais e as versões com as adaptações sugeridas de dois algoritmos de simplificação.

As adaptações propostas foram implementados nos algoritmos de simplificação de feições vetoriais Douglas & Peucker (D&P) (DOUGLAS; PEUCKER, 1973) e de Área Efetiva (AE) (VISVALINGAM, 1993). Foram implementadas as versões originais destes algoritmos, conforme sugeridas em seus respectivos artigos, e as versões modificadas foram implementadas de forma a contemplar cada uma das três adaptações propostas neste trabalho.

### 4.1 Dados Utilizados

Foram utilizados dois mapas para os experimentos deste trabalho. O primeiro mapa foi gerado a partir de uma imagem do satélite LandSat-TM, com resolução de 30 metros e escala de 1:60.000, de uma região do estado de São Paulo, na Brasil. Para a geração deste mapa, que foi chamado de Mapa 1, esta imagem de satélite foi segmentada e classificada no Sistema de Informações Geográficas SPRING, sendo que cinco classes resultaram da classificação: água, floresta, reflorestamento, solo e urbano. Algumas características deste mapa são descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Informações sobre o Mapa 1.

	Polígonos	Vértices	Área ( $Km^2$ )
Mapa 1	1.464	113.627	299,17

O segundo mapa teve como origem o projeto PRODES. Dentre os dados que são gerados por este projeto, existe um mapa categórico que mostra as mudanças da cobertura de solo em relação a detecção do desmatamento na região da Amazônia Legal. Este mapa está armazenado na forma matricial, com resolução espacial de 60 metros e escala de 1:120.000, e é composto por diversas classes. Como a semântica do mapa não é o foco deste trabalho, algumas classes foram agrupadas de forma a reduzir a quantidade total de classes do mapa e assim facilitar o entendimento dos resultados dos experimentos. As classes do mapa categórico podem ser vistas na

Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Lista das classes presentes no Mapa 2

<b>Classe</b>	<b>Descrição da classe</b>
desflo 1997	Desflorestamento ocorrido até o ano de 1997
desflo 1999	Desflorestamento ocorrido de 1998 a 1999
desflo 2000	Desflorestamento ocorrido no ano de 2000
desflo 2001	Desflorestamento ocorrido no ano de 2001
desflo 2002	Desflorestamento ocorrido no ano de 2002
desflo 2003	Desflorestamento ocorrido no ano de 2003
desflo 2004	Desflorestamento ocorrido no ano de 2004
desflo 2005	Desflorestamento ocorrido no ano de 2005
desflo 2006	Desflorestamento ocorrido no ano de 2006
desflo 2007	Desflorestamento ocorrido no ano de 2007
desflo 2008	Desflorestamento ocorrido no ano de 2008
desflo 2009	Desflorestamento ocorrido no ano de 2009
dsf ant	Classe temporária usada em 2009 em parte do mapa; representa o desflorestamento de uma data anterior
dummy	Regiões contendo os valores dummy da imagem
floresta	Regiões de floresta
hidrografia	Regiões de hidrografia
não floresta	Regiões previamente identificadas nas imagens, com base no Mapa de Vegetação do IBGE, constituída de vegetação com fisionomia diversa da florestal, incluindo a área urbana
nuvem	Regiões não abservadas

Esse mosaico pode ser considerado como uma imagem de SR, na qual foram executados procedimentos de segmentação e classificação a fim de se obter o mapa de uso e cobertura, com representação vetorial. Este mapa vetorial foi chamado de Mapa 2 e foi então utilizado para a realização dos experimentos de simplificação, permitindo assim a análise e validação da metodologia proposta nesse trabalho. Esse dado é apropriado, uma vez que os polígonos que compõem sua subdivisão planar são bastante heterogêneos quanto a formas e tamanhos. Em razão de sua origem, todos os polígonos possuem um aspecto serrilhado derivado da representação matricial do dado original a partir do qual foram gerados, e cada polígono deste mapa está associado a uma classe. O mapa, em formato matricial, é ilustrado na Figura 4.1.

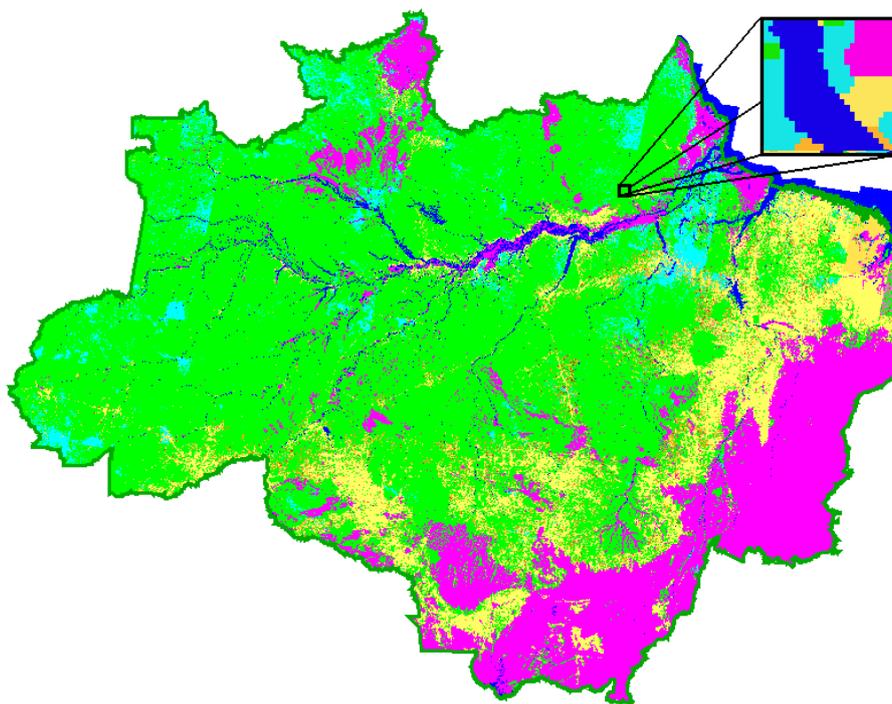


Figura 4.1 - Mapa matricial categórico da região da Amazônia Legal, gerado pelo projeto PRODES.

A partir do mapa já na representação vetorial, foram extraídas duas regiões. A primeira contém 0,2% dos polígonos presentes no mapa completo e foi chamado de Mapa 2a. Já a segunda contém 26,6% dos polígonos do mapa completo e foi chamado de Mapa 2b. Por fim, o mapa completo contendo 100% dos polígonos também foi usado, sendo então chamada de Mapa 2c. Eles estão localizados conforme ilustrado nas Figuras 4.2(a), 4.2(b) e 4.2(c), respectivamente, sendo que em destaque está a relação da região de cada um dos mapas com a região da Amazônia Legal.

A Tabela 4.3 resume as informações dos mapas vetoriais que foram extraídos do mapa completo. Nela podemos ver a quantidade de polígonos, a quantidade de vértices, a área do total em  $Km^2$  e a sua porcentagem com relação à quantidade de polígonos do Mapa 2.

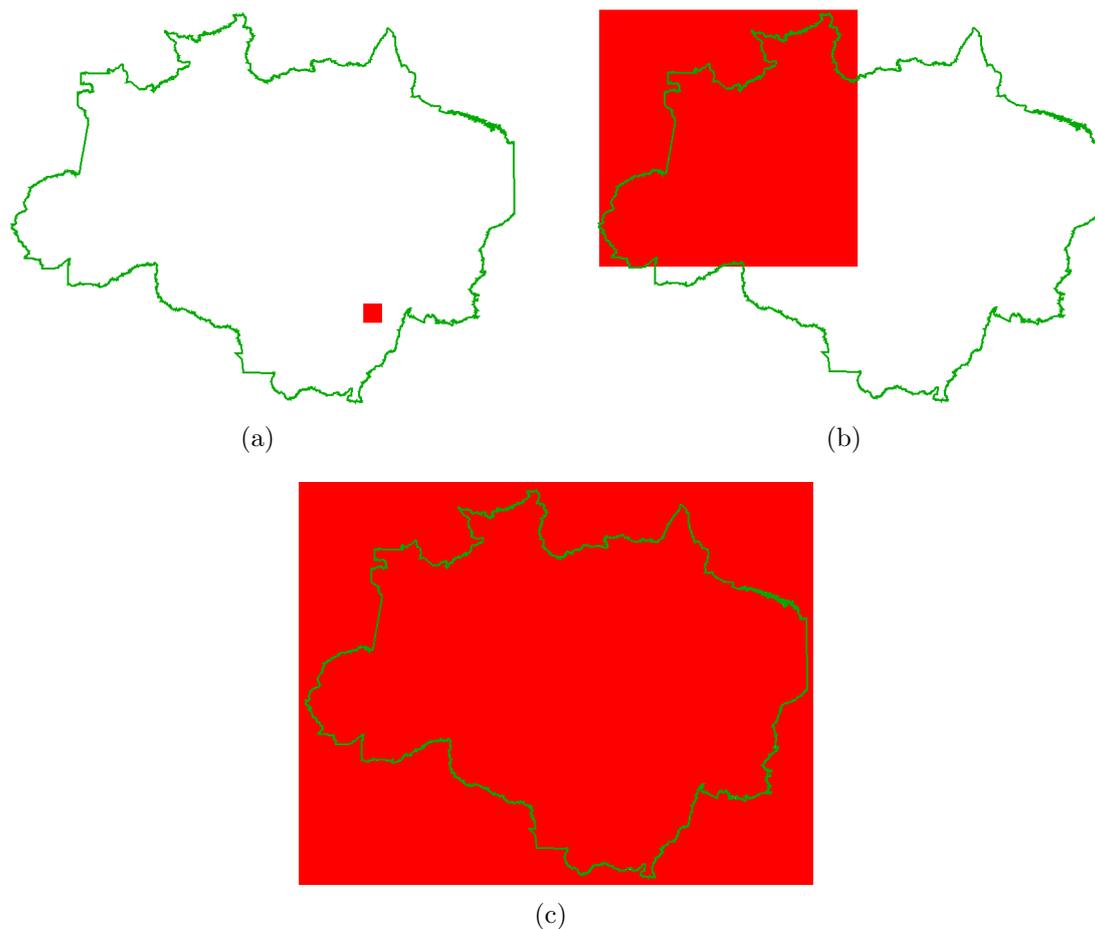


Figura 4.2 - As regiões do Mapa 2 em relação a Amazônia Legal. (a) Mapa 2a; (b) Mapa 2b; e (c) Mapa 2c.

Tabela 4.3 - Informações sobre o Mapa 2

	Polígonos	Vértices	Área ( $Km^2$ )	% do Total de Polígonos
Mapa 2a	4.971	279.541	14.641	0.20%
Mapa 2b	587.184	28.371.298	2.929.011	26.60%
Mapa 2c	2.202.452	93.932.303	9.112.568	100.00%

## 4.2 Experimentos

Foram realizados quatro experimentos, sendo que cada um consistiu na simplificação de um determinado mapa vetorial usando cada uma das versões implementadas dos algoritmos. Com a simplificação destes mapas, que possuem diferentes quantidades de polígonos, foi possível avaliar o comportamento dos algoritmos quando aplicados

a pequenas e a grandes quantidades de polígonos.

Para cada um dos experimentos, foi aplicada a simplificação usando as duas versões originais dos algoritmos e, em seguida, o mapa foi novamente simplificado usando as suas versões adaptadas. Desta forma, foram gerados quatro mapas simplificados, sendo dois para cada um dos algoritmos implementados.

Os experimentos tiveram o objetivo de verificar o tamanho do impacto das adaptações propostas nos que diz respeito aos seguintes itens:

- Poder de remoção de vértices dos algoritmos;
- Consistência topológica do mapa resultante;
- Alteração de área dos polígonos.

A verificação sobre a alteração no poder de remoção dos algoritmos se deu comparando a quantidade de vértices removidos por sua versão original e sua versão adaptada. Desta forma, foi possível mensurar o quanto as adaptações propostas influenciaram na remoção de vértices. Com relação à consistência topológica do mapa, foi verificado se a versão adaptada dos algoritmos foi capaz de realizar a simplificação dos dados sem gerar regiões sobrepostas ou regiões sem informação.

Por fim, a verificação da alteração de área dos polígonos se deu comparando as somas totais das áreas de cada classe presente no mapa de entrada e os totais existentes no mapa de saída. Desta forma, foi possível ter um indicativo de que as adaptações propostas obtiveram ou não sucesso em controlar as alterações de área.

Para a remoção de polígonos incompatíveis com a escala, considerou-se que polígonos que tivessem área menor ou igual ao quadrado da tolerância usada fossem agregados a polígonos vizinhos.

#### **4.2.1 Primeiro Experimento**

O primeiro experimento se baseou na simplificação do Mapa 1 usando as versões originais e adaptadas dos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva. A tolerância usada neste experimento foi de 30 metros, uma vez que a escala de trabalho deste mapa é 1:60.000. Os resultados deste processo de simplificação podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados da simplificação do Mapa 1

	Qtd. Vértices	% Vértices Removidos	Qtd. Polígonos
Mapa 1	113.627	N/A	1.464
D&P Original	36.758	65.42%	1.464
D&P Adaptado	36.385	65.77%	1.464
AE Original	45.718	56.99%	1.464
AE Adaptado	47.089	55.70%	1.464

Na comparação entre as versões dos algoritmos, a quantidade de vértices removidos por ambas as versões tiveram uma variação que ficou em torno de 1%, tanto para o algoritmo de Douglas & Peucker quanto para o algoritmo de Área Efetiva. Este número pode ser considerado um indício de que o poder de remoção de vértices dos algoritmos não foi alterado de forma significativa. No caso do algoritmo de Douglas & Peucker, houve um aumento na quantidade de vértices removidos pela versão adaptada, fato que será discutido na seção de discussão de resultados, posterior aos experimentos deste trabalho.

Nenhum polígono foi considerado incompatível com a escala ideal deste mapa no processo de simplificação deste experimento. Este fato ocorreu já que não existiam polígonos que tinham ou ficaram com área menor ou igual ao quadrado da tolerância após a sua simplificação.

Analisando a consistência topológica dos mapas simplificados, é possível notar que as versões originais dos algoritmos não foram capazes de mantê-la, criando regiões sobrepostas e regiões sem informação que não existiam no mapa original. As Figuras 4.3(b) e 4.3(d) ilustram os problemas gerados após a simplificação usando respectivamente as versões originais dos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva. A Figura 4.3(a) ilustra como era o mapa antes do processo de simplificação.

Ao contrário das versões originais, as versões adaptadas dos algoritmos realizaram a simplificação sem alterar a consistência topológica do mapa. Os mapas resultantes do processo de simplificação usando as versões adaptadas dos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 4.3(c) e 4.3(e).

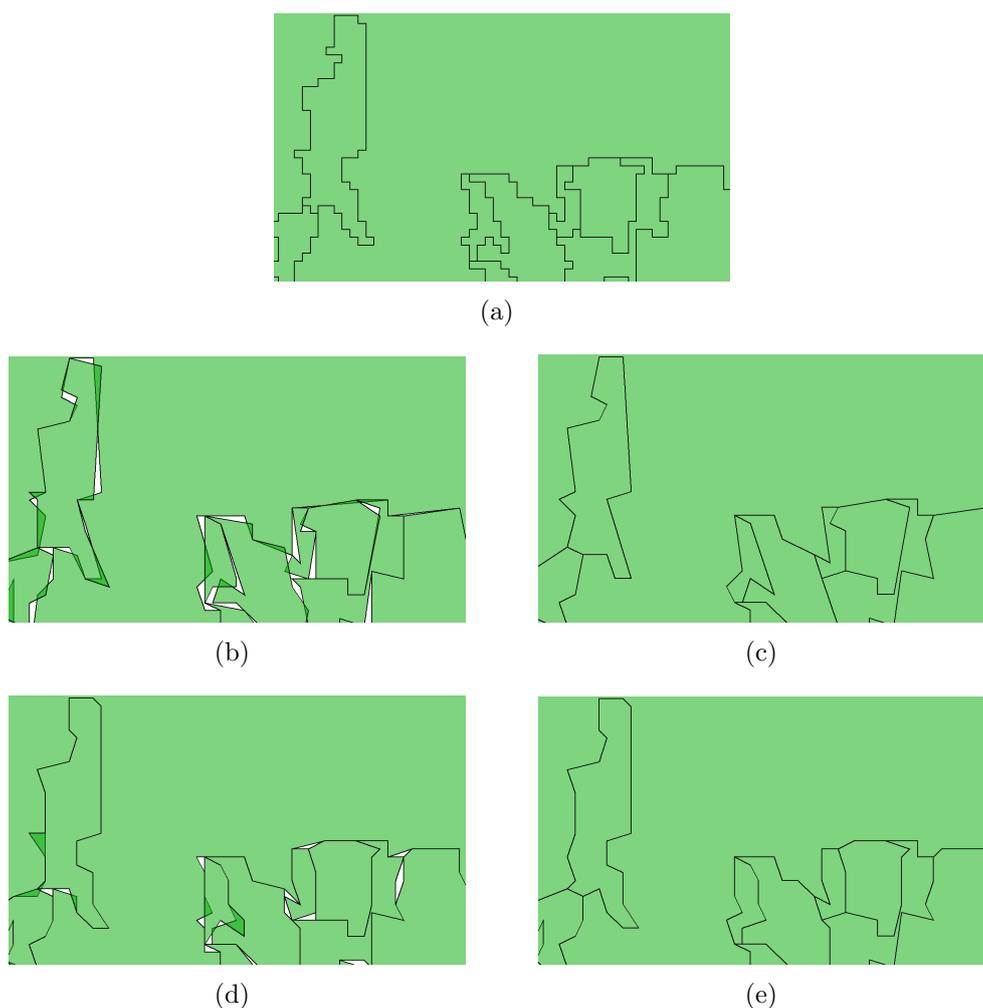


Figura 4.3 - Resultado da simplificação do Mapa 1: (a) O mapa original; (b) D&P Original; (c) D&P Adaptado; (d) AE Original; (e) AE Adaptado

O terceiro item a ser analisado no experimento diz respeito às alterações de área das classes do mapa após o processo de simplificação. Os dois algoritmos usados neste trabalho tiveram desempenho distinto no controle das alterações de área das classes do mapa de entrada. A Tabela 4.5 compara, para cada classe do mapa, as alterações de áreas (em porcentagem) entre o mapa de origem e os mapas simplificados usando os algoritmos implementados. Esta tabela define cada uma das classes do mapa, bem como suas respectivas áreas. Em seguida, para cada versão de cada algoritmo, a tabela define as alterações nas áreas, baseando-se na porcentagem. Valores positivos na alteração de área indicam que houve um aumento na área total da classe, enquanto valores negativos indicam uma diminuição na sua área total.

Tabela 4.5 - Comparação entre as alterações de área do Mapa 1 e os mapas simplificados usando os algoritmos implementados.

Mapa 1		Douglas & Peucker (%)		Área Efetiva (%)	
Classe	Área ( $km^2$ )	Original	Adaptada	Original	Adaptada
agua	59,7307	-0,0533	0,6823	-0,2861	0,1291
floresta	126,9661	-0,6872	0,2205	0,0088	0,1630
reflorestamento	45,5944	-1,8646	-0,7237	-0,6915	-0,4002
solo	45,1266	-1,5419	-0,4429	-1,0700	-0,3490
urbano	21,7586	-1,6192	-0,7245	-0,4175	0,2568

De forma geral, a versão adaptada do algoritmo de Douglas & Peucker foi capaz de controlar e minimizar de forma significativa as alterações de área das classes do mapa de entrada em relação à sua versão original. Para algumas poucas classes, porém, a versão original do algoritmo teve um desempenho melhor. A agregação de polígonos que seriam removidos é a provável causa desta situação e será analisada ao final deste capítulo, na seção que discute os resultados dos experimentos.

Com relação ao algoritmo de Área Efetiva, o controle das alterações de área não pode ser notado de forma significativa da mesma forma que na aplicação do algoritmo de Douglas & Peucker. O principal motivo para que a versão adaptada não obtivesse um desempenho significativo no controle das alterações de área foi que o ponto de parada escolhido para ambas às versões deste algoritmo limitou seu poder de remoção de vértices a tal ponto que, na maioria dos casos, o algoritmo atingia o ponto de parada antes de ter removido vértices suficientes para que os novos segmentos começassem a ser gerados fora da região de influência. Assim, esta adaptação pouco influenciou no controle das alterações de área das classes em comparação com a versão original do algoritmo.

#### 4.2.2 Segundo Experimento

O segundo experimento consistiu na aplicação dos algoritmos de simplificação ao Mapa 2a. A tolerância usada neste experimento foi de 60 metros, uma vez que a escala de trabalho deste mapa é 1:120.000. A Tabela 4.6 ilustra um resumo dos resultados da simplificação usando ambas as versões dos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva.

Analisando a quantidade de vértices removidos, é possível notar que as duas versões

Tabela 4.6 - Resultados da simplificação do Mapa 2a

	Qtd. Vértices	% Vértices Removidos	Qtd. Polígonos
Mapa 2a	279,541	N/A	4.971
D&P Original	77.228	72,37%	3.944
D&P Adaptado	74.463	73,36%	4.064
AE Original	160.530	57,42%	4.971
AE Adaptado	160.240	57,32%	4.134

do algoritmo de Douglas & Peucker tiveram um desempenho similar, com variação de menos de 1%. No caso deste algoritmo, a versão adaptada removeu um pouco mais de vértices que a versão original do algoritmo, fato que será discutido ao final deste capítulo. As versões do algoritmo de Área Efetiva também tiveram um desempenho similar, com uma variação ainda menor. Em resumo, em ambos os casos o poder de remoção de vértices do algoritmo foi equivalente para ambas as versões dos algoritmos.

Com relação à consistência topológica dos mapas resultantes, as diferenças são evidentes. Ambas as versões adaptadas dos algoritmos foram capazes de manter a consistência topológica do mapa após o processo de simplificação, ao contrário das versões originais, que criaram tanto regiões sobrepostas quanto regiões sem informação. A Figura 4.4 ilustra os mapas resultantes do processo de simplificação. Na Figura 4.4(a) está uma pequena região do Mapa 2a, que foi usado como entrada no primeiro experimento.

As Figuras 4.4(b) e 4.4(d) mostram o resultado da simplificação usando as versões originais dos algoritmos de D&P e de AE, respectivamente, onde se pode notar um grande número de regiões sobrepostas ou sem informação. Por fim, as Figuras 4.4(c) e 4.4(e) mostram o resultado da simplificação usando as versões adaptadas destes algoritmos, onde se pode notar que não existem regiões sobrepostas ou sem informação.

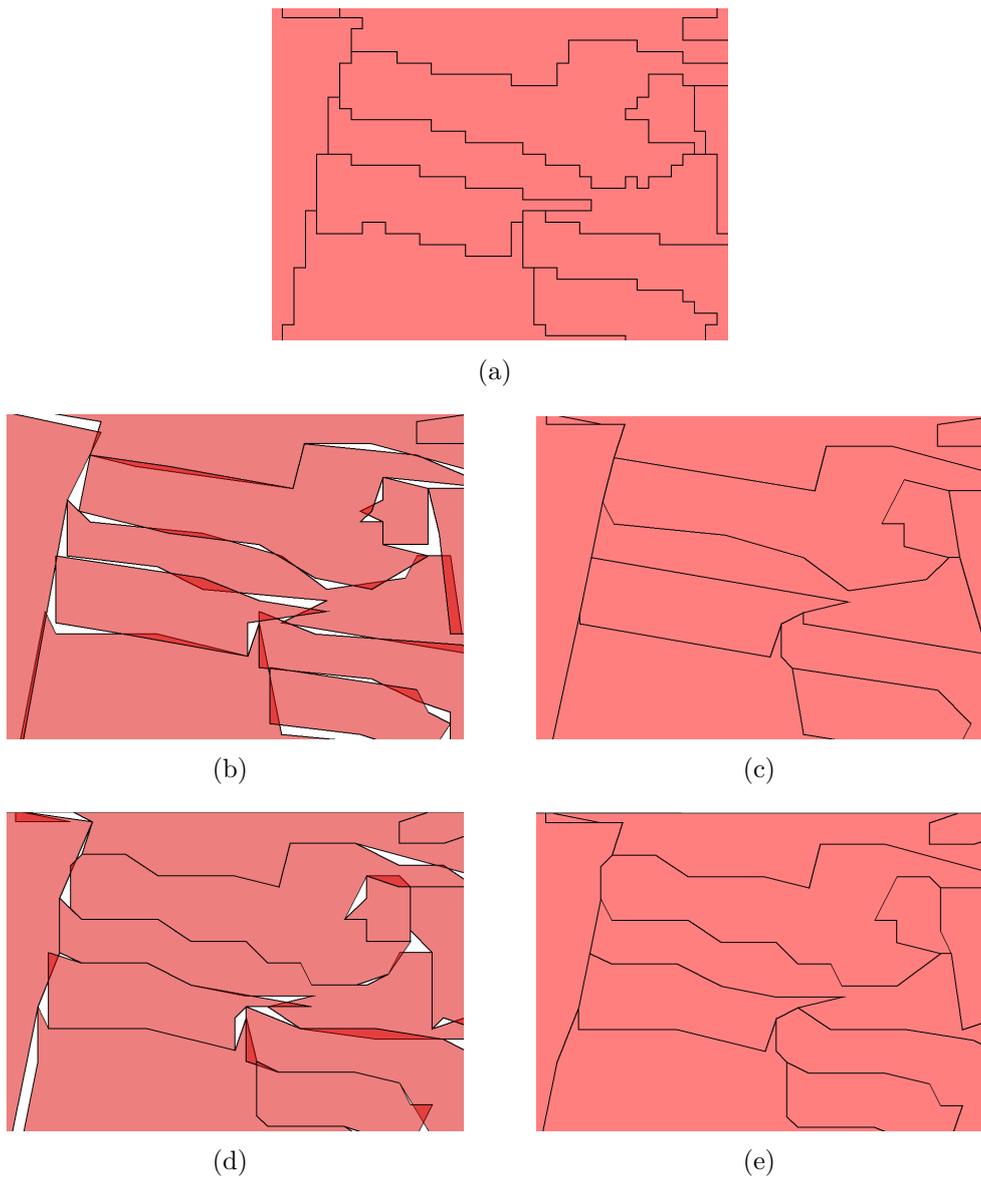


Figura 4.4 - Resultado da simplificação do Mapa 2a: (a) O mapa original; (b) D&P Original; (c) D&P Adaptado; (d) AE Original; (e) AE Adaptado

Os resultados da comparação de área que foram realizados neste segundo experimento mostraram um comportamento similar ao primeiro experimento. A Tabela 4.7 compara, para cada classe do mapa, as alterações de áreas (em porcentagem) entre o mapa de origem e os mapas simplificados usando os algoritmos implementados.

Enquanto que para o algoritmo de Douglas & Peucker existem fortes indícios de

Tabela 4.7 - Comparação entre as alterações de área do Mapa 2a e os mapas simplificados usando os algoritmos implementados.

Mapa 2a		Douglas & Peucker (%)		Área Efetiva (%)	
Classe	Área ( $km^2$ )	Original	Adaptada	Original	Adaptada
desflo 1997	2.919,83	-0,1261	0,2166	-0,0347	0,1451
desflo 2000	576,23	-0,5919	-0,0151	-0,0276	0,1172
desflo 2001	220,51	-3,0140	-1,2560	-1,6260	-1,1651
desflo 2002	331,12	-1,1521	-0,1781	-0,5781	-0,1445
desflo 2003	519,75	-0,8929	-0,1164	-0,3021	-0,0436
desflo 2004	464,65	-0,8708	-0,2137	-0,4528	-0,2160
desflo 2005	180,57	-1,6007	-0,5542	-0,4902	-0,3008
desflo 2006	68,30	-1,4106	-0,2629	-0,2253	0,1762
desflo 2007	47,02	-1,6230	-1,0515	-0,5162	-0,6502
desflo 2008	40,97	-1,5665	-1,2078	-0,1578	-0,2637
desflo 2009	59,72	-9,0484	-7,1876	-4,1821	-4,4635
floresta	6.924,81	-0,1177	0,0674	-0,0276	0,0509
hidrografia	8,12	-0,1051	-2,0634	0,7739	0,4941
nao floresta	2.279,12	-0,1094	0,0838	-0,0738	0,0224

que as alterações de área das classes foram minimizadas, estes indícios não existem de forma clara em analisando os resultados da simplificação usando o algoritmo de Área Efetiva.

#### 4.2.3 Terceiro Experimento

O terceiro experimento consistiu na aplicação dos algoritmos de simplificação ao Mapa 2b. A tolerância usada neste experimento foi de 60 metros, uma vez que a escala de trabalho deste mapa é 1:120.000. Conforme visto anteriormente, o Mapa 2b contém uma quantidade de polígonos bem maior do que o Mapa 2a. Os números que ilustram os resultados da simplificação podem ser vistos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados da simplificação do Mapa 2b

	Qtd. Vértices	% Vértices Removidos	Qtd. Polígonos
Mapa 2c	28.371.298	N/A	587.184
D&P Original	8.995.927	68,29%	465.249
D&P Adaptado	8.707.262	69,30%	468.647
AE Original	12.408.119	56,26%	587.184
AE Adaptado	12.074.505	57,44%	483.392

Da mesma forma que ocorreu no primeiro e segundo experimentos, o poder de remoção de vértices dos algoritmos, em ambos os casos, continuou equivalente entre as versões originais e as adaptadas. As diferenças novamente ficaram em torno de 1%. Outro detalhe é que novamente a versão adaptada do algoritmo de Douglas & Peucker removeu mais vértices do que sua versão original.

Analisando a questão da consistência topológica, os resultados continuaram similares aos primeiros experimentos, mesmo com uma quantidade de polígonos muito maior neste segundo experimento. As adaptações propostas por este trabalho permitiram que a consistência topológica do mapa se mantivesse inalterada após o processo de simplificação, como pode ser visto na Figura 4.5. As versões originais dos algoritmos, novamente, geraram regiões sobrepostas e regiões sem informação.

A Figura 4.5(a) mostra uma região do Mapa 2b, que posteriormente foi simplificado. As Figuras 4.5(b) e 4.5(d) ilustram o resultado da simplificação usando as versões originais dos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva, respectivamente. O resultado da simplificação usando as suas versões adaptadas podem ser vistos nas Figuras 4.5(c) e 4.5(e).

Analisando as alterações de área das classes, os desempenhos foram similares aos do primeiro e segundo experimentos. Enquanto o algoritmo de Douglas & Peucker adaptado minimizou as alterações de área das classes no mapa simplificado em comparação à sua versão original, o algoritmo de Área Efetiva não obteve o mesmo desempenho. Novamente o ponto de parada acabou limitando a quantidade de vértices removidos do algoritmo de Área Efetiva de forma que os segmentos gerados acabaram sempre ficando dentro da região de influência, fazendo com que esta adaptação não fosse capaz de controlar as alterações de área com a mesma eficiência que ela fez no algoritmo de Douglas & Peucker.

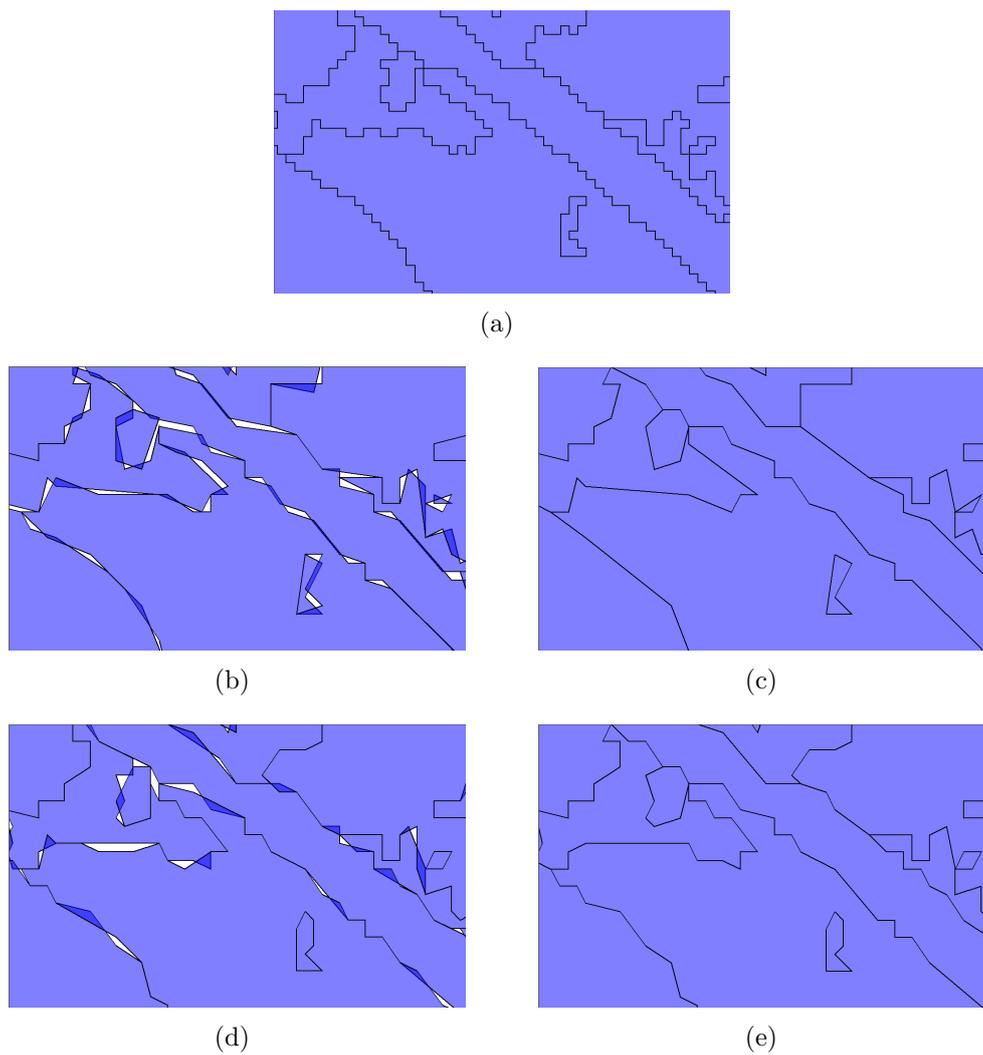


Figura 4.5 - Resultado da simplificação do Mapa 2b: (a) O mapa original; (b) D&P Original; (c) D&P Adaptado; (d) AE Original; (e) AE Adaptado

A Tabela 4.9 ilustra os resultados com simplificação com relação à área das classes, comparando, para cada classe, as alterações de áreas (em porcentagem) dos mapas simplificados em relação ao mapa de origem.

Tabela 4.9 - Comparação entre as alterações de área do Mapa 2b e os mapas simplificados usando os algoritmos implementados.

Mapa 2b		Douglas & Peucker (%)		Área Efetiva (%)	
Classe	Área ( $km^2$ )	Original	Adaptada	Original	Adaptada
desflo 1997	37.847,59	-0,6250	0,2225	0,0219	0,4900
desflo 2000	7.276,14	-3,9739	-2,1432	-0,6539	-0,5599
desflo 2001	3.587,56	-5,9712	-3,5630	-1,1886	-1,4446
desflo 2002	3.229,15	-5,4270	-2,8946	-1,0787	-1,0645
desflo 2003	4.389,85	-6,3278	-3,8509	-1,6122	-1,8117
desflo 2004	4.077,99	-5,1222	-2,8383	-1,2646	-1,2559
desflo 2005	3.656,64	-4,2250	-1,8719	-0,9147	-0,5375
desflo 2006	2.029,73	-3,6248	-1,7216	-0,4280	-0,3941
desflo 2007	2.029,98	-3,3750	-1,3989	-0,3946	-0,0070
desflo 2008	2.044,81	-5,7555	-3,0142	-1,2644	-1,1206
desflo 2009	2.621,33	-9,7674	-6,6055	-2,8656	-3,3551
dummy	989.846,18	-0,0424	-0,0135	-0,0100	-0,0102
floresta	1.607.497,49	0,0122	0,1052	-0,0299	-0,0113
hidrografia	44.955,64	-0,3054	-0,1176	-0,0373	0,0705
nao floresta	104.049,52	-0,1640	-0,0621	0,0244	0,0503
nuvem	109.871,86	-0,4765	-0,4357	0,3302	0,3884

#### 4.2.4 Quarto Experimento

Da mesma forma que os experimentos anteriores, o quarto experimento consistiu em aplicar os algoritmos de simplificação ao Mapa 2c. Como já visto, este mapa contém a totalidade dos polígonos que estão presentes no Mapa 2, que foi um dos casos de estudo deste trabalho. Além de verificar o poder de remoção, a consistência topológica e as alterações de área das classes, este experimento visou também verificar se a implementação foi capaz de realizar o processo de simplificação em um mapa que continha uma grande quantidade de polígonos, somando mais de dois milhões. A tolerância usada neste experimento foi de 60 metros, uma vez que a escala de trabalho deste mapa é 1:120.000.

Apesar de este experimento ter sido realizado usando como entrada um mapa que continha uma grande quantidade de polígonos, os números da remoção de vértices continuaram similares, nunca variando mais do que 1%. O resultado da simplificação do Mapa 2c pode ser visto na Tabela 4.10.

A manutenção da consistência topológica também ocorreu neste experimento. Am-

Tabela 4.10 - Resultados da simplificação do Mapa 2c

	Qtd. Vértices	% Vértices Removidos	Qtd. Polígonos
Mapa 2c	93.932.303	N/A	2.202.452
D&P Original	30.067.688	67,99%	1.766.465
D&P Adaptado	29.992.851	68,07%	1.787.713
AE Original	41.492.316	55,83%	2.202.449
AE Adaptado	40.941.836	56,41%	1.828.032

bos os mapas que foram simplificados pelas versões adaptadas dos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva continuaram topologicamente consistentes. Da mesma forma que nos outros experimentos, as versões originais dos algoritmos não conseguiram manter essa consistência. A Figura 4.6 ilustra uma região do Mapa 2c, bem como o resultado da aplicação da simplificação usando cada um dos algoritmos implementados.

Em ambos os mapas que foram simplificados usando as versões originais dos algoritmos, como é possível ver nas Figuras 4.6(b) e 4.6(d), os mapas resultantes não mantiveram a consistência topológica que existia no mapa antes do processo de simplificação. Ao contrário dos mapas simplificados pelas versões originais dos algoritmos, os mapas resultantes da simplificação usando as versões adaptadas mantiveram a consistência topológica, como pode ser visto nas Figuras 4.6(c) e 4.6(e)

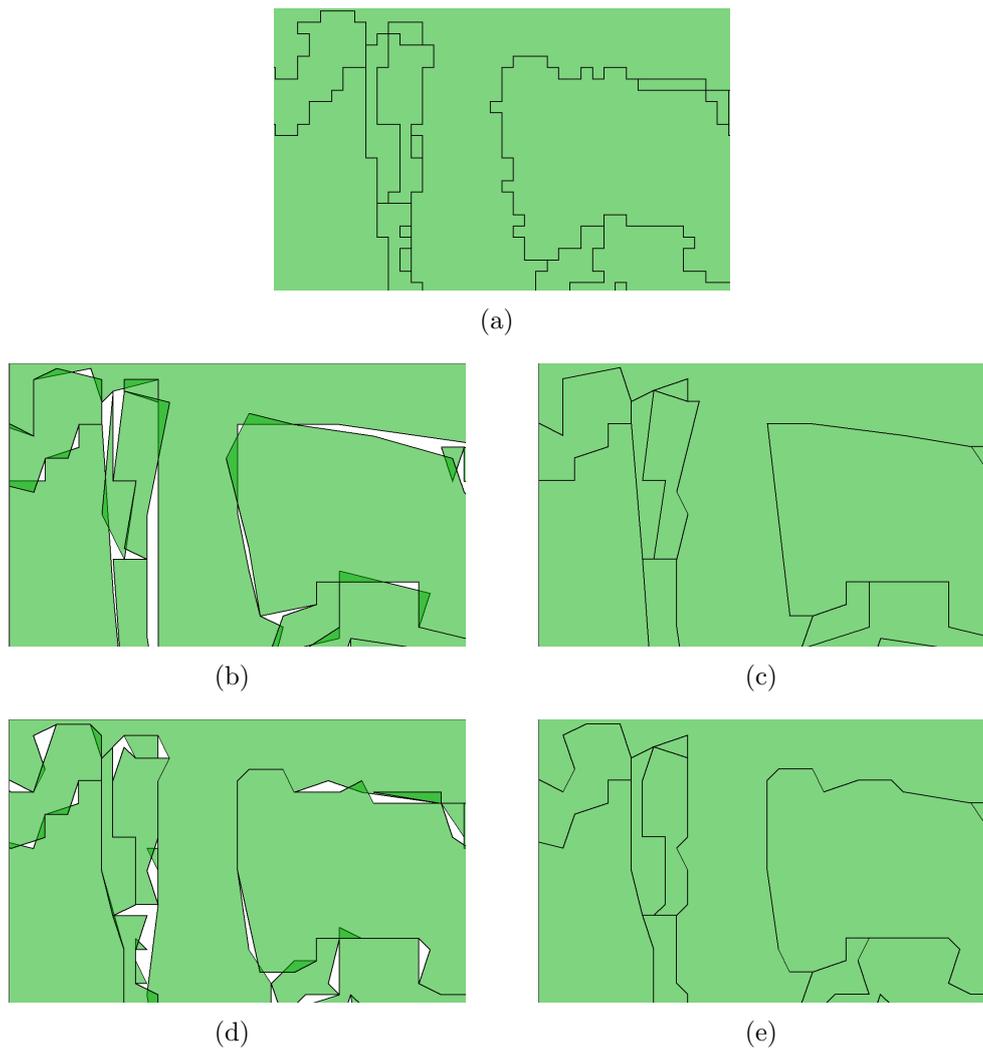


Figura 4.6 - Resultado da simplificação do Mapa 2c: (a) O mapa original; (b) D&P Original; (c) D&P Adaptado; (d) AE Original; (e) AE Adaptado

Por fim, a Tabela 4.11 ilustra o resultado da simplificação com relação às alterações de áreas das classes do mapa. Da mesma forma como ocorreu nos experimentos anteriores, o algoritmo de Douglas & Peucker controlou e reduziu as alterações de área das classes do mapa, enquanto o algoritmo de Área Efetiva não conseguiu um controle significativo principalmente em razão da forma que foi definido seu ponto de parada.

Tabela 4.11 - Comparação entre as alterações de área do Mapa 2c e dos mapas simplificados.

Mapa 2c		Douglas & Peucker (%)		Área Efetiva (%)	
Classe	Área ( $km^2$ )	Original	Adaptada	Original	Adaptada
desflo 1999	11.396,43	-0,0930	0,3570	0,0356	0,2990
desflo 2000	65.172,01	-2,2372	-1,0814	-0,4081	-0,2800
desflo 2001	54.191,58	-2,0580	-0,9826	-0,4589	-0,3832
desflo 2002	25.600,28	-2,7252	-0,9995	-0,4927	-0,2641
desflo 2003	30.259,51	-3,2061	-1,4662	-0,6744	-0,5293
desflo 2004	27.043,25	-3,3992	-1,6098	-0,8064	-0,7052
desflo 2005	23.796,93	-3,3133	-1,2812	-0,6297	-0,4385
desflo 2006	10.855,97	-3,2641	-1,1470	-0,2714	-0,1389
desflo 2007	11.443,21	-3,1748	-1,1655	-0,3347	-0,0560
desflo 2008	13.285,31	-4,8324	-2,2211	-1,0654	-0,9326
desflo 2009	18.270,23	-6,7901	-4,2647	-1,8384	-2,1448
dsf ant	4.738,79	-0,1908	-0,0786	0,0519	0,1531
dummy	4.042.890,65	-0,0340	-0,0085	-0,0061	-0,0068
floresta	2.990.788,56	-0,0270	0,1210	-0,0556	-0,0234
hidrografia	163.922,15	-0,1115	0,0765	-0,0464	0,0654
nao floresta	957.617,21	-0,0652	0,0032	0,0058	0,0286
nuvem	224.721,51	-0,5425	-0,3874	0,3341	0,4260

#### 4.2.5 Discussão

A simplificação usando as versões originais e adaptadas dos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva foram capazes de reduzir a complexidade dos polígonos, removendo uma quantidade considerável de vértices. Na comparação entre as versões dos algoritmos, pode-se notar que as versões adaptadas tiveram um desempenho equivalente às suas respectivas versões originais, com variação girando em torno de 1% na quantidade de vértices removidos em todos os experimentos realizados. Este fato pode ser considerado um indício de que as adaptações propostas neste trabalho não alteraram de forma significativa o poder de simplificação dos algoritmos que foram testados.

As versões adaptadas de ambos os algoritmos, apesar das restrições que foram adicionadas, em quase todos os experimentos removeram uma quantidade de vértices um pouco maior do que suas respectivas versões originais. Isso se deu pelo fato de que, como existe a propagação da remoção de vértices, o processo de simplificação

acabou analisando cada segmento do polígono por duas vezes. Desta forma, este processo acabou fazendo com que o algoritmo removesse vértices que não tinham sido removidos durante a primeira análise, aumentando, assim a quantidade de vértices removidos para cada polígono.

Ao contrário da adaptação que adicionava a lista de vértices-âncoras como restrição, diminuindo o poder de remoção de vértices dos algoritmos, o uso da propagação da remoção de vértices aumentou o poder de remoção de vértices dos algoritmos. Assim, uma adaptação acabou compensando a outra, e a diferença entre a remoção total de vértices das versões originais e adaptadas manteve-se em torno de 1% em todos os casos.

Com relação à manutenção da consistência topológica, ambas as versões adaptadas foram capazes de mantê-la consistente após o processo de simplificação, fazendo com que o mapa resultante continuasse a ser representado por partição completa do espaço, sem regiões sobrepostas e sem regiões sem informação. Este fato sugere que as adaptações propostas podem ser usadas como alternativa no processo de simplificação quando houver a necessidade de ter um mapa simplificado que seja topologicamente consistente.

Analisando o uso da região de influência, as versões adaptadas tiveram resultados distintos. Enquanto a versão adaptada do algoritmo de Douglas & Peucker teve um desempenho mais significativo no controle das alterações de área do que a sua versão original, o mesmo não ocorreu para o algoritmo de Área Efetiva. Em razão do ponto de parada ter reduzido o poder de remoção de vértices do algoritmo, esta adaptação não obteve um resultado significativo para o algoritmo de Área Efetiva, pois o processo de simplificação não removeu vértices suficientes para que seu uso influenciasse no resultado final da simplificação.

No que diz respeito ao algoritmo de Douglas & Peucker, a adaptação da região de influência minimizou as alterações de área de praticamente todas as classes em todos os experimentos que foram realizados. Um detalhe que deve ser considerado nesta análise é a distribuição da quantidade e tamanho dos polígonos no mapa. Classes que continham um grande número de polígonos pequenos tenderam a perder área, já que mais polígonos foram considerados incompatíveis com a escala e desta forma foram agregados a outros polígonos. O inverso acontece com classes que possuíam uma grande quantidade de polígonos grandes. Nestas classes, a tendência foi de aumento

da área total pelo fato de que os polígonos grandes tem mais chance de agregar os polígonos pequenos.

Apesar das vantagens de se usar as adaptações propostas no que diz respeito à manutenção da consistência topológica e do controle das alterações de área, as versões adaptadas dos algoritmos tiveram uma perda significativa no desempenho com relação ao tempo de processamento. Cada uma das adaptações adicionou um custo de processamento maior aos algoritmos e, em média, o tempo de processamento passou a ser de 15 a 20 vezes maior. Esse dado serve apenas como informação adicional, já que este trabalho não buscou fazer uma implementação focando a busca por desempenho.



## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O processo de geração de mapas vetoriais de uso e cobertura da terra a partir de imagens de Sensoriamento Remoto, através de segmentação e classificação, produz mapas que são compostos por polígonos que de forma geral têm uma complexidade acima do que seria necessário para representá-los. Estes mapas também podem conter também polígonos que não são compatíveis com a sua escala ideal de trabalho, ou seja, eles possuem polígonos que não têm representatividade nesta escala. Estes problemas aumentam o espaço de armazenamento necessário para o mapa e diminuem o desempenho na transmissão, apresentação e posterior processamento deste mapa. Para minimizar estes problemas, se faz necessário realizar uma generalização cartográfica sobre este mapa, mais precisamente aplicar algoritmos de simplificação sobre ele.

Algoritmos de simplificação têm a função de reduzir a complexidade dos polígonos de um mapa, diminuindo sua complexidade. No caso de mapas que são uma partição completa do espaço e que estão armazenados em uma estrutura topológica implícita, como é o caso dos mapas estudados neste trabalho, o processo de simplificação acaba criando outros problemas que também precisam ser gerenciados num processo de simplificação, como é o caso da geração de inconsistências. As principais inconsistências geradas são a criação de polígonos com auto-intersecção, ou a criação de regiões sobrepostas ou de regiões sem informação.

Desta forma, foi proposta uma metodologia para se realizar a simplificação de mapas de cobertura originados a partir de imagens de Sensoriamento Remoto. Junto a esta metodologia, foram propostas adaptações a serem feitas em diferentes algoritmos de simplificação de forma que estes passassem a considerar a vizinhança no processo de simplificação. As adaptações visaram também adicionar um controle sobre as alterações de área nas classes do mapa que podem ocorrer nesse processo.

Para verificar o impacto das adaptações, um estudo de caso foi realizado baseando-se em três mapas extraídos do projeto PRODES, cada um contendo uma quantidade distinta de polígonos. Foram também implementados os algoritmos de simplificação de Douglas & Peucker e de Área Efetiva. Para cada um deles, foram implementadas duas versões, sendo a primeira da forma com que ele foi proposto no respectivo artigo e a segunda de forma a conter as adaptações propostas. Estes algoritmos foram usados então para simplificar cada um dos três mapas.

Apesar do aumento no tempo de processamento, as versões adaptadas dos algoritmos obtiveram sucesso em manter a consistência topológica do mapa simplificado, inclusive com mapas que continham grandes quantidades de polígonos, ao contrário das suas respectivas versões originais. Com relação ao controle de área, isso só pode ser notado na versão adaptada do algoritmo de Douglas & Peucker. A limitação do ponto de parada do algoritmo de Área Efetiva não permitiu que o controle de área pudesse ser analisado de forma efetiva.

Essas adaptações podem ser consideradas uma alternativa importante no processo de simplificação de mapas originados a partir de imagens de Sensoriamento Remoto. A partir de seu uso, foi possível gerar mapas topologicamente consistentes. Uma relação direta entre as adaptações e a minimização na alteração de área de cada uma das classes deve ser melhor avaliada, analisando o quanto o uso da área de influência impactou no resultado final das alterações de área.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Neste trabalho, um polígono que foi considerado incompatível com a escala ideal de um mapa foi agregado a um vizinho qualquer, deixando de existir. O uso de regras mais elaboradas para definir quais polígonos deverão ser removidos poderiam ser adicionadas aos algoritmos. Além da melhor definição dos polígonos que deverão ser removidos, uma estratégia mais elaborada para definir como será realizada agregação dos polígonos, assim como estudado por [Haurert e Wolff \(2010\)](#), poderia ser aplicada ao processo de simplificação proposto neste trabalho. Ele considera as classes dos polígonos e sugere estratégias para se realizar a agregação minimizando as alterações de área destas classes.

Com relação às adaptações, o uso dos vértices-âncora e de propagação da remoção dos vértices foram ambas baseadas na existência de uma partição completa do espaço no mapa, sendo sem regiões sobrepostas e sem regiões sem informação. Considerar a área de influência de cada polígono nestes casos ao invés de considerar a localização exata de cada vértice poderia permitir que outros tipos de mapas pudessem se beneficiar deste processo de simplificação, como é o caso dos mapas que não tiveram como origem os processos automatizados de processamento de imagens.

O processo de simplificação proposto neste trabalho resultou em uma perda de desempenho significativa com relação ao tempo de processamento. Implementações

mais eficientes com relação ao tempo de processamento poderiam fazer com que esta metodologia pudesse ser aplicada em outros contextos, como o dos servidores de mapas na internet, por exemplo.

Este processo de simplificação poderia ser investigado quanto ao seu uso na geração de mapas em diferentes escalas. Neste caso, a remoção de polígonos incompatíveis deve ser estudada em mais detalhes, pois uma diminuição na escala de trabalho fará com que um número muito maior de polígonos seja considerado incompatível com a escala e necessite ser agregado aos polígonos vizinhos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (ADA). **Amazônia Legal**. 2011. Disponível em: <<http://www.ada.gov.br>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2011. 21, 22
- BOGGIONE, G. d. A.; SILVA, M. V. A. d.; JUNIOR, N. R. d. C.; TELES, T. L.; NAZARENO, N. R. X. d. Definição da escala em imagens de sensoriamento remoto: uma abordagem alternativa. In: EPIPHANIO, J. C. N.; GALVÃO, L. S. (Ed.). **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2009. p. 1739–1746. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr\spacefactor\@m80/2008/11.18.03.28>>. Acesso em: 24 maio 2011. 20
- BROWN, D. G.; PIJANOWSKI, B. C.; DUH, J. D. Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the upper midwest, usa. **Journal of Environmental Management**, v. 59, n. 4, p. 247–263, 2000. 5
- CAMARA, G. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. A.; CAMARA, G.; DAVIS JUNIOR, C. A.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. (Ed.). **Bancos de dados geográficos**. Curitiba, PR: MundoGeo, 2005. p. 11–52. 490 p. 8, 9
- CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M. d.; FREITAS, U. M. d.; GARRIDO, J. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. **Computer and Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395–403, May - June 1996. ISSN 0097-8493. Acesso em: 24 maio 2011. 21, 22
- CAMARA, G.; VALERIANO, D. M.; SOARES, J. V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal**. INPE, 2006. 21
- CAMARA, G.; VINHAS, L.; FERREIRA, K. R.; QUEIROZ, G. R. d.; SOUZA, R. C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CARVALHO, M. T.; CASANOVA, M. A.; FREITAS, U. M. Terralib: An open source gis library for large-scale environmental and socio-economic applications. **G. Brent Hall; Michael G. Leahy. (Org.). Advances in Geographic Information Science - Open Source Approaches in Spatial Data Handling**. deblik, Berlin: Springer, 2008, p. 247–270, 2008. 22

CHOE, B. N.; KIM, Y. G. Framework and workflows for spatial database generalization. **Transactions in GIS**, Blackwell Publishing Ltd, v. 11, n. 1, p. 101–114, 2007. ISSN 1467-9671. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9671.2007.01035.x>>. 16

CIHLAR, J. Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 6, p. 1093–1114, 2000. 5

COUCLELIS, H. People manipulate objects (but cultivate fields): beyond the raster-vector debate in gis. In: FRANK, A. U.; CAMPARI, I.; FORMENTINI, U. (Ed.). **Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space**. Berlin: Springer, 1992. p. 65–77. 9

D'ALGE, J. C. L. **Generalização Cartográfica em Sistemas de Informação Geográfica: Aplicação aos Mapas da Vegetação da Amazônia Brasileira**. Universidade de São Paulo: PhD Thesis, Department of Geography, 2007. 16

DAVIS JUNIOR, C. A.; QUEIROZ, G. R. Algoritmos geométricos e relacionamentos topológicos. In: CASANOVA, M. A.; CÂMARA, G.; DAVIS JUNIOR, C. A.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. (Ed.). **Bancos de dados geográficos**. Curitiba, PR: MundoGeo, 2005. p. 43–83. 490 p. 9

DOUGLAS, D.; PEUCKER, T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. In: **The Canadian Cartographer**. [S.l.: s.n.], 1973. v. 10, p. 112–122. 16, 33

EGENHOFER, M.; FRANZOSA, R. Point-set topological spatial relations. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 5, n. 2, p. 161–174, 1991. 12

FALLS, C.; LIU, Y.; SNOEYINK, J.; SOUVAINE, D. Testing shortcuts to maintain simplicity in subdivision simplification. In: **Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG'05)**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 35–38. 19

FOERSTER, T.; MORALES, J.; STOTER, J. E. A classification of generalization operators formalised in ocl. In: **Proceedings of GI-days 2008**. [S.l.]: Munster, Germany: Ifgi Prints, 2008. p. 141–156. 16

FRANKLIN, J.; PHINN, S. R.; E., W. C.; ROGAN, J. Rationale and conceptual framework for classification approaches to assess forest resources and properties. In: WULDER, M. A.; FRANKLIN, S. E. (Ed.). **Remote sensing of forest environments: concepts and case studies**. Boston: Kluwer, 2003. p. 279–300. 7

GOODCHILD, M. F.; GUOQING, S.; SHIREN, Y. Development and test of an error for categorical data. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 6, n. 2, p. 87–104, 1992. 11

HAUNERT, J.; WOLFF, A. Area aggregation in map generalisation by mixed-integer programming. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 24, n. 12, p. 1871–1897, 2010. 54

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Sistema TerraAmazon**. 2011. Disponível em:

<<http://www.dpi.inpe.br/terraamazon>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2011. 22

JONES, C. B.; WARE, J. M. Map generalization in the web age. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 19, n. 8-9, p. 859–870, 2005.

Disponível em: <<http://users.cs.cf.ac.uk/C.B.Jones/JonesWare2005.pdf>>. 15

LI; ZHILIN. Digital Map Generalization at the Age of Enlightenment: a Review of the First Forty Years. **Cartographic Journal, The**, Maney Publishing, v. 44, n. 1, p. 80–93, fev. 2007. ISSN 0008-7041. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1179/000870407X173913>>. 15

MCMMASTER, R. B.; SHEA, S. K. Generalization in digital cartography.

**Washington: Assoc. of American Geographers**, 1992. 16, 17

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO NACIONAL CARTOGRÁFICA. **Decreto 89.816 - Especificações gerais e padronização para a elaboração das normas cartográficas brasileiras**. Brasília, 1984. 20

MULLER, J. The removal of spatial conflicts in line generalization. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 17, p. 141–149(9), April 1990.

Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/acsm/cagis/1990/00000017/00000002/art00001>>. 19

NEUN, M.; BURGHARDT, D.; WEIBEL, R. Automated processing for map generalization using web services. **GeoInformatica**, Springer Netherlands, v. 13, p. 425–452, 2009. ISSN 1384-6175. 10.1007/s10707-008-0054-3. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10707-008-0054-3>>. 16

NOVO, E. L. M. **Sensoriamento Remoto - princípios e aplicações - 2a edição**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2010. 328 p. 5

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM INC. **OpenGIS Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common architecture**. 2011. Disponível em: <<http://www.opengeospatial.com/>>. Acesso em: 27 Abril 2011. 14

ROGAN, J.; CHEN, D. Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. **Progress in Planning**, v. 61, p. 301–325, 2004. 5

SAALFELD, A. Topologically consistent line simplification with the douglas-peucker algorithm. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 26(1), p. 7–18, 1999. 19

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing models and methods for image processing - 3rd ed**. San Diego: Academic Press, 2007. 392 p. 7

SILVA, A. C. G. da; WU, S.-T. A robust strategy for handling linear features in topologically consistent polyline simplification. **Anais VIII Simpósio Brasileiro em Geoinformática, GEOINFO, São José dos Campos, SP, Brazil, 19-26 novembro 2006, INPE**, p. 19–33, 2006. 19

STEINIGER, S.; WEIBEL, R. Relations among map objects in cartographic generalization. In: **Cartography and Geographic Information Science**, 34 (3). [S.l.: s.n.], 2007. p. 175–197. 16

VISVALINGAM, M. Line generalisation by repeated elimination of points. **The Cartographic Journal**, v. 30, p. 46–51(6), 1993. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/maney/caj/1993/00000030/00000001/art00005>>. 17, 18, 33

WADE, T. G.; WICKHAM, J. D.; NASH, M. S.; NEALE, A. C.; RIITERS, K. H.; JONES, K. B. A comparison of vector and raster GIS methods for calculating landscape metrics used in environmental assessments.

**Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, n. 12, p. 1399–1405, 2003. 10

WILLIAMS, R. Preserving the area of regions. **Computer Graphics Forum**, v. 6, n. 1, p. 43–48, 1987. 19

WORBOYS, M.; DUCKHAM, M. **GIS a computing perspective - 2nd ed.** Boca Raton, Florida: CRC Press, 2004. 426 p. 8, 12, 13

ZHAN, F.; MARK, D. M. Conflict resolution in map generalization: a cognitive study. **In Proc. Auto-Carto**, v. 13, p. 406–413, 1993. 18



## 7 APÊNDICE A - QUESTÕES DE IMPLEMENTAÇÃO

Este apêndice comenta e detalha algumas questões de implementação, ilustrando as interfaces do *plugin* desenvolvido para a realização dos experimentos.

### 7.1 Detalhes de implementação

O armazenamento dos mapas vetoriais utilizados neste trabalho se baseou no modelo conceitual da biblioteca TerraLib, desenvolvida pelo INPE, sendo que ela foi utilizada como camada de acesso aos dados. Estes mapas vetoriais foram armazenados no Sistema Gerenciador de Bancos de Dados PostgreSQL, com o cartucho espacial PostGIS. Com relação à TerraLib, ela está implementada na linguagem C++ e, além da camada de acesso, define estruturas de dados, como índices espaciais, que foram utilizados neste trabalho para melhorar o desempenho do processo de simplificação.

#### 7.1.1 Processo de simplificação

Para modelar o processo de simplificação, foi desenvolvido um conjunto de classes para auxiliar a implementação dos algoritmos. Foi criada uma classe abstrata para representar um algoritmo de simplificação. Em seguida, ela foi estendida pelos algoritmos de Douglas & Peucker e de Área Efetiva. O diagrama de classes pode ser visto na Figura 7.1.

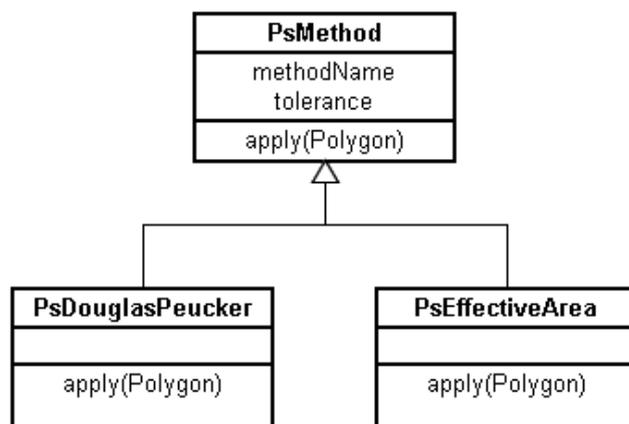


Figura 7.1 - Diagrama de classes.

A partir da classe abstrata que representa um algoritmo, o processo de simplifi-

cação como um todo pôde ser desenvolvido sem que houvesse a dependência de algum algoritmo específico. Desta forma, os métodos que realizam a consulta, pré-processamento e persistência se tornaram comuns e independentes dos algoritmos que foram implementados.

### **7.1.2 Divisão do mapa em regiões e consultas por bloco**

Conforme foi dito anteriormente, uma das preocupações deste trabalho foi com relação ao tratamento de mapas que continham um grande número de polígonos, como é o caso dos mapas de desflorestamento do projeto PRODES. Devido à quantidade de polígonos e de vértices, a memória física do computador pode não ser suficiente para armazenar todo esse dado. Desta forma, é necessário algum tipo de estratégia durante o processamento dos dados de forma que o mapa possa ser processado em blocos ou partes. Neste trabalho, a estratégia de particionamento do mapa se baseou no retângulo envolvente dos polígonos, onde para cada polígono foi criada uma região. Desta forma, em um primeiro momento, um mapa contendo  $n$  polígonos foi particionado em  $n$  blocos.

Buscando uma eficiência maior no processamento e buscando minimizar o acesso ao banco de dados, essas regiões foram ordenadas de acordo com o tamanho do retângulo envolvente referente a cada uma delas, de forma descendente. Assim, a região que fosse associada ao maior retângulo envolvente seria processada primeiramente, depois o segundo maior retângulo envolvente e assim por diante, até que todas as regiões tenham sido processadas. Quando é realizada uma consulta por região, na maioria dos casos, além do polígono associado à região, muitos outros polígonos cujos retângulos envolventes interceptem a região corrente também serão trazidos para a memória física. Este fato foi usado para melhorar a eficiência do processo como um todo.

Partindo do princípio que o mapa é uma subdivisão planar do espaço, como é o caso deste trabalho, é possível afirmar que se o retângulo envolvente de um polígono estiver dentro da região corrente, então necessariamente os retângulos envolventes de todos os seus polígonos vizinhos interceptarão esta região e, conseqüentemente, todos os polígonos vizinhos serão trazidos para a memória física. Desta forma, para cada região analisada, é possível processar um conjunto de polígonos e não apenas o polígono referente a região corrente. Este forma de processamento faz com que o tráfego de informações entre o banco de dados e a aplicação seja diminuído, bem

como permite que o pré-processamento de cada uma das regiões possa se tornar mais eficiente pois pode realizar os cálculos, como a detecção dos vértices-âncoras, para vários polígonos de uma só vez. Após um polígono ter sido simplificado, ele é marcado de forma que ele seja descartado caso ele seja novamente carregado para a memória.

### **7.1.3 Área de influência**

Conforme visto neste trabalho, a área de influência é uma área que é usada para delimitar a simplificação de um polígono. Seu processamento deve sempre se basear na versão original do polígono, ou seja, na sua versão que ainda não foi simplificada. Sendo assim, a solução escolhida por este trabalho foi a de tirar uma cópia do mapa de entrada antes de se iniciar o processo de simplificação. Desta forma, foi possível realizar o cálculo da área de influência original de cada polígono durante todo o processo de simplificação. A criação destas áreas de influências dos polígonos é realizada na etapa de pré-processamento, sendo que este processo ocorre para cada uma das regiões do particionamento que foi realizado no mapa.

### **7.1.4 Algoritmos**

Um detalhe específico do algoritmo de Área Efetiva é que ele necessita que um ponto de parada seja definido, caso contrário removerá todos os vértices do polígono até que só restem dois. Como não era objetivo deste trabalho fazer a implementação que removesse a maior quantidade possível de vértices do polígono, mas sim comparar impacto das adaptações propostas, foi definido um ponto de parada arbitrário, que permitisse a remoção de uma quantidade razoável de vértices. Este ponto de parada acabou limitando o poder de processamento do algoritmo, porém permitiu que uma comparação entre sua versão original e sua versão adaptada pudesse ser realizada. Ele ficou definido da seguinte forma: o algoritmo irá remover vértices até que a distância entre cada um deles seja maior que a tolerância usada. Desta forma, para cada vértice, não deverá existir nenhum outro vértice cuja distância entre os dois seja menor ou igual à tolerância.

Em determinadas situações, como no caso da existência de vértices-âncoras muito próximos uns aos outros ou polígonos que possuem as bordas que tem um formato parecido com o de uma ampulheta, pode acontecer de que, para que um determinado vértice seja removido, centenas de outros que deveriam permanecer tenham que ser

removidos antes. Desta forma, um segundo ponto de parada se fez necessário. Caso a área do triângulo formado entre três vértices consecutivos seja maior que a tolerância ao quadrado, este vértice não foi removido. Assim, caso uma iteração do algoritmo não resulte na remoção de nenhum vértice, este parará a sua execução. Por fim, caso um polígono ficasse com quatro pontos, o processo também seria finalizado.

## 7.2 Interface do *Plugin*

Um *plugin* pode ser entendido como um software que é acoplado à uma aplicação de forma a aumentar as suas funcionalidades. Desta forma, foi desenvolvido um *plugin* compatível com o sistema TerraView, desenvolvido pelo INPE, e a sua interface pode ser visualizada na figura 7.2. Seu objetivo foi o de permitir que os experimentos pudessem ser realizados de uma forma prática e rápida. Este *plugin* tem como parâmetros de entrada o mapa a ser simplificado, a escala ideal deste mapa, um booleano que indica se a metodologia proposta deve ser usada e qual o algoritmo que será usado para realizar a simplificação.

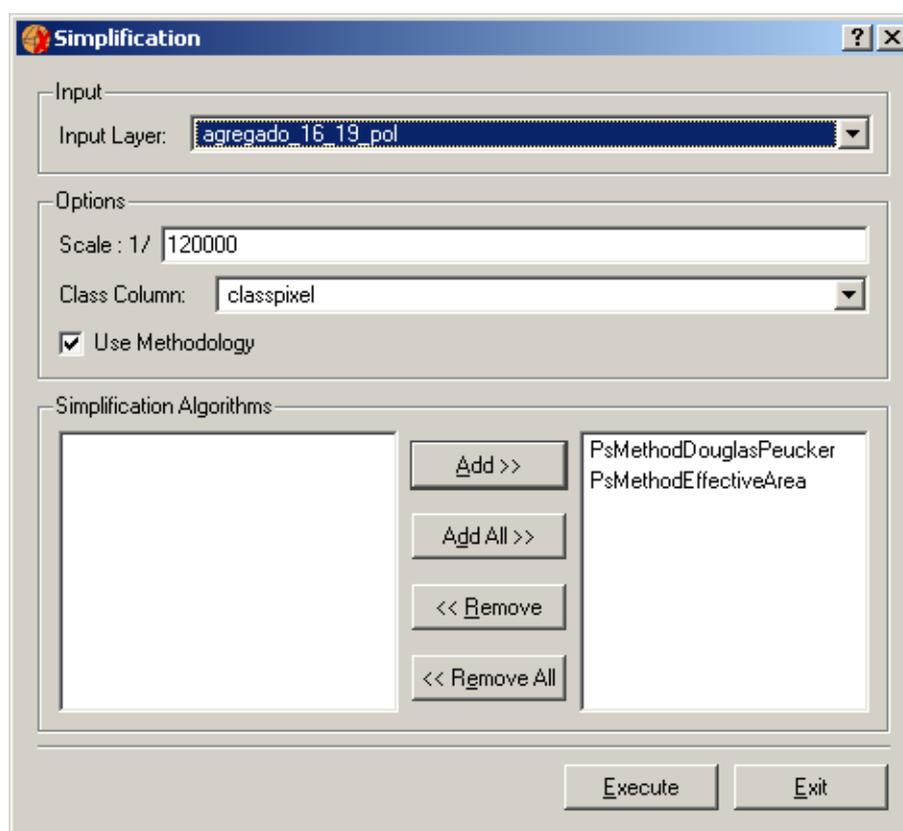


Figura 7.2 - Tela do plugin de simplificação, desenvolvido neste trabalho.

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.