

**Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais**

Alfredo Costa

**EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO E
FRAGMENTAÇÃO DA PAISAGEM NA SERRA DO
GANDARELA (MG): ANÁLISE A PARTIR DE
MÉTRICAS DE PAISAGEM**

Belo Horizonte

2012

Alfredo Costa

EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO E
FRAGMENTAÇÃO DA PAISAGEM NA SERRA DO
GANDARELA (MG): ANÁLISE A PARTIR DE
MÉTRICAS DE PAISAGEM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Análise e Modelagem de
Sistemas Ambientais Universidade Federal de
Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de mestre em Análise e
Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Allaoua Saadi

Co-orientador: Ricardo Alexandrino Garcia

Belo Horizonte

Instituto de Geociências da UFMG

2012

C837e Costa, Alfredo.
2012 Evolução uso e cobertura do solo e fragmentação da paisagem na Serra do Gandarela (MG) [manuscrito] : análise a partir de métricas de paisagem / Alfredo Costa – 2012.
xiv, 96 f.: il.(color.)

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2012.

Orientador: Allaoua Saadi.

Co-Orientador: Ricardo Alexandrino Garcia.

Bibliografia: f. 87-95.

Inclui anexos.

1. Serra do Gandarela (MG) – Teses. 2. Preservação ambiental – Teses. 3. Degradação ambiental – Teses. 4. Solo – Uso – Teses. I. Saadi, Allaoua. II. Garcia, Ricardo Alexandrino. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 502.65

Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Dr. Allaoua Saadi

Orientador
IGC-UFMG, BH

Dr. Ricardo Alexandrino Garcia

Co-orientador
IGC-UFMG, BH

Dr. José Eustáquio Machado de Paiva

Membro da Banca
EA-UFMG, BH

Dr. Ralfo Edmundo da Silva Matos

Membro da Banca - convidado
IGC-UFMG, BH

Dr. Douglas Sathler dos Reis

Membro da Banca - convidado
Depto. de Geografia - UFVJM, BH

Candidato:

Belo Horizonte, 29 de março de 2012.

V: [Evey pulls out her mace] I can assure you I mean you no harm.

Evey Hammond: Who are you?

V: Who? Who is but the form following the function of what and what I am is a man in a mask.

Evey Hammond: Well I can see that.

V: Of course you can. I'm not questioning your powers of observation I'm merely remarking upon the paradox of asking a masked man who he is.

Evey Hammond: Oh. Right.

V: But on this most auspicious of nights, permit me then, in lieu of the more commonplace sobriquet, to suggest the character of this dramatis persona.

V: Voilà! In view, a humble vaudevillian veteran, cast vicariously as both victim and villain by the vicissitudes of Fate. This visage, no mere veneer of vanity, is a vestige of the vox populi, now vacant, vanished. However, this valorous visitation of a by-gone vexation, stands vivified and has vowed to vanquish these venal and virulent vermin van-guarding vice and vouchsafing the violently vicious and voracious violation of volition.

[carves V into poster on wall]

V: The only verdict is vengeance; a vendetta, held as a votive, not in vain, for the value and veracity of such shall one day vindicate the vigilant and the virtuous.

[giggles]

V: Verily, this vichyssoise of verbiage veers most verbose, so let me simply add that it's my very good honor to meet you and you may call me V.

Evey Hammond: Are you like a crazy person?

V: I am quite sure they will say so. But to whom, might I ask, am I speaking with?

(V for Vendetta)

Dedico esta pesquisa a todos que têm um sonho, uma ideia e um segredo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, pela oportunidade de aprendizado, crescimento pessoal e acadêmico, e pelas amizades que conquistei.

Ao meu pai José, que até perdido comigo em campo ficou (mas sem perder o bom humor!).

À minha família, que custou, mas se acostumou com esse meu lado geográfico de olhar para o mundo, e até têm achado interessante.

Aos meus grandes amigos Aline e Paulinho, pais *ad hoc* que tive nesta empreitada.

Ao Professor Allaoua pela confiança depositada, e ao Professor Ricardo pela amizade, sobretudo, e pelas críticas.

Ao Paulo Rossi, pelo apoio no entendimento da geologia e da geomorfologia da Serra do Gandarela. Ao Rodrigo Ribas, pela luz que me deu (e que revolucionou o trabalho), e ao João Porteirinha, pelo inestimável apoio na execução do mapeamento À Regina Maia, pela disposição, paciência e apoio à leitura da paisagem mapeada. Ao Thiago Mansur e ao Bráulio Magalhães, pelo apoio na análise das métricas de paisagem e da realidade da área de estudo. Ao Matheus *Mad*, pelo apoio na formatação e pelos palpites mais que oportunos.

À Regina Célia, Chris, Chico, Clarice, Café, Tininha, Mariâna, Pugs, Emerson, Ana, Medina, Justine, Rodrigo Leitão, Lilian, enfim, aos amigos da Amplo que me apoiaram, vocês não sabem como isso foi importante.

Aos Professores e amigos Ralfo, Taquinho e Douglas, pela disponibilidade, disposição, e solidariedade ao participar da banca avaliadora e contribuir significativamente para o projeto.

Aos amigos Brenner e Miguel pelo apoio, e principalmente porque eu queria que eles aparecessem aqui. Da mesma maneira, agradeço ao Larry Page e Sergey Brin, que não me conhecem, mas que potencializaram a eficiência da revisão realizada.

À galera Sinclinal e Acaba Trappo! Pela paciência e compreensão pelo sumiço.

E principalmente à Natália, pelo carinho, apoio, compreensão e companheirismo, principalmente nos fins-de-semana e dias santos, que comemoramos a frente do computador.

RESUMO

Este trabalho dedica-se a analisar as transformações recentes do uso e cobertura do solo e da configuração da paisagem da Serra do Gandarela, resultante das atividades antrópicas desenvolvidas na região, com objetivo de identificar e descrever os agentes que motivaram estas transformações e a fragmentação da sua paisagem. A Serra do Gandarela configura-se como um espaço de conflito de interesses, que agrega empenhos econômicos das indústrias mineradora e siderúrgica - expressados pelas culturas industriais de eucalipto e pelas minas existentes na região, como Brucutu e Gongo Soco - além de empenhos ambientais, já que abriga áreas indicadas como prioritárias à preservação da biodiversidade. Os diferentes usos reconhecidos na área, decorrentes da intensificação das atividades econômicas ali desenvolvidas, aliados à ausência de mecanismos eficientes de proteção ambiental, tem resultado em paulatina fragmentação da região da Serra do Gandarela, configurando-se em ameaça aos remanescentes florestais e campestres e, conseqüentemente, à biodiversidade e disponibilidade hídrica. Através de imagens de sensores remotos, bases cartográficas digitais, bases de dados secundárias, aplicação de métricas de paisagem, softwares e material de campo, é realizada a análise da evolução do uso do solo e da fragmentação da paisagem para quatro períodos (1987, 1994, 2003 e 2010). As motivações sociais e econômicas responsáveis pelas alterações observadas também são consideradas, levantadas através de revisão bibliográfica e de visitas técnicas à área de estudo, que permitiram a identificação de oito padrões de mosaicos paisagísticos distribuídos entre dezessete unidades de paisagem. O estudo foi capaz de demonstrar uma séria tendência à degradação dos ambientes naturais da Serra do Gandarela, seja pelas práticas agropastoris, pelo avanço da silvicultura, pela intensificação da urbanização, ou pelo crescente interesse da mineração na área. As concessões de lavra mapeadas na região revelam a intenção de exploração mineral em áreas campestres preservadas em curto prazo, bem como as práticas de cultivo e silvicultura, que avançam sobre os remanescentes florestais devem ser observadas de perto, pois estão menos sujeitas a regulamentação do Estado e também representam um risco à biodiversidade e à qualidade dos solos da região. Cabe aos órgãos ambientais brasileiros e à sociedade avaliar se os interesses econômicos destas atividades devem se sobrepor aos interesses ambientais, de conservação da biodiversidade ali existente. O ritmo de crescimento observado destas atividades na região não deve servir de incentivo à sua expansão, mas sim como incentivo à reflexão da validade deste tipo de exploração que, apesar do retorno financeiro aos municípios

e ao Estado Brasileiro, significam um legado de degradação e destruição de uma das paisagens mais belas do país.

Palavras-chave: Serra do Gandarela, análise da paisagem, métricas de paisagem, fragmentação da paisagem, uso e cobertura do solo.

ABSTRACT

This work is dedicated to analyze recent changes in land cover and use of the landscape of the Sierra Gandarela - and its landscape configuration - resulting from human activities developed in the region, aiming to identify and describe the agents that motivated these changes and its fragmentation. The region is characterized as an area of conflict of interest, which combines economic endeavors of the mining and steel industries - expressed by industrial crops of eucalyptus and mine in the region, as Brucutú and Gongo Soco - and environmental commitments, as maintains areas indicated as priority for biodiversity conservation. The different uses recognized in the area, resulting from the intensification of economic activities developed there, coupled with the absence of efficient mechanisms for environmental protection, has resulted in the gradual fragmentation of the region Gandarela Syncline, becoming a threat to the remaining forest and grassland, and consequently, to the biodiversity and the water availability. Through remote sensing images, digital cartographic databases, secondary databases, landscape metrics, software and field materials, the analysis is conducted based on the evolution of land use and landscape fragmentation for four periods (1987, 1994, 2003 and 2010). The social and economic motivations responsible for the observed changes are also considered, raised through literature review and technical visits to the study area, which allowed the identification of eight mosaic patterns distributed among seventeen landscape units. The exercise performed was able to demonstrate a tendency to serious degradation of natural environments of the Gandarela Sierra either by agropastoral practices, for the advancement of forestry, for the urbanizing process, or the growing interest in the mining area. The mining concessions mapped in the region reveal the intention of mineral exploitation in grassland sites preserved in the short term as well as farming and forestry practices, that are encroaching on the forest remnants, should be watched closely because they are less subject to state regulation and also pose a risk to biodiversity and soil quality in the region. It is up to the Brazilian environmental agencies and society to assess whether the economic interests of these activities should override environmental concerns, of the conservation of biodiversity that exists there. The rhythm of growth seen in such activities in the region should not serve to encourage their expansion, but rather as an incentive to reflect on the validity of this type of operation which, despite the financial return to municipalities and to the State, means a legacy of degradation and destruction one of the most beautiful landscapes in the country.

Key-words: Serra do Gandarela, landscape analysis, landscape metrics, landscape fragmentation, landcover analysis.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Metodologia.....	4
2.1 Materiais	4
2.2 Métodos	5
3. Revisão Bibliográfica.....	9
3.1 Mapeamento do Uso do Solo Através de Processamento Digital de Imagens e Sensoriamento Remoto.....	9
3.2 Ecologia da Paisagem	11
3.2.1 Definição	11
3.2.2 Histórico	11
3.2.3 Aspectos Estruturantes da Paisagem	13
4. A Serra do Gandarela: caracterização da área de estudo	18
4.1 Delimitação Da Área De Estudo.....	18
4.2 Geologia e Geomorfologia.....	23
4.3 Cobertura Vegetal e Áreas de Proteção Ambiental	28
4.4 Mineração	32
4.5 Ocupação	38
5. Evolução do uso e cobertura do solo na Serra do Gandarela.....	44
5.1 Breve Panorama da Evolução do Uso do Solo na Serra do Gandarela.....	44
5.2 Uso e Cobertura do Solo na Serra do Gandarela: Análise por Tema Mapeado.....	51

5.3	Uso e Cobertura do Solo na Serra do Gandarela: Análise a Partir de Índices Estruturais da Paisagem.....	59
5.4	Fatores Impulsionadores da Evolução do Uso e Cobertura do Solo na Serra do Gandarela.....	68
5.5	Identificação de Unidades de Paisagem na Serra do Gandarela.....	74
6.	Considerações finais	78
7.	Referências Bibliográficas	80
8.	Anexos.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma da metodologia utilizada.....	5
Figura 4.1: Localização da área de estudo.....	19
Figura 4.2: Hidrografia da área de estudo	20
Figura 4.3: Declividade na área de estudo.....	21
Figura 4.4: Tetos orográficos da área de estudo.....	22
Figura 4.5 - Geologia e perfil esquemático da Serra do Gandarela. Fonte: Oliveira <i>et al.</i> (2005)	25
Figura 4.6 - Unidades geomorfológicas da região da Serra do Gandarela. Fonte: Silva <i>et al.</i> (2009)	27
Figura 4.7: Matas do bioma mata atlântica na área de estudo.....	30
Figura 4.8: Unidades de conservação e áreas de preservação permanente (APP) na área de estudo.....	31
Figura 4.9: Processos DNPM na área de estudo por substância e responsável pelo processo até 06 de novembro de 2011.	34
Figura 4.10: Processos DNPM em fase de concessão de lavra na área de estudo até 06 de novembro de 2011.	37
Figura 4.11: Principais localidades e acessos inseridos na área de estudo.....	41
Figura 4.12: População total por setores censitários da área de estudo, ano 2000.....	42
Figura 4.13: População total por setores censitários da área de estudo, ano 2010.....	43
Figura 5.1: Evolução do uso e cobertura do solo em percentagem da área ocupada.	46
Figura 5.2: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 1987.	47
Figura 5.3: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 1994.	48

Figura 5.4: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 2003.	49
Figura 5.5: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 2010.	50
Figura 5.6: Evolução do índice "número de manchas" ao nível da classe de uso do solo e ao nível da área de estudo (1987 – 2010).....	60
Figura 5.7: “Dimensão média das manchas” de cada classe de uso do solo (ha) e ao nível da área de estudo (1987 – 2010).....	62
Figura 5.8: Evolução do índice “desvio padrão da dimensão das manchas” ao nível da paisagem (1987 – 2010)	63
Figura 5.9: “Total de bordas” de cada classe de uso do solo (metros) (1987 – 2010).	65
Figura 5.10: “Índice médio de forma” para cada classe de uso do solo e ao nível da área de estudo (1987 – 2010).....	67
Figura 5.11: Unidades de paisagem e mosaicos na área de estudo.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Remanescentes Florestais do Bioma Mata Atlântica (2008).....	29
Tabela 4.2: Processos Minerários por Proprietário na Área de Estudo	33
Tabela 4.3: Processos Minerários por Substâncias Requeridas na Área de Estudo	33
Tabela 4.4: Cronologia dos Processos Minerários na Área de Estudo	35
Tabela 4.5: Processos Minerários por Fase do Processo na Área de Estudo.....	36
Tabela 4.6: Número de Concessões de Lavra na Área de Estudo	38
Tabela 5.1: Evolução do uso e cobertura do solo em valores absolutos.	45
Tabela 5.2: Taxas de crescimento do uso e cobertura do solo no período analisado.	46
Tabela 5.3: Taxas de substituição do uso e cobertura do solo no período 1987 a 1994.....	57
Tabela 5.4: Taxas de substituição do uso e cobertura do solo no período 1994 a 2003.....	57
Tabela 5.5: Taxas de substituição do uso e cobertura do solo no período 2003 a 2010.....	58

LISTA DE FOTOS

Foto 1: Campo - Vegetação Rupestre sobre Canga.....	52
Foto 2: Floresta - Vista para Área de Florestas na porção central da área de estudo.....	52
Foto 3: Campo - Área de Campo Rupestre no Topo da Serra do Gandarela.....	52
Foto 4: Floresta - Área de cultivo no primeiro plano e florestas no segundo plano.....	52
Foto 5: Corpo Hídrico - Lagoa nas Proximidades da Mineração Extramil.....	54
Foto 6: Cultivo - Áreas de cultivo em André do Mato Dentro.....	54
Foto 7: Cultivo - Área de pastagem na porção norte da área de estudo.....	54
Foto 8: Cultivo - Cultura de subsistência no povoado de Cruz dos Peixotos.....	54
Foto 9: Área Habitada - Vista de Barão de Cocais.....	55
Foto 10: Área Habitada - Vista de Barão de Cocais.....	55
Foto 11: Área Habitada e Reflorestamento- Carvoaria em André do Mato Dentro.....	55
Foto 12: Área Habitada - Casa de apicultor em André do Mato Dentro.....	55
Foto 13: Reflorestamento - Reflorestamento as margens do acesso para a mineração MSOL	56
Foto 14: Reflorestamento - Áreas de depósito de corte de reflorestamento.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Síntese dos conceitos utilizados na análise da ecologia da paisagem (baseado em Naveh & Liebermann (1989), Soares-Filho (1998), Metzger (2001) e Guimarães (2004)). ...	13
Quadro 3.2: Principais métricas de paisagem (adaptado de Hoechstetter <i>et al.</i> (2008), Lourenço (2009) e Lucas (2011))......	16

1. INTRODUÇÃO

A região do Quadrilátero Ferrífero¹, localizada no estado de Minas Gerais (Brasil), sofreu grandes transformações nos últimos três séculos, motivadas inicialmente exploração aurífera na região e, conseqüentemente, à urbanização e ruralização do espaço natural como suporte à atividade mineradora então estabelecida. Ao longo do tempo, a expansão territorial humana neste espaço se tornou cada vez mais expressiva, configurando-se em cidades dos mais diversos portes, e em atividades econômicas transformadoras do espaço natural, tais como a mineração, a silvicultura e a agropecuária. Entretanto, a despeito do que se pode observar na atualidade, ainda restam neste espaço algumas áreas preservadas, que se configuram como os últimos refúgios de uma geodiversidade e biodiversidade únicas, como é o caso do Sinclinal Gandarela, objeto deste estudo.

A área delimitada para o estudo do Sinclinal Gandarela localiza-se na porção nordeste Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 43°39'55"W 20°09'38"S e 43°21'17"W 19°50'25"S, possui extensão territorial de 45.816,3 hectares e população de 34.997 habitantes² (IBGE, 2010). Compreende parte dos municípios de Caeté, Barão de Cocais, São Gonçalo do Rio Abaixo, Santa Bárbara, Itabirito e Rio Acima.

A região configura-se como um espaço de conflito de interesses, que agrega empenhos econômicos das indústrias mineradora e siderúrgica - expressados pelas culturas industriais de eucalipto e pelas minas existentes na região, como Brucutu e Gongo Soco - além de empenhos ambientais, já que abriga áreas indicadas como prioritárias à preservação da biodiversidade (MMA, 2008), além de 20.892 hectares de mata atlântica, o que representa 12,3% de toda a mata atlântica remanescente no Quadrilátero Ferrífero e 0,79% da mata atlântica remanescente em Minas Gerais (INPE, 2009). Vale ressaltar a presença de povoados nesta região, em que boa parte da população dedica-se à agropecuária e à apicultura; e que em

¹ Em 1881, Luiz Felipe Gonzaga Campos, formado pela Escola de Minas, fez um levantamento das reservas ferríferas da região central de Minas Gerais, e em razão dos depósitos de minério de ferro identificados em uma área cujos vértices são as cidades de Itabira, a nordeste, Mariana, a sudeste, Congonhas, a sudoeste, e Itaúna, a noroeste, contendo, além da então Capital do Estado Vila Rica, várias cidades originadas da atividade minerária, entre elas Sabará, Santa Bárbara, Itabirito e Ouro Preto, a denominou de quadrilátero ferrífero (DORR, 1969).

² Soma das populações dos setores censitários interceptados pela área de estudo.

sua porção nordeste está a sede urbana de Barão de Cocais, que concentra 67% da população da área de estudo (IBGE, 2010).

Os diferentes usos reconhecidos na área, decorrentes da intensificação das atividades econômicas ali desenvolvidas, aliados à ausência de mecanismos eficientes de proteção ambiental, tem resultado em paulatina fragmentação da região do Sinclinal Gandarela, configurando-se em ameaça aos remanescentes florestais e campestres e, conseqüentemente, à disponibilidade hídrica.

Assim, este estudo tem por objetivo investigar os fenômenos que influenciaram e influenciam as transformações de uso e cobertura do solo na Região do Sinclinal Gandarela, com ênfase nas alterações geográficas e econômicas decorrentes da prática da silvicultura e da mineração na região, além dos desdobramentos dos processos expansão das áreas urbanas e rurais neste espaço.

Neste sentido, é realizada a análise da evolução do uso do solo e da fragmentação da paisagem - considerando sua estrutura e dinâmica - a partir de técnicas de sensoriamento remoto e métricas de ecologia da paisagem considerando-se quatro períodos (1987, 1994, 2003 e 2010). As motivações sociais e econômicas responsáveis pelas alterações observadas também são consideradas, levantadas através de revisão bibliográfica e de visitas técnicas à área de estudo.

Conforme exposto, esta pesquisa adota como arcabouço teórico de análise a ecologia da paisagem, conceito proposto pelo alemão Carl Troll em 1939, cujas principais características estão associadas ao relacionamento entre processos, escalas e padrões ambientais de uma determinada região, e que permitem, entre outros, estudar a dinâmica do uso e ocupação do solo, a identificação de fluxos ecológicos nos mosaicos de paisagem, incluindo a relação do padrão paisagístico com os processos ecológicos, além de permitir identificar possibilidades para conservação da paisagem (SOARES-FILHO, 1998; METZGER, 2001, GUIMARÃES, 2004).

Deste modo, a primeira parte deste estudo se dedica a apresentar a metodologia adotada para a realização do estudo. São apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, em que se incluem principalmente elementos de sensoriamento remoto, de processamento digital de imagens e de geoprocessamento - utilizados no mapeamento do uso

do solo - além das técnicas de coleta de campo e de dados secundários, que servem de apoio à interpretação dos mesmos.

Já a segunda parte trás uma revisão bibliográfica a respeito dos conceitos de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens aplicado ao mapeamento de uso e cobertura do solo. Além disso, a revisão discorre sobre os conceitos da ecologia e fragmentação da paisagem, e apresenta um breve histórico da evolução dos seus preceitos, além da definição de seus principais elementos, que é a base a partir da qual a discussão dos resultados alcançados para a área de estudo.

A terceira parte apresenta caracterização da área de estudo através de seus aspectos físicos e socioeconômicos, com ênfase nos seus principais usos e potenciais usos - com especial destaque à mineração e ao plantio de eucalipto, - e os resultados do mapeamento de uso do solo nos períodos selecionados. Além disso, trás da análise da fragmentação da paisagem na região do Gandarela, e os resultados da investigação sobre os fenômenos que pautaram as transformações observadas na área de estudo e, ao final, o mapeamento das unidades de paisagem identificadas na Serra do Gandarela.

A quarta e última parte apresenta as considerações finais do estudo, em que se faz a síntese de todos os aspectos levantados e discutidos com vistas a evidenciar os agentes e processos transformadores da área de estudo e propõem-se alternativas para incrementar ou frear os mais relevantes com vistas ao manejo sustentável deste território.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho subdividem-se em imagens de sensores remotos, bases cartográficas digitais, bases de dados secundárias, softwares e material de campo.

As imagens de sensores remotos foram utilizadas para o mapeamento do uso e cobertura do solo e para mapeamento da hipsometria e declividade da área de estudo. Para o mapeamento do uso e cobertura do solo utilizou-se quatro imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, cena da órbita ponto 218/074, anos 1987, 1994, 2003 e 2010, de 17/07/1987, 05/08/1994, 27/06/2003 e 01/08/2010. Estas imagens foram escolhidas por permitirem a análise temporal mais abrangente com imagens do mesmo sensor, além de serem disponibilizadas gratuitamente pelo sítio do INPE. Já para o mapeamento da hipsometria e declividade da área de estudo, foi utilizada uma imagem do radar SRTM, carta SE-23-Z-C para o ano de 2005, obtida gratuitamente no sítio da EMBRAPA, com resolução de 90 metros.

As bases cartográficas utilizadas são provenientes de fontes distintas. Os limites federais e estaduais e censitários são de autoria do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); os limites municipais, a hidrografia e a localização dos povoados são de autoria do Instituto de Geociências Aplicadas de Minas Gerais (IGA); o mapeamento dos processos minerários é de autoria do Departamento Nacional de Pesquisas Minerárias (DNPM); o mapeamento dos remanescentes florestais do bioma mata atlântica é proveniente do programa SOS Mata Atlântica, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); o limite das unidades de conservação é de autoria do Ministério de Meio Ambiente (MMA); e o mapeamento dos acessos presentes na área de estudo é proveniente do Departamento de Estradas de Rodagem (DER-MG). Estas bases cartográficas podem ser obtidas gratuitamente nos sítios dos respectivos autores. As demais bases cartográficas foram geradas ao longo deste trabalho.

Os dados secundários utilizados são provenientes de pesquisas do IBGE, tais como a Pesquisa Agropecuária Municipal, o Censo Populacional 2010 e a Produção da Extração Vegetal e Silvicultura, disponíveis gratuitamente no sítio do IBGE.

Os softwares utilizados foram o ENVI 4.5 para processamento dos dados de sensoriamento remoto, o ArcGIS 10 para processamento das bases cartográficas, o V-LATE 2.0 beta para

geração das métricas de paisagem, o Microsoft Excel 2007 para processamento dos dados secundários, e o GPS Track Maker 13.8 para processamento dos dados de campo.

Por fim, como material de campo foi utilizado o receptor GPS Garmin Oregon 550 e a câmera Olympus E-510 para registro fotográfico.

2.2 Métodos

A metodologia adotada neste estudo segue basicamente nove passos, como pode ser visualizado na Figura 2.1, e apoia-se em toda discussão realizada no capítulo um.

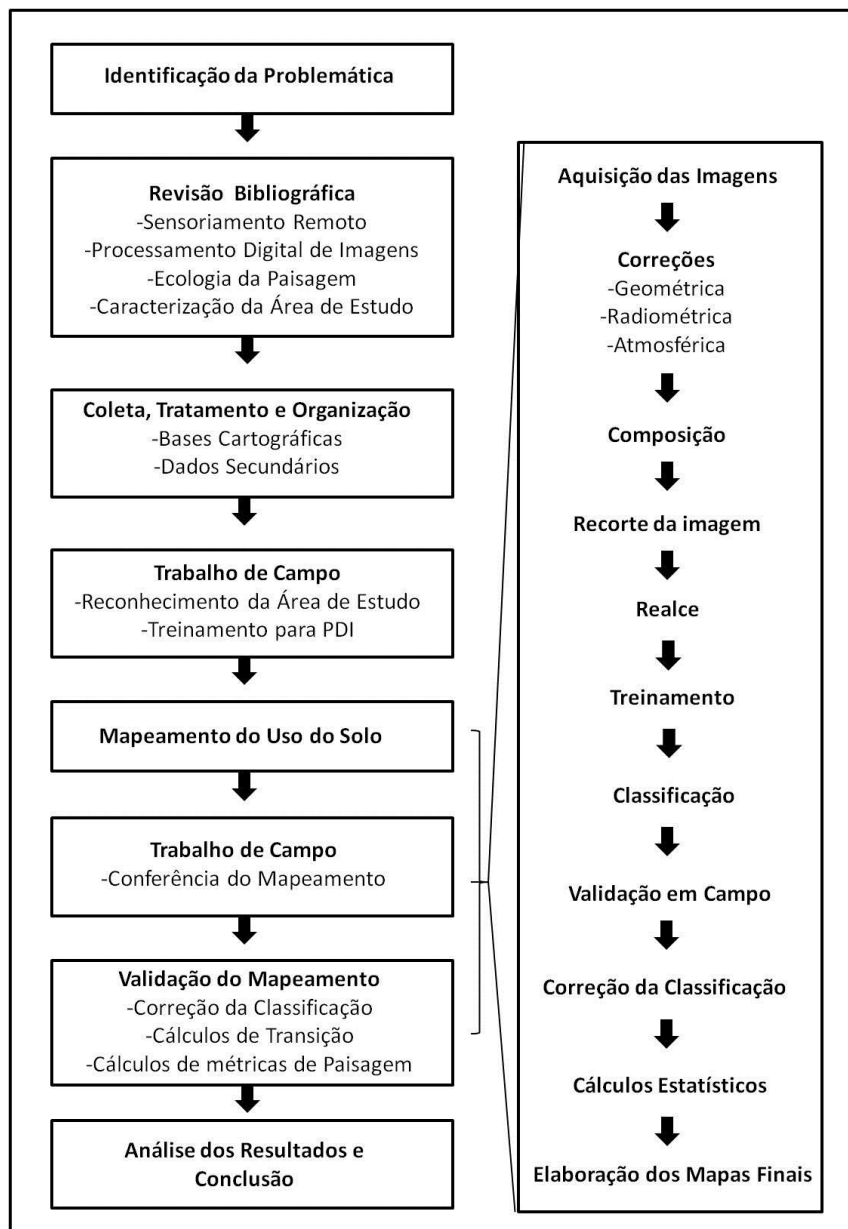


Figura 2.1: Fluxograma da metodologia utilizada

O primeiro passo foi identificar a problemática, já apresentada na introdução, que é de se identificar as origens da transformação do uso e cobertura do solo na região do Sinclinal Gandarela. Assim, o segundo passo foi a realização de uma revisão bibliográfica acerca dos conceitos utilizados para amparar esta discussão, a saber, técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens; aspectos da ecologia da paisagem, apresentados no capítulo um; e uma revisão acerca dos estudos já realizados na área de estudo, que forneceram substrato para sua caracterização, além de informações fundamentais para o entendimento das transformações observadas na área de estudo, apresentadas no capítulo 3. Paralelamente à revisão, foi realizada a coleta, organização e processamento dos dados secundários e bases cartográficas digitais, que permitiram uma discussão mais ampla acerca das informações obtidas na revisão bibliográfica.

A partir da revisão bibliográfica sobre as técnicas de mapeamento e da primeira aproximação sobre a caracterização da área de estudo, foi realizado o primeiro trabalho de campo, em maio de 2011, com os objetivos de fazer o reconhecimento da área de estudo, que permitiu complementar sua caracterização, e também de realizar o treinamento para classificação do uso do solo.

De posse das informações sobre as técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens, além da caracterização da área de estudo e dos pontos de treinamento, foi realizado o mapeamento do uso do solo. A partir da seleção e download das imagens Landsat utilizadas, foi realizado o pré-processamento.

O pré-processamento foi realizado em ambiente ENVI 4.5. A análise das imagens, em formato geotiff, revelou que a correção radiométrica não era necessária. Deste modo, foi realizada a correção geométrica a partir do modelo polinomial, que utilizou como base de referência o mapeamento hidrográfico disponibilizado pelo IGA, escala 1:50.000. Feita a correção geométrica, fez-se a correção atmosférica baseada no modelo de correção pelo pixel escuro, em que os objetos com menor resposta espectral são selecionados em cada banda, e o valor médio de seus pixels é subtraído de todos os pixels da banda.

A partir das imagens pré-processadas, foi realizado o realce das bandas, a partir do método de ajuste linear de contraste. A etapa seguinte foi a composição das imagens para cada data analisada. A composição foi feita em ambiente ArcGIS 10, que permite a composição de uma imagem com oito bandas. Embora a composição colorida seja possível com apenas três

bandas, a classificação pode ser feita com qualquer número de bandas. Tratando-se a classificação de um tipo de análise multifatorial, o quanto maior o número de informações por pixel, melhor a sua diferenciação em relação aos demais. Neste trabalho, são utilizadas todas as bandas Landsat TM, sendo que a banda 6 foi automaticamente reamostrada para que seus pixels tivessem o mesmo tamanho daqueles das demais bandas, ou seja, trinta metros. Ainda em ambiente ArcGIS 10, as imagens foram cortadas segundo a área de estudo. Isto foi feito com o objetivo de facilitar seu processamento e otimizar a classificação, já que o treinamento foi realizado apenas na área de estudo.

De volta ao ambiente ENVI 4.5, foram inseridas as imagens processadas, nas quais foram introduzidos os pontos obtidos no treinamento, sendo que pelo menos vinte pontos de treinamento foram utilizados para cada classes³ utilizadas foram:

- Água: cursos d'água, lagoas, represas.
- Floresta: florestas, matas ciliares, matas-galerias, capões de mata e cerradões.
- Reflorestamento: Eucaliptais.
- Área antrópica: áreas urbanas, distritos, estradas, construções, solos antropofizados.
- Mineração: áreas de mineração, cavas.
- Cultivo: pastos artificiais, áreas de agricultura.
- Campo: campos, campos sujo, campos limpo, campo rupestre.

Realizados os treinamentos para cada uma das imagens, aplicou-se o classificador MAXVER com limite de decisão de cem por cento, ou seja, todos os pixels foram classificados. Optou-se por este limite de decisão pela antevisão de que a classificação seria corrigida após a conferência de campo.

Em posse dos mapas classificados, foi realizado em outubro de 2011 um segundo trabalho de campo, com objetivo de checar os resultados do mapeamento. Através da utilização de um receptor GPS conectado a um computador portátil, foi feita a navegação em tempo real, por meio do software GPS TrackMaker, em que a imagem classificada serviu de pano de fundo à navegação. Deste modo, foi possível verificar com precisão o mapeamento.

³ O registro fotográfico das classes selecionadas pode ser visto no anexo 1.

Esta verificação permitiu que ajustes no mapeamento fossem realizados, tendo como exemplos marcantes as matas em regeneração, que foram confundidas pelo modelo de classificação com plantações de eucalipto; e as áreas de formação savânica de transição entre campos rupestres e florestas, que possuem resposta espectral semelhante à das áreas de pastagem. A correção foi realizada em ambiente ArcGIS 10, em que as imagens classificadas em formato geotiff foram transformadas em arquivos de formato vetorial (*shapefile*).

A partir das imagens corrigidas e validadas, foram realizados os cálculos de área de maneira automática, ainda em ambiente ArcGIS 10. Da mesma maneira, as classificações foram confrontadas com o objetivo de identificar as áreas de transição de uso e cobertura. Em um segundo momento, foram realizados cálculos relativos às áreas e perímetros dos fragmentos classificados, através da extensão V-LATE 2.0 beta. Por fim, os resultados foram tabulados e mapeados e, a partir do mapeamento do uso e cobertura do solo para o ano de 1987, foram delimitadas unidades de paisagem a partir da observação do padrão dos mosaicos de uso e cobertura do solo na área de estudo.

O exercício final desta metodologia foi o de investigar os agentes econômicos regionais que influenciaram as transformações de uso e ocupação do solo na Região do Sinclinal Gandarela partir da bibliografia pesquisada, do mapeamento e dos dados obtidos em laboratório e campo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mapeamento do Uso do Solo Através de Processamento Digital de Imagens e Sensoriamento Remoto

O homem é historicamente um grande modificador da superfície terrestre, e ao longo de sua evolução potencializou sua capacidade de provocar mudanças significativas no ambiente (SPINOLA *et al.*, 2009), tornando-se cada vez mais participativo no processo de alteração do uso e cobertura do solo como parte de sua expressão espacial de reprodução social (JESUS, 2010). De fato, as investigações mais recentes sobre as dimensões humanas das transformações globais demonstram de maneira clara que as incertezas sociais predominam as incertezas biofísicas em seu impacto sobre os futuros cenários ambientais, o que revela a patente necessidade de aprimorar os conhecimentos sobre os mecanismos de retroalimentação que relacionam os padrões ambientais com os processos sociais (NAGENDRA *et al.*, 2004).

A expressão "uso e cobertura do solo" possui conceito híbrido, fundamentado nos três termos que a compõe. O termo "uso" diz respeito às alterações essencialmente antrópicas na superfície, desde o simples manejo agropastoril à construção de cidades. Já o termo "cobertura" diz respeito aos atributos físicos da superfície, como geologia, geomorfologia e cobertura vegetal, entre outros. Por fim, o termo "solo" deve ser entendido como a camada superficial da Terra onde os vegetais se desenvolvem, resultante da decomposição da rocha-matriz a partir do intemperismo físico e químico (NAGENDRA *et al.*, 2004; MCCONNELL & MORAN, 2000 apud JESUS, 2010), e também como superfície passível de alteração, construção e habitação.

Segundo Nagendra *et al.* (2004), a despeito dos avanços nos estudos sobre uso e cobertura do solo, uma compreensão definitiva dos processos humanos que afetam os padrões de uso da terra e das mudanças na cobertura da terra ainda está para ser alcançado - não por falta de esforço - mas pela complexidade conceitual e metodológica desta tarefa. O grande desafio, portanto, está em desenredar a complexa teia de interações entre padrão e processo que rege a dinamicidade espaço-temporal das forças biofísicas e sócio-econômicas que moldam a cobertura e uso da terra.

Nos estudos territoriais, a detecção e o mapeamento de mudanças espaciais de uso e cobertura do solo se configuram como importante ferramental para gestão, planejamento, ordenação e

monitoramento de fenômenos a ele associados (ROSA, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2011). Neste processo, é fundamental considerar aspectos como a origem da transformação observada, além de sua intensidade, direção e extensão (MACLEOD E CONGALTON, 1998 apud PANTOJA *et al.*, 2009), para entender e possivelmente mitigar ou potencializar os impactos sobre o meio ambiente (NAGENDRA *et al.*, 2004).

Fato é que o desenvolvimento de ferramentas de suporte à dinâmica ambiental é cada vez mais recorrente no meio científico (ALMEIDA *et al.*, 2011) e empresarial (NOVO & PONZONI, 2001). As Geotecnologias representam um avanço neste sentido, já que possibilitam a elaboração de mapeamentos voltados a diversas áreas do conhecimento, e permitem a composição de mapas mais detalhados e precisos, com menor custo e menor tempo de execução (MATSUKUMA, 2002).

O Sensoriamento Remoto e o Processamento Digital de Imagens⁴ emergem, neste contexto, como importante parte do ferramental geotecnológico para o monitoramento de transformações na superfície terrestre, já que apresentam excelente custo-benefício por fornecer informações consistentes e medições repetidas em diferentes escalas para identificação e análise dos agentes e processos responsáveis pelas transformações identificadas (ROSA, 2003, PANTOJA *et al.*, 2009). Trabalhos recentes em diferentes áreas brasileiras como o reservatório de Tucuruí/PA (VASCONCELOS & NOVO, 2004), a planície de inundação do Alto Rio Paraná /PR (HAYAKAWA *et al.*, 2009), o município de Jeremoabo-BA (ALMEIDA *et al.*, 2011), o município de São José dos Campos/SP (GUISARD *et al.*, 2007), a mina de Brucutú/MG (SPINOLA *et al.*, 2009), e município São Gonçalo do Rio Abaixo/MG (JESUS, 2010) comprovam a eficácia dos métodos classificação de imagens multiespectrais obtidas por satélite para detecção de mudanças de uso e cobertura do solo.

Vale ressaltar, entretanto, que os dados de cobertura do solo derivados de imagens de satélite, representados por pixels⁵, não se traduzem em unidades sociais, econômicas ou políticas de organização (MERTENS *et al.*, 2000 apud NAGENDRA *et al.*, 2004). A identificação destes

⁴ O anexo 2 - metodológico - foi desenvolvido com objetivo de apresentar a temática e dar aprofundamento aos aspectos fundamentais que deram suporte à metodologia de mapeamento adotada.

⁵ Pixel: híbrido dos termos estrangeiros "Picture" e "Element", que significa elemento de imagem. O Pixel é o menor elemento de uma imagem a que se pode associar uma cor. Uma imagem digital é formada pela totalidade dos seus pixels.

agentes só é permitida através da análise dos padrões espaciais, consultas bibliográficas e pesquisas de campo.

3.2 Ecologia da Paisagem

3.2.1 Definição

A Ecologia da Paisagem é a disciplina que investiga a dinâmica da diversidade espacial da paisagem e do efeito das atividades antrópicas em sua transformação, considerando seus diferentes padrões, processos e escalas, e a própria diversidade espacial como força motriz dos processos ecológicos (SOARES-FILHO, 1998; GUIMARÃES, 2004). É bastante abrangente, porque considera as dimensões física, biológica e socioeconômica do ambiente, em que o homem é visto como uma parte interativa dos ecossistemas naturais, e não como um agente externo (NAVEH & LIEBERMAN, 1989); porque considera a existência da dependência espacial entre as unidades que compõe a paisagem; e porque une a análise espacial da geografia com a análise funcional da ecologia (METZGER, 2001).

A Paisagem é uma categoria espacial distinta, heterogênea e mensurável, definida pelo padrão espacial e interação de agrupamentos ecológicos e geomorfológicos, influenciados por regimes de perturbação e pela própria evolução, sendo o tempo fator elementar no seu desenvolvimento (SOARES-FILHO, 1998; SALGADO, 2001; SCHIER, 2003). Sua definição deve considerar um mosaico espacial heterogêneo composto por partes interativas, considerando que esta heterogeneidade existe para pelo menos um fator, definido por um observador, para uma escala de observação (METZGER, 2001). Cabe ressaltar que é possível mensurar os processos participantes da dinâmica da paisagem, entretanto, parte destes processos são subjetivos. A maior parte dos modelos de interpretação propostos considera uma série de fatores que normalmente são limitados por aspectos de caráter econômico, social, político, cognitivo, simbólico, normativo ou religioso das populações (FERREIRA E SAADI, 2011).

3.2.2 Histórico

A ideia de paisagem foi proposta como conceito geográfico pela primeira vez pelo naturalista alemão Alexander Von Humboldt, no início do século XIX (SCHIER, 2003), como “*Der*

Totalcharakter einer Erdgegend”, ou seja, o conjunto das características de uma região terrestre. Em 1939, o biogeógrafo Carl Troll lança o conceito da Ecologia da Paisagem⁶ - apropriando-se de conceitos da geografia humana, fitossociologia, biogeografia e arquitetura associada ao ordenamento territorial - com a premissa de se estudar as inter-relações entre a biota (incluindo o homem) com o seu ambiente (METZGER, 2001), e considerando a paisagem como entidade espacial e visual, composta pela geosfera, biosfera e noosfera⁷ (SOARES-FILHO, 1998).

Na década de 1980, a partir do advento das imagens de satélite para uso civil, aliado às facilidades de processamento digital de imagens e das análises geo-estatísticas conferidas pela popularização dos micro-computadores pessoais, um novo conceito de Ecologia da Paisagem surgiu. Este conceito recebeu forte influência norte-americana que, ao tentar adaptar os preceitos da biogeografia de ilhas para o planejamento de reservas naturais em ambientes continentais, conferiu aos estudos de ecologia da paisagem uma abordagem ecológica, como maior ênfase às paisagens naturais, para aplicação em manejo de recursos naturais e conservação da diversidade biológica. Neste sentido, a escala espaço-temporal é definida pela espécie investigada, sem necessariamente abordar a macro-escala. A diferença fundamental entre as duas perspectivas é que na primeira o foco está nas relações do homem com seu espaço, enquanto a segunda foca nos efeitos da estrutura espacial sobre os processos ecológicos (METZGER, 2001)⁸.

Recentemente, o estudo da ecologia da paisagem evoluiu para o estudo dos padrões da paisagem, considerando a influência da organização espacial de seus constituintes no seu

⁶ Segundo Soares-Filho (1998), autores como Bertrand (1968), Zonneveld (1979) e Turner & Gardner (1991) elaboram novos conceitos sobre a paisagem a partir desta perspectiva.

⁷ Esfera do pensamento humano.

⁸ Metzger (2001) ressalta, inclusive, a variação entre as abordagens geográficas e ecológicas ao relacionar definições de diferentes autores: "A ecologia de paisagens é entendida como: o estudo da estrutura, função e dinâmica de áreas heterogêneas compostas por ecossistemas interativos (Forman & Godron 1986); a investigação da estrutura e funcionamento de ecossistemas na escala da paisagem (Pojar et al. 1994); uma área de conhecimento que dá ênfase às escalas espaciais amplas e aos efeitos ecológicos do padrão de distribuição espacial dos ecossistemas (Turner 1989); uma forma de considerar a heterogeneidade ambiental em termos espacialmente explícitos (Wiens et al. 1993); uma área de conhecimento que considera o desenvolvimento e a dinâmica da heterogeneidade espacial, as interações e trocas espaciais e temporais através de paisagens heterogêneas, as influências da heterogeneidade espacial nos processos bióticos e abióticos e o manejo da heterogeneidade espacial (Risser et al. 1984); uma ciência interdisciplinar que lida com as interações entre a sociedade humana e seu espaço de vida, natural e construído (Naveh & Lieberman 1994)" (METZGER, 2001: 3).

funcionamento (LANG & BLASCHKE, 2008). Forman (1986), citado por Soares-Filho (1998) e Guimarães (2004), cria a definição de Ecologia da Paisagem como o estudo de uma região heterogênea em que há ecossistemas em interação a partir de sua estrutura, função e mudança. Neste caso, a estrutura trata das relações espaciais entre as unidades ou organizações espaciais; a função diz respeito à interação entre os componentes especiais, considerando as trocas de energia, materiais e organismos; e a mudança diz respeito às alterações na estrutura e na função do mosaico ecológico ao longo do tempo.

3.2.3 Aspectos Estruturantes da Paisagem

O maior desafio da análise espacial a partir da ecologia da paisagem está em captar a influência dos diferentes elementos que a compõe em seu funcionamento. Neste sentido, alguns conceitos são fundamentais ao processo de investigação e interpretação da paisagem, tais como Unidade de Paisagem, Elemento da Paisagem, Parte, Matriz, Conectividade, Corredores, Mosaico, Fronteira, Borda, Ecótone, Ecóclina, Ecótipos, Distúrbio, Fragmentação. O Quadro 3.1 traz a caracterização destes conceitos, baseados na discussão apresentada por Naveh & Lieberman (1989), Soares-Filho (1998), Metzger (2001) e Guimarães (2004):

Quadro 3.1: Síntese dos conceitos utilizados na análise da ecologia da paisagem (baseado em Naveh & Liebermann (1989), Soares-Filho (1998), Metzger (2001) e Guimarães (2004)).

Conceito	Caracterização Original
Unidade de Paisagem	As unidades de paisagem são diferentes áreas com características semelhantes e complementares.
Elemento da Paisagem	São as manchas, corredores ou frações da matriz que compõe a paisagem. Uma unidade de paisagem é composta por seus elementos
Mosaico	O mosaico representa a totalidade dos elementos de uma paisagem.
Matriz	A matriz é a mais importante unidade de paisagem de uma paisagem, que controla sua dinâmica. Geralmente é aquela unidade que recobre a maior parte da paisagem, ou que apresenta maior grau de conexão entre as demais áreas.
Mancha	A mancha é um elemento da paisagem. Geralmente caracterizam-se por áreas homogêneas, não lineares e distintas de sua vizinhança.
Corredores	Os corredores são unidades de paisagem lineares, homogêneas e distintas de sua vizinhança.
Conectividade	A conectividade determina o grau de permeabilidade da paisagem, que possibilita os fluxos ecológicos.

Conceito	Caracterização Original
Borda	É a área de transição ou limite entre duas unidades de paisagem.
Fronteira	Em ecologia da paisagem, a fronteira é a borda entre ecossistemas vizinhos, e pode ser diferenciada em três tipos: ecótone, que é uma zona de transição natural entre ecossistemas; ecóclina, zona de transição gradual e contínua entre ecossistemas; e ecótipo, zonas de transição bem definidas, úteis para o mapeamento de áreas ecologicamente diferentes.
Distúrbio	Qualquer evento natural que gere mudança na estrutura ou função da paisagem.
Fragmentação	É a transformação da paisagem através do fracionamento de áreas homogêneas, como uso, cobertura, ecossistemas ou habitat, ao longo do tempo, por fatores naturais ou antrópicos.

Fonte: Adaptação de Naveh & Lieberman (1989), Soares-Filho (1998), Metzger (2001) e Guimarães (2004).

É possível quantificar, através de ferramentas de geoprocessamento, a estrutura da paisagem e sua alteração a partir de métricas de paisagem, que permitem descrever a paisagem no nível de suas manchas (métricas relativas a áreas, bordas, formas e núcleos), classes (métricas de vizinhança, proximidade e fragmentação), e da própria paisagem (medidas de diversidade, contágio e retalhamento) (SOARES-FILHO, 1998; LANG & BLASCHKE, 2008).

Como relata Lourenço (2009), as métricas ao nível das manchas são utilizadas para análise do seu contexto e caráter espacial, e são a base para o cálculo das métricas de classe e paisagem, que possuem maior valor interpretativo. Já as métricas ao nível de classes são um desdobramento das métricas de mancha, já que resultam da integração das mesmas por uma determinada classe, e auxiliam na reflexão a respeito das propriedades das manchas em nível agregado. As métricas ao nível de paisagem resultam da síntese das métricas ao nível de manchas ou classes, e sua aplicação está na análise e interpretação dos padrões, composição e configuração da paisagem.

Neste trabalho serão utilizadas métricas tanto ao nível da paisagem, quanto ao nível das classes (Área, Borda e Forma), em nível vetorial⁹, realizada em ambiente computacional (automático), como suporte à análise da mudança de uso e cobertura do solo.

As métricas relativas à área são fundamentadas na percentagem de área das classes individuais da paisagem, sendo uma classe composta pela soma de todas as áreas relativas à mesma. A área das manchas tem grande importância ecológica, pois é um indicativo de

⁹ Formato suportado pelo software V-LATE 2.0 beta, adotado para realização dos cálculos, conforme descrito no capítulo II.

potencial de diversidade ecológica. Segundo Cassimiro (2002), uma maior fragmentação da paisagem - e consequentemente maior número de manchas - indica maior resistência ao espalhamento de perturbações e distúrbios.

Já as métricas relativas às bordas correspondem ao cálculo do seu perímetro, e desempenham papel fundamental na definição de ecótonos, ecóclinas e ecótipos, além de indicar a variação na heterogeneidade e fragmentação da paisagem, pois, quanto maior o número de manchas, maior o número de bordas (Lourenço, 2009). Seu cálculo é feito de modo análogo ao da área, pois também particiona os polígonos em formas geométricas básicas para cálculo dos segmentos.

As métricas relativas às formas correspondem à relação entre o perímetro e a área das manchas, e tem por função principal caracterizar o grau de complexidade das formas dos polígonos. A complexidade das formas pode indicar maior suscetibilidade ou resistência à fragmentação. As principais métricas de paisagem – incluindo as adotadas neste estudo - estão apresentadas no Quadro 3.2 abaixo, conforme descritas por Hoechstetter *et al.* (2008), Lourenço (2009) e Lucas (2011):

Quadro 3.2: Principais métricas de paisagem (adaptado de Hoehstetter *et al.* (2008), Lourenço (2009) e Lucas (2011)).

Métrica	Sigla	Equação	Descrição	Caracterização
Número de manchas	NP	$NUMP = \sum n_i$	NUMP = Número total de manchas ou fragmentos dentro de uma mesma classe ou paisagem; n_i = Quantidade de manchas de uma classe se NUMP for a nível de paisagem ou uma mancha ou fragmento se NUMP for a nível de classe.	O número de manchas verificados na paisagem.
Área de Classe	CA	$CA = \sum_{i=1}^n c_i$	CA = Soma das áreas de todas as manchas que pertencem a uma determinada classe, em hectare; c_i = Área da i -ésima mancha correspondente à classe avaliada.	Área de cada classe de uso de solo em m ² .
Média de tamanho de mancha	MPS	$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i}$	MPS = Tamanho médio dos fragmentos em hectare; a_{ij} = área do fragmento i na classe j ; $j = 1$ a n número de fragmentos; n_i = número de fragmentos da classe.	Média da dimensão de todas as manchas correspondentes a uma determinada classe de uso do solo, em m ² .
Desvio Padrão para as classes selecionadas.	PSSD	$PSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} - \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} ^2}{n_i}}$	PSSD = Desvio padrão do tamanho médio dos fragmentos em hectare; a_{ij} = área do fragmento i na classe j ; $j = 1$ a n número de fragmentos; n_i = número de fragmentos da classe.	Raiz quadrada do erro médio quadrático das manchas relativas à classe de uso do solo em análise, em m ² .
Total de bordas em metros	TE	$TE = \sum_{i=1}^n e_i$	TE = soma de todas as bordas da classe ou paisagem em metros; e_i = borda (perímetro) da i -ésima mancha ou fragmento.	Somatório do perímetro de todas as manchas da classe de uso do solo selecionada.
Média do tamanho das bordas	MPE	$MPE = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{NUMP}$	MPE = comprimento médio da borda em metros; e_i = borda (perímetro) da i -ésima mancha; NUMP = Número total de manchas ou fragmentos dentro de uma mesma classe ou paisagem.	Média da dimensão do perímetro de todas as manchas correspondentes a uma determinada classe de uso do solo, em m ² .
Índice de forma média	MSI	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{0,25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right)}{n_i}$	MSI = Índice de forma média; p_{ij} = perímetro do fragmento ij ; a_{ij} = área do fragmento i na classe j ; $j = 1$ a n número de fragmentos; n_i = número de fragmentos da classe.	Relação entre o perímetro e área das manchas, medindo a complexidade da forma das manchas em função de uma forma básica quadrada (para a versão raster), que representa o valor de "1", como o mínimo de complexidade.
Índice médio de forma ponderado pela área	MPAR	$MPAR = \frac{p}{a}$	MPAR = Perímetro da área de média-ratio; a = Média de tamanho de mancha; p = Média do tamanho das bordas	Relação entre o perímetro e área das manchas, medindo a complexidade da forma das manchas, mas efectuando uma ponderação em função da dimensão de cada mancha.
Dimensão Fractal Média	MFRACT	$MFRACT = \frac{2 * \ln(0,25 * p)}{\ln a}$	MFRACT = Média Dimensão Fractal na classe / nível de paisagem; a = Média de tamanho de mancha; p = Média do tamanho das bordas	Caracteriza o grau de complexidade de um polígono, relacionando o perímetro com a área. O valor mínimo é "1" e o máximo é "2".

A partir destas estimativas básicas, é possível calcular a frequência e densidade das manchas e bordas (entre outras medidas), indicadores de ganho ou perda de fragilidade das unidades de paisagem. Entretanto, como dito, o grande desafio da análise da paisagem está em captar as interações entre suas unidades a partir dos seus elementos e dos fluxos entre eles. Desta maneira, a identificação de suas partes e métricas é muito importante, mas o conhecimento da área de estudo e dos processos que fundamentaram ao longo do tempo suas transformações é fundamental, pois são estas as informações que irão efetivamente explicar os fenômenos observados.

4. A SERRA DO GANDARELA: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A delimitação da área de estudo compreende o Sinclinal Gandarela (Figura 4.1), e foi realizada considerando-se quatro aspectos fundamentais: a hidrografia (Figura 4.5), as rupturas de declive - cuja identificação foi auxiliada pelo mapa declividade (Figura 4.3) - a geologia e a geomorfologia (Figura 4.3 e 14 apresentadas na caracterização física deste estudo). As porções norte e noroeste da área de estudo foram delimitadas a partir do encontro das coberturas cenozóicas e da Formação Cauê com o Grupo Nova Lima. Esta delimitação foi refinada a partir do mapa de declividade, uma vez que locais de ruptura entre locais de alta declividade e baixa declividade representam um fator limitante de ocupação e, portanto, caracterizam dois espaços que, embora adjacentes, tendem a apresentar usos completamente diferentes. A porção sudoeste da área de estudo foi estendida do divisor sudoeste da Serra do Gandarela até o talvegue do rio Conceição, já que boa parte da ocupação desta porção da Serra do Gandarela está associada à ocupação desta margem do rio.

Conforme pode ser visto na figura 11, a área de estudo compreende diversos topos orográficos, sendo aquele conhecido como Serra do Gandarela localizado na porção oeste da área de estudo. Apesar dos demais topos verificados, neste trabalho a área de estudo em sua totalidade será doravante referenciada como Serra do Gandarela.

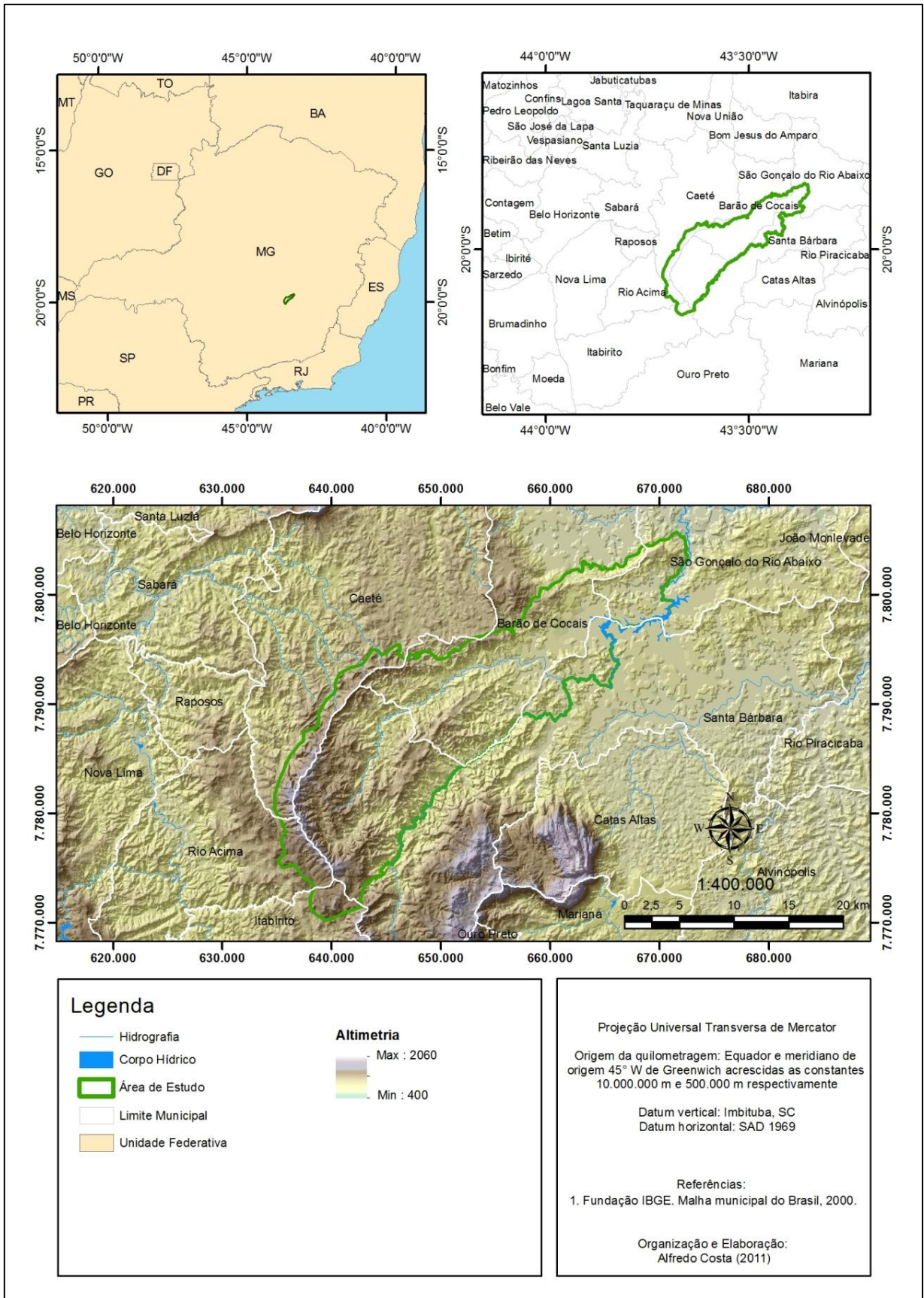


Figura 4.1: Localização da área de estudo

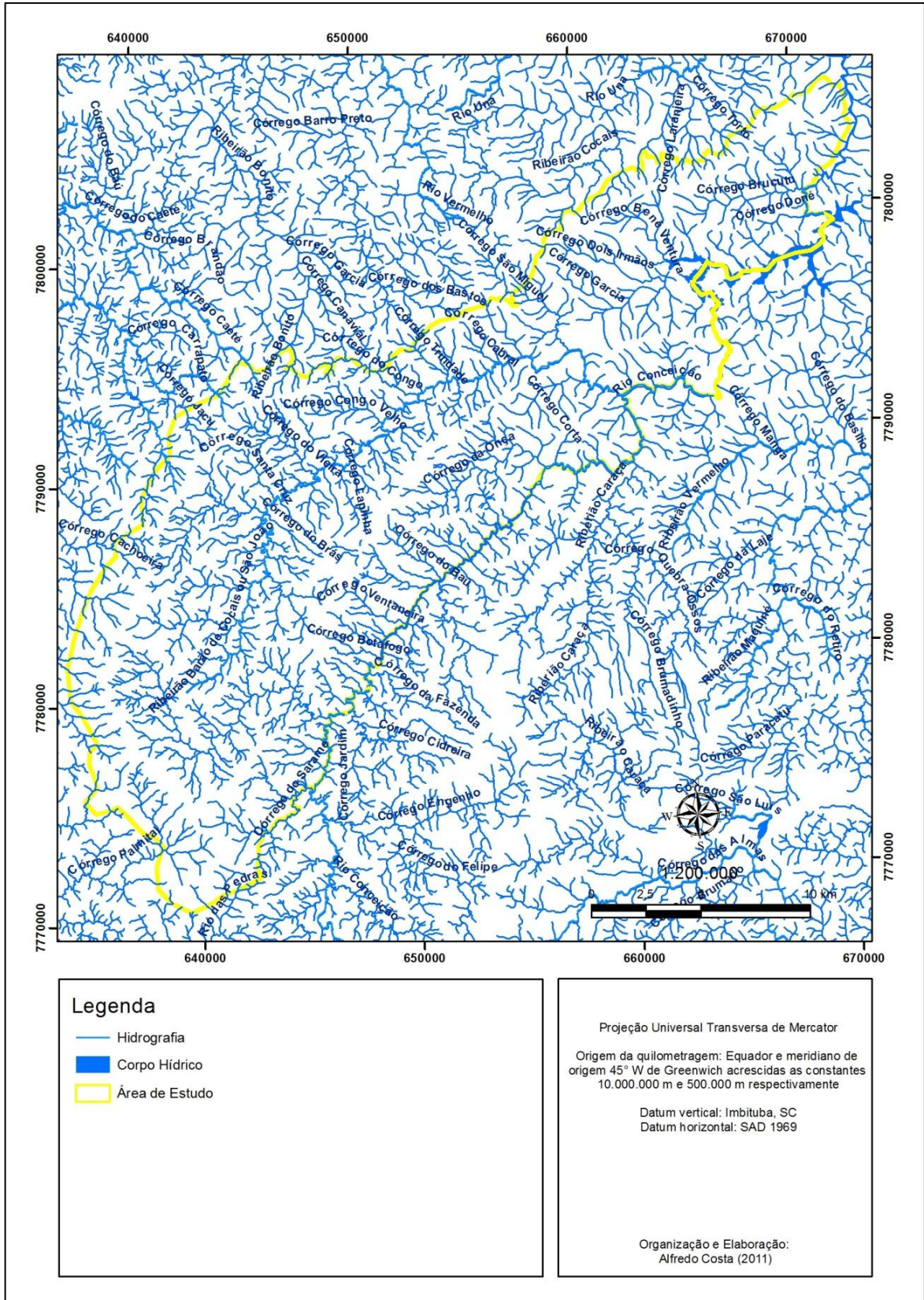


Figura 4.2: Hidrografia da área de estudo

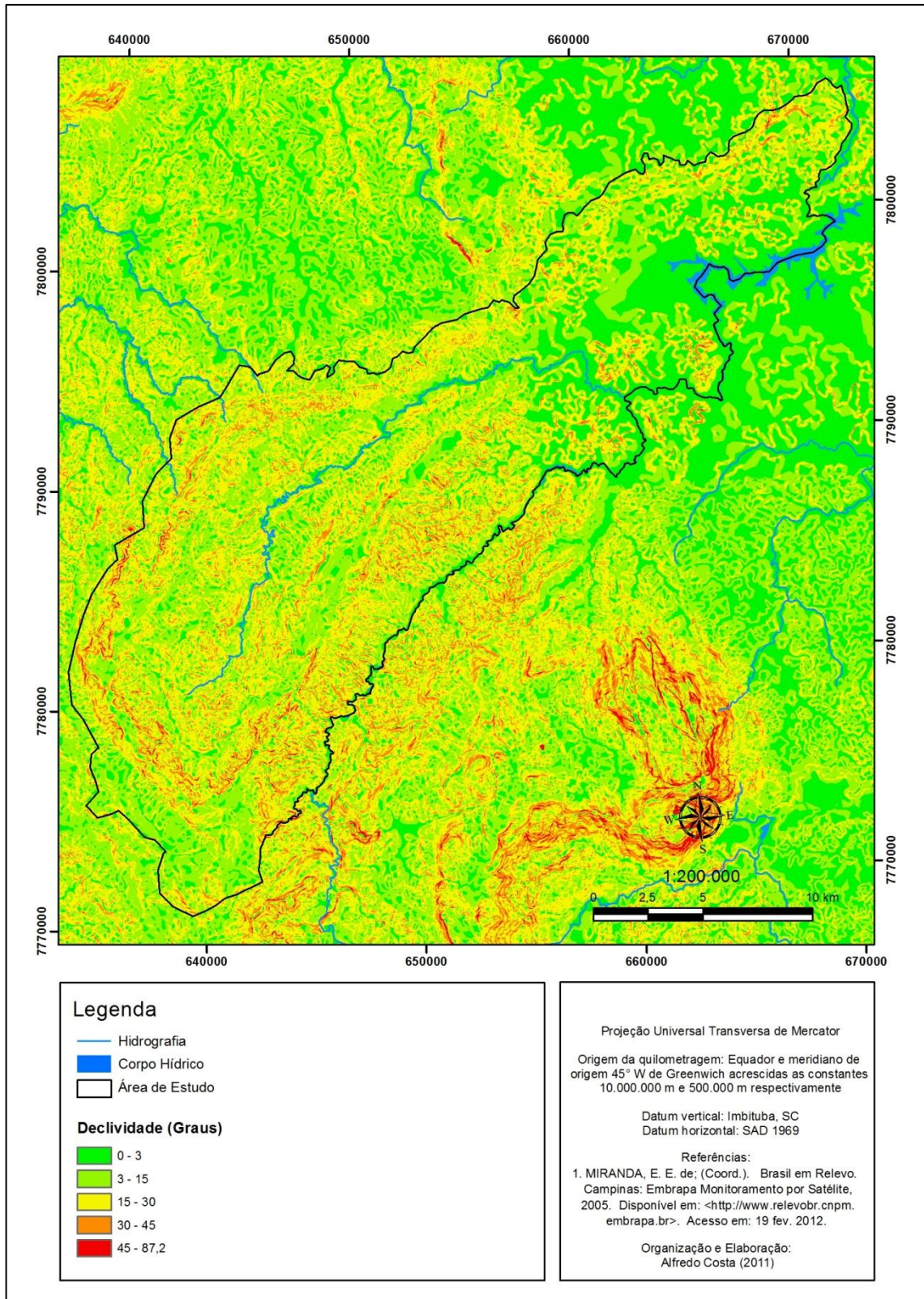


Figura 4.3: Declividade na área de estudo

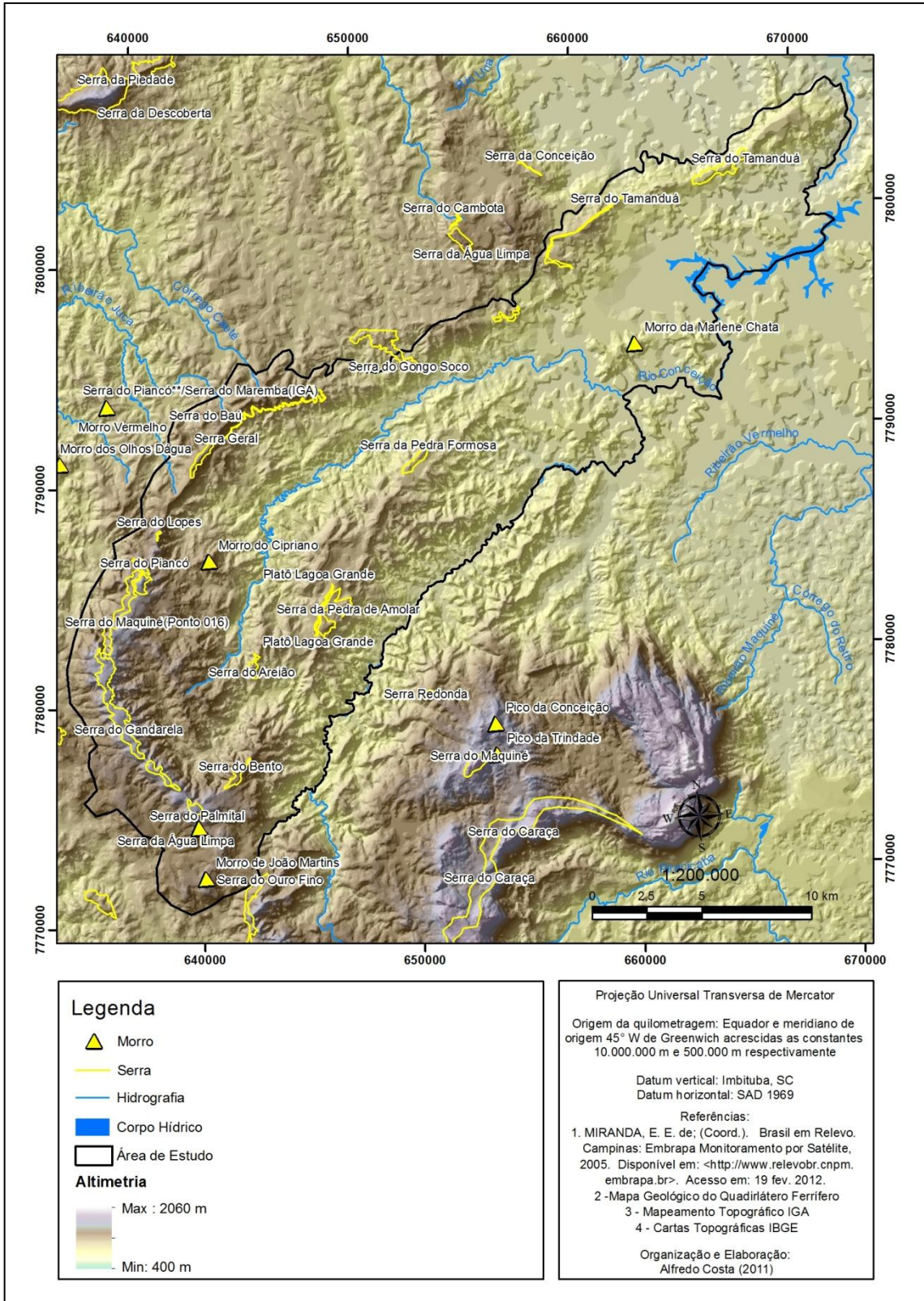


Figura 4.4: Tetos orográficos da área de estudo

4.2 Geologia e Geomorfologia

A Serra do Gandarela se encontra inserida sob o contexto do denominado Quadrilátero Ferrífero, cuja compreensão do ponto de vista regional não pode ser dissociada. O Quadrilátero Ferrífero, conforme Medina *et al.* (2005), corresponde a um dos conjuntos orográficos mais importantes de Minas Gerais, localiza-se na porção centro-sudeste do Estado de Minas Gerais, ocupando uma área de aproximadamente 7000 km². Trata de uma antiga cadeia dobrada de arranjo atual grosseiramente quadrangular em que as linhas de cristas usualmente ultrapassam os 1200m de altitude chegando a ultrapassar os 2000m enquanto as porções de relevo inferiores atingem cotas inferiores a 800m.

A geologia da Serra do Gandarela, situada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, é descrita por Oliveira *et al.* (2005) como formada por metassedimentos do Supergrupo Minas em contato com o Grupo Nova Lima, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas e o embasamento composto por rochas graníticas do Complexo Metamórfico Caeté.

Lamounier *et al.* (2010) descreve a geologia da seguinte maneira. Conforme Dorr *et al.* (1957), o Supergrupo Rio das Velhas é dividido em dois grupos: Nova Lima (inferior) e Maquiné (superior). O Grupo Nova Lima, além de formações ferríferas bandadas (BIFs), é representado pelos filitos, clorita-xisto, rochas metavulcânicas e dolomitos. O Grupo Maquiné, constitui-se predominantemente de quartzitos, xistos, conglomerados e, em menor quantidade, sericita-xisto, clorita-xisto e filitos. O Supergrupo Minas, segundo (ALKMIM & MARSHAK, 1998), se constitui do Grupo Caraça (base), com meta-conglomerados, quartzitos e filitos. Sobre este grupo localiza-se o Grupo Itabira composto especialmente por formações ferríferas (Formação Cauê) e por formações carbonáticas (Formação Gandarela). O Grupo Itabira é recoberto pelo Grupo Piracicaba, composto por rochas terrígenas de ambientes deltáticos e plataformais intercaladas com lentes carbonáticas. A Figura 4.5 ilustra a geologia e o perfil esquemático da região da Serra do Gandarela.

Do ponto de vista geomorfológico, Silva *et al.* (2009) dividiu a Serra do Gandarela nas seguintes unidades morfológicas: cristas, escarpas, planaltos e depressões (Figura 4.6), extremamente correlacionáveis com as unidades litológicas. A serra adquire uma forma alongada com uma linha de cumeada em cristas bem definidas por escarpamentos em forma de pinça que segue o controle exercido pela estrutura abaciada do sinclinal homônimo, acompanhando juntamente a estratigrafia das rochas. Essa forma condiciona o escoamento

para um curso principal de sentido SW-NE, o rio Barão de Cocais. Somente o rio Gandarela é drenado para fora da estrutura do sinclinal. De acordo com Fabri *et al.* (2008) e Barros *et al.* (2010), existem indícios de que o rio Conceição teria capturado o rio Gandarela (antigo afluente do rio Barão de Cocais), que se encaixou ao longo de uma falha de empurrão, escavando um cânion nas terras altas que constituem o limite entre a Sinclinal Gandarela e a Anticlinal de Conceição. Esse processo pode ter sido facilitado pelo maior potencial erosivo das bacias que se encontram no interior da anticlinal escavada em relação àqueles que drenam o interior da sinclinal. A captura também foi facilitada pela existência dos frágeis dolomitos da Formação Gandarela (Grupo Itabira).

No entorno das cristas da serra formam-se depressões (internas e externas) esculpidas pela dissecação fluvial conforme a resistência litológica estrutural estabelecendo ou vales encaixados ou patamares escalonados até as depressões.

Cabe destacar que localmente as condições litológicas possibilitaram a formação de feições cársticas em áreas de topo, representadas na unidade de Cristas Superiores com feições cársticas. Devido à ocorrência de lentes de dolomito no topo da serra por dissolução formaram-se lagoas de dolinas e uvalas (Silva *et al.*, 2009).

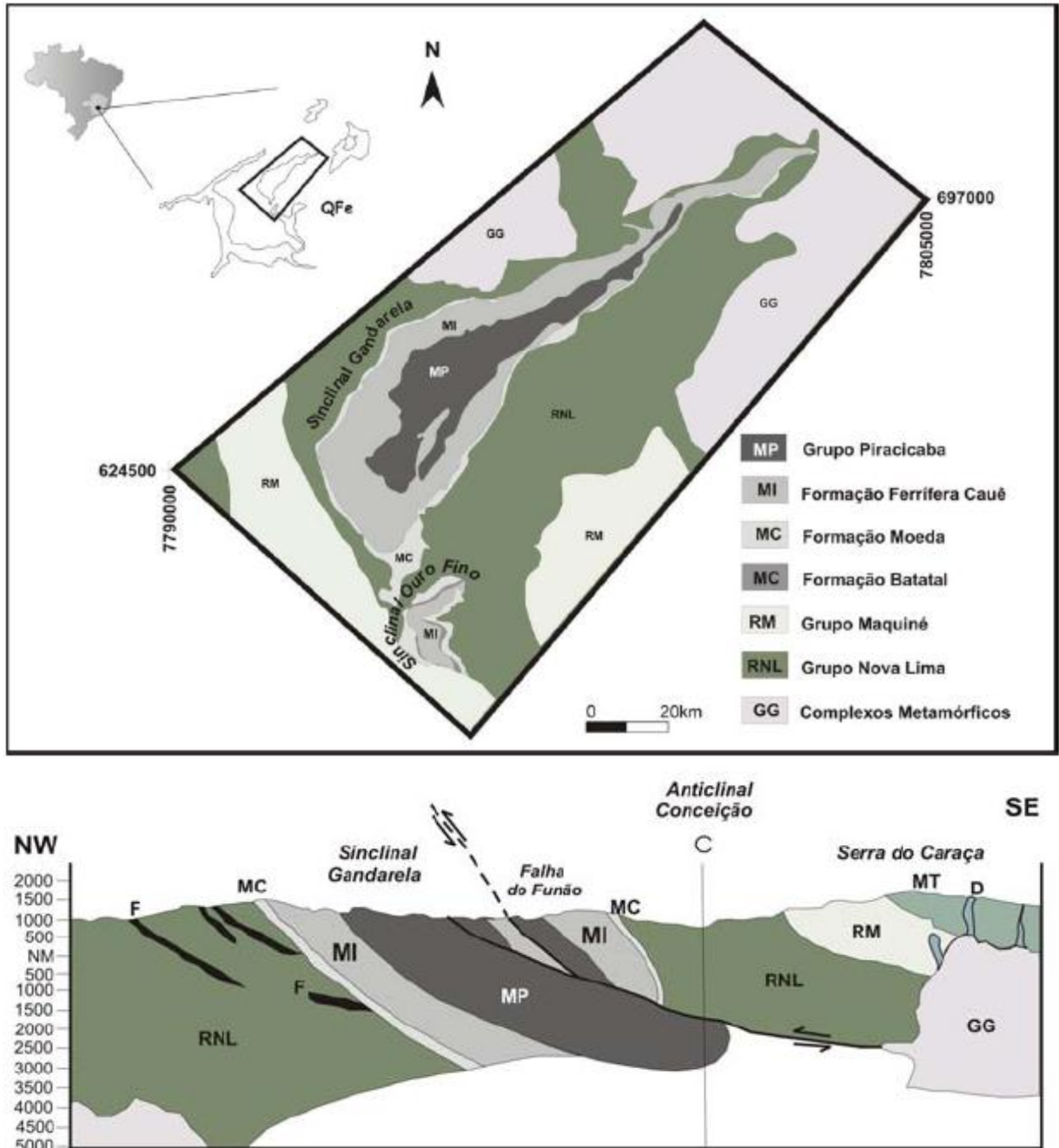


Figura 4.5 - Geologia e perfil esquemático da Serra do Gandarela. Fonte: Oliveira *et al.* (2005)

A organização litológica com sua dinâmica intempérica físico-química possui influência direta não só na organização do relevo, mas também na distribuição dos tipos de solos e formações vegetais. Conforme as caracterizações fisiográficas encontradas no sítio oficial elaborado pela CPRM da “Excursão Virtual pela Estrada Real no Quadrilátero Ferrífero”¹⁰, os gnaisses de composição granítica formam baixadas extensas, pequenos morros arredondados e encostas de baixo gradiente. São dissecados por uma drenagem em padrão dendrítico e o

¹⁰ http://www.cprm.gov.br/estrada_real/index.html

perfil de alteração dessas rochas pode ultrapassar 50 metros. Intemperizam-se para solos de cor avermelhada, relativamente espessos com alto teor de minerais secundários e oxidróxidos. Este solo é sujeito a rápido e intenso voçorocamento pela retirada da vegetação e camadas superficiais do solo, seja em trilhas de animais, desmatamento ou mesmo pastagem excessiva.

Os xistos são pouco resistentes ao intemperismo e formam saprólitos de cor vermelha, rosa, roxa e bege e comumente conservam um forte bandamento. Pode-se encontrar saprólitos a mais de 100m de profundidade em algumas minas. Formam uma topografia de pequenos morros irregulares nas baixadas, com pequenas serras sustentadas por camadas de quartzito ou formação ferrífera.

Os filitos do Grupo Piracicaba são particularmente sujeitos a escorregamentos, onde desmatamento, obras de engenharia ou qualquer outra atividade antrópica interfiram no equilíbrio dinâmico entre o gradiente da encosta, o clima, a vegetação e a competência do solo. A Formação Batatal é macia e facilmente intemperizável e forma vales entre os mais resistentes quartzitos da Formação Moeda e Itabiritos da Formação Cauê. Forma solo espesso e aflora muito pouco. No entanto, é relativamente fácil de delimitar, pois suporta apenas gramíneas e pequenos arbustos.

Os quartzitos encontrados preferencialmente no Grupo Maquiné e na Formação Moeda são resistentes à erosão e ocorrem em grandes afloramentos e serras de tamanho diretamente proporcional à espessura dessas camadas, originando solos estéreis e pouco desenvolvidos com vegetação rasteira e flora especializada nas regiões planas.

Dolomito puro e maciço, como na Formação Gandarela, é resistente à erosão, dissolução, forma escarpas e um relevo peculiar de pequenos morros. Este dolomito altera-se para dois tipos de solos lateríticos: solo marrom claro aluminoso e solo manganésífero que varia de marrom avermelhado a preto azulado e plástico próximo à superfície.

A Serra do Gandarela é bem drenada, e nela situam-se tributários do Rio das Velhas, na porção oeste, e na porção leste os rios Socorro e Conceição, afluentes do Rio Piracicaba, bacia do rio Doce.

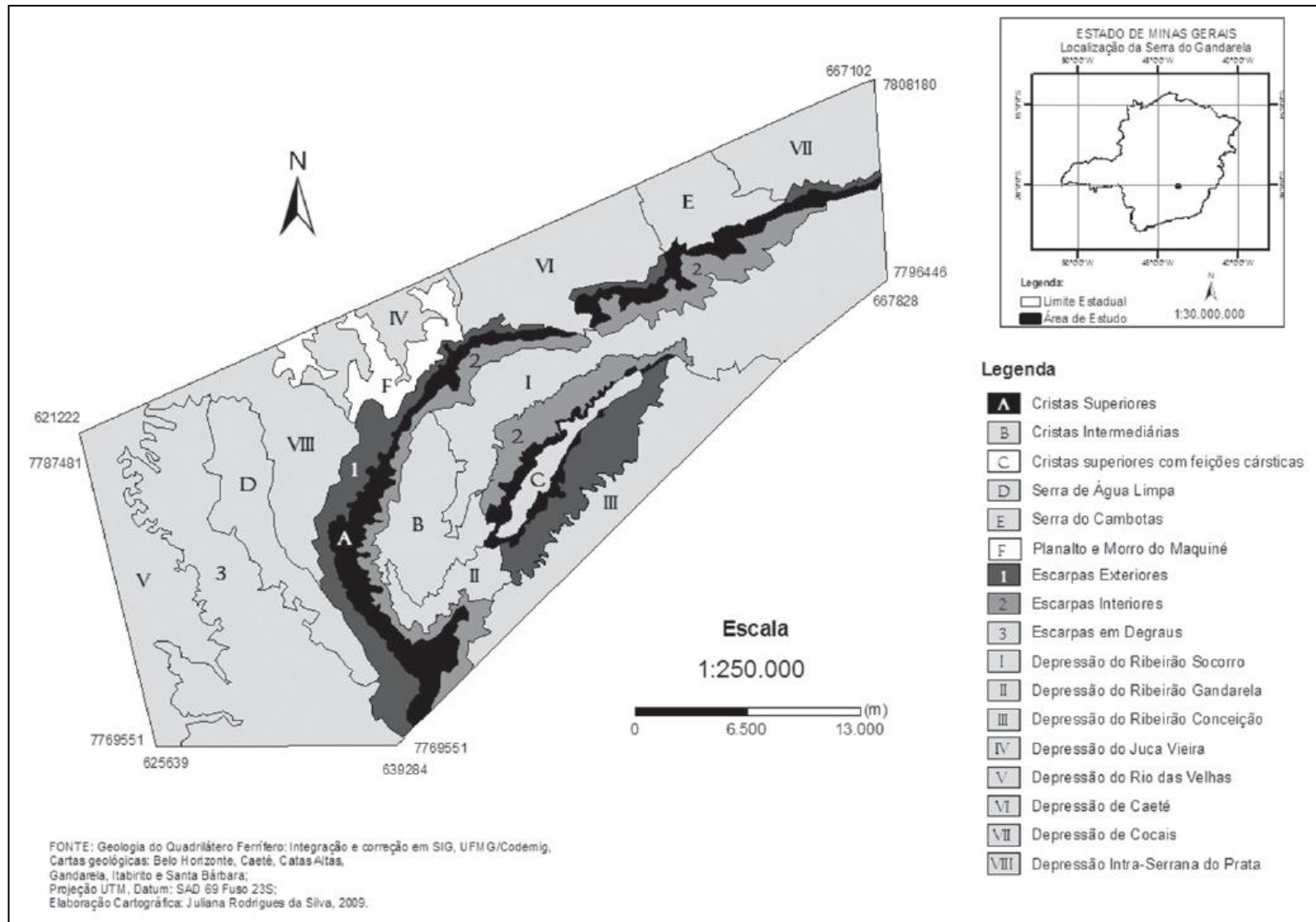


Figura 4.6 - Unidades geomorfológicas da região da Serra do Gandarela. Fonte: Silva *et al.* (2009)

4.3 Cobertura Vegetal e Áreas de Proteção Ambiental

Lamounier *et al.* (2010) relatam que a variação das litoestruturas, dos solos e da topografia representam maior influência na formação da vegetação e na organização da paisagem da Serra do Gandarela do que as condições climáticas, pois estas ali variam muito pouco. Ainda de acordo com estes autores, o fato do relevo ser ali claramente controlado pelo substrato geológico faz com que as fitofisionomias e o uso do solo estejam diretamente relacionados ao contexto litoestrutural do Gandarela.

No mesmo trabalho, Lamounier *et al.* (2010) descrevem a influência da litologia na distribuição da cobertura vegetal e no uso do solo na Serra do Gandarela, em artigo homônimo, e relata que a vegetação na região apresenta características de transição entre os Biomas Mata Atlântica e Cerrado. Desta maneira, ali se verifica Florestas Estacionais Semidecíduais (IBGE, 1997 apud LAMOUNIER, 2010), campos limpos, campos rupestres quartizíticos, campos rupestres hematíticos (também conhecidos por vegetação de canga ou campo ferruginoso) e em menor proporção, áreas de campo sujo associados ao cerrado (EMBRAPA, 1998 apud LAMOUNIER, 2010).

Assim, os padrões vegetacionais e principais usos identificados por Lamounier *et al.* (2010) são:

- Campos Rupestres ferruginosos e quartizíticos associados às rochas mais resistentes ao intemperismo (Grupos Caraça, Maquiné e Itabira - Formação Cauê);
- Campos Limpo e Sujo, geralmente em altitudes inferiores aos Campos rupestres, no contexto das rochas do Grupo Nova Lima;
- Florestas Estacionais Semidecíduais ocorre em diferentes estruturas, relacionadas principalmente aos fatores geológicos e geomorfológicos;
- Áreas de mineração nas rochas ferríferas da Formação Cauê, localizadas em maior altimetria.
- Áreas de uso agrossilvopastoril e urbano associados às rochas dos Grupos Nova Lima e Piracicaba, localizadas predominantemente nas regiões mais baixas da Serra.

Segundo o mapeamento realizado pelo programa governamental SOS Mata Atlântica (INPE, 2009), supracitado, o Quadrilátero Ferrífero contém 6,45% das Florestas Estacionais Semideciduais do Bioma Mata Atlântica presente em Minas Gerais, sendo que desta área, 12,28% está contida na área de estudo (Tabela 4.1). Na Figura 4.7 é possível verificar que trata-se de uma relevante mancha florestal na região e que, em conjunto às florestas preservadas da Serra do Canastra (ao sul do Gandarela), representam um dos mais importantes remanescentes florestais do Quadrilátero Ferrífero. A distância de rodovias e áreas urbanas - vetores históricos de desmatamento - é um aspecto que certamente contribuiu para que estas áreas permanecessem preservadas até a atualidade. Outro fator de grande relevância à preservação de grandes fragmentos de florestas localizados próximos às formações ferríferas é o fato de que as grandes empresas mineradoras possuem vastas áreas na região, que servem como impeditivo ao avanço de outros usos.

Tabela 4.1: Remanescentes Florestais do Bioma Mata Atlântica (2008)

Território	Mata Atlântica (2008)		
	Área (ha)	% QF	%MG
Área de Estudo	20.891,68	12,28%	0,79%
Quadrilátero Ferrífero	170.087,30	100,00%	6,45%
Minas Gerais	2.637.149,64	1550,47%	100,00%

Fonte: Mapeamento SOS Mata Atlântica. (INPE, 2009)

A área de estudo contém 12.338 hectares destinados à Área de Proteção Permanente¹¹ (APP), ou seja, 26,9% da área de estudo (Figura 4.8). Desta área, 71,9% (8.996 ha) são ocupadas por matas, campos e corpos hídricos¹². Já as Unidades de Conservação¹³ representam 37,8% da área de estudo (Figura 4.8), sendo 37,5% pela Área de Proteção Ambiental Sul (APA Sul), 0,3% pelas Reservas de Proteção Particular do Patrimônio Natural Federal (RPPNF) Comodato Reserva Peti e pela RPPNF Itajuru (também conhecida como RPPN Sobrado).

¹¹ As Áreas de Proteção Permanente são definidas pela Lei nº 4.771 de 15 de setembro de 1965, artigos 2º e 3º do Código Florestal Brasileiro.

¹² Cálculo obtido através do cruzamento entre o mapeamento de APP e de uso do solo para 2010, apresentado na Figura 17.

¹³ As Unidades de Conservação são regulamentadas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) através da Lei Nº 9.985 de 18 de julho de 2000.

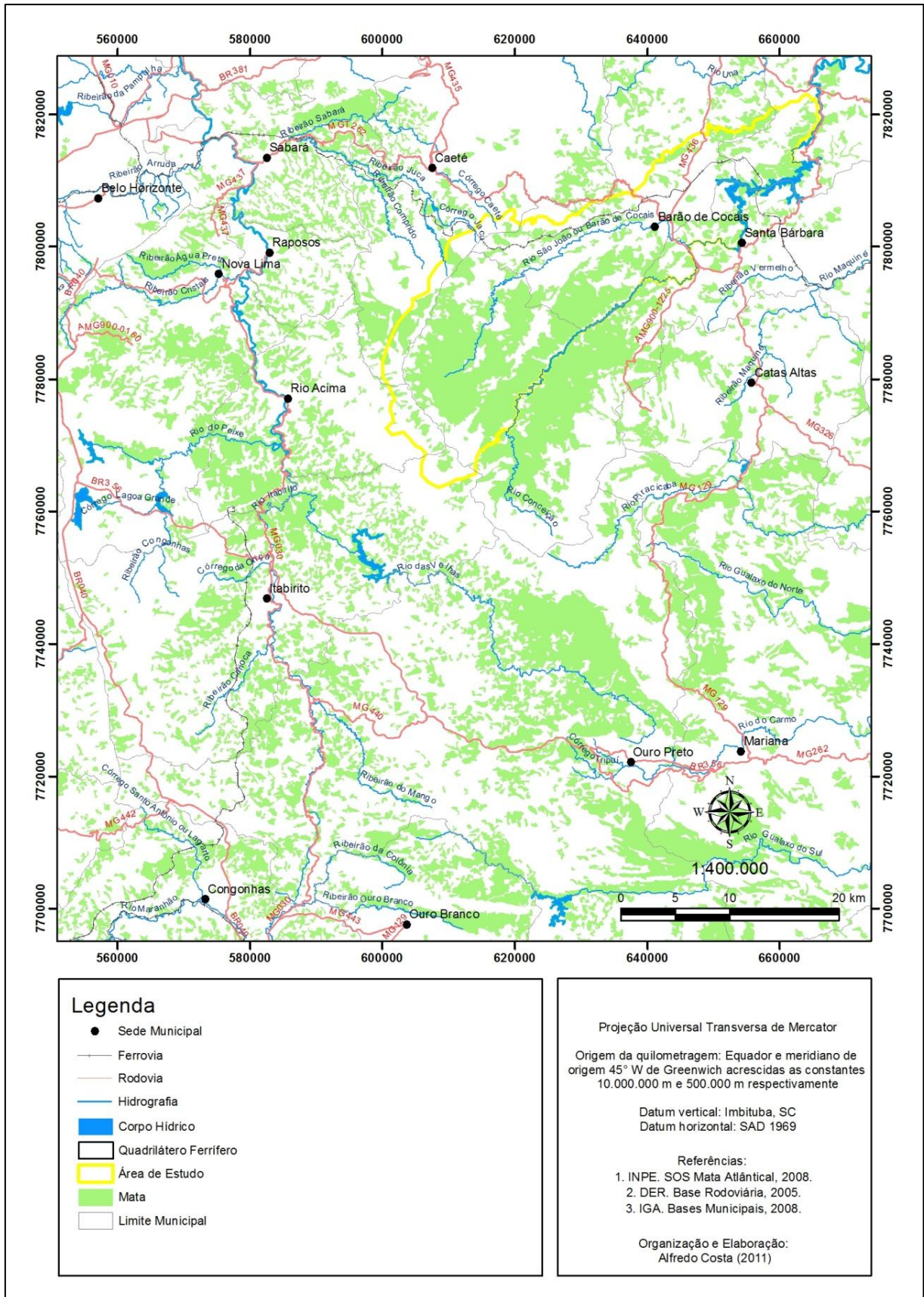


Figura 4.7: Matas do bioma mata atlântica na área de estudo.

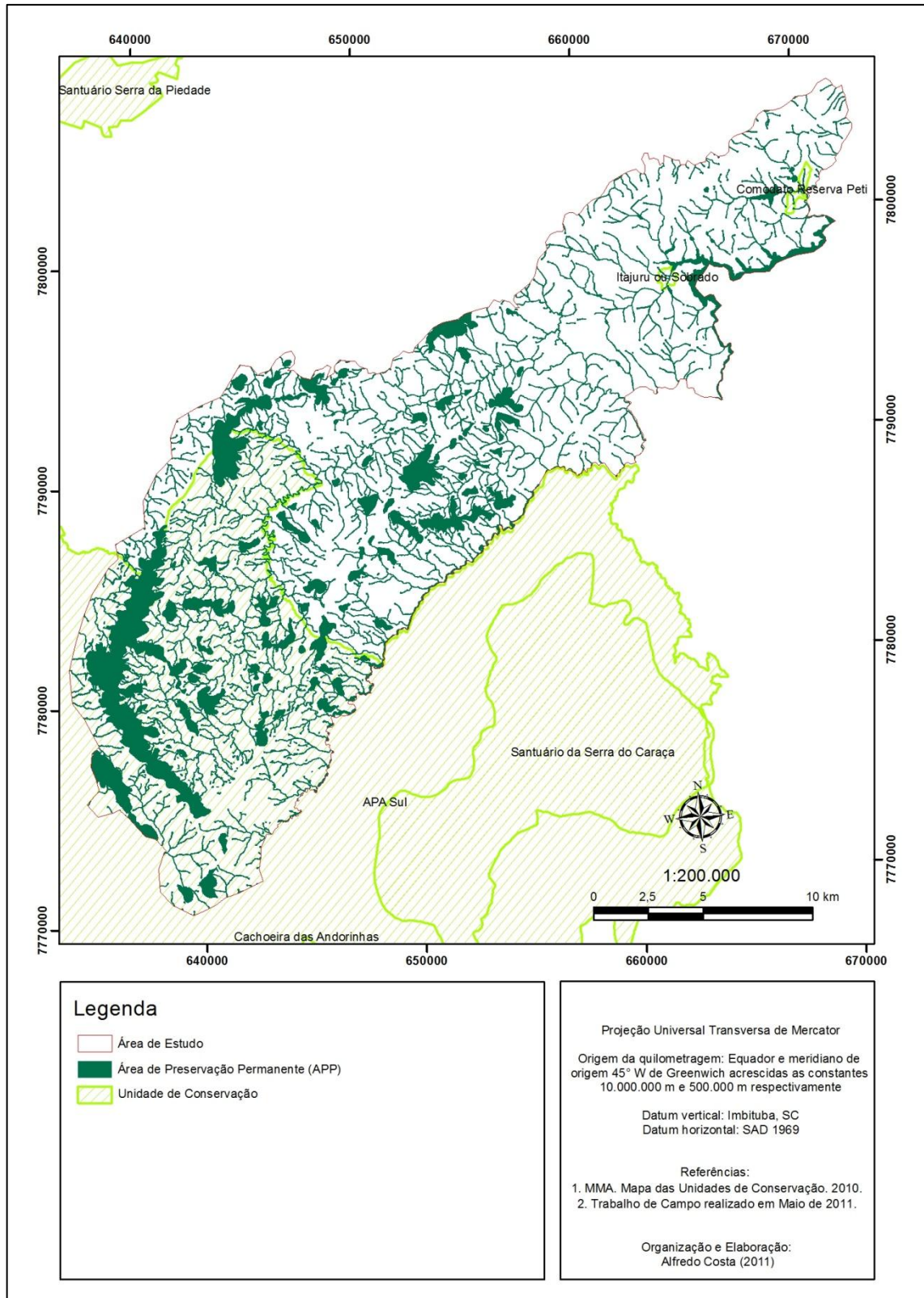


Figura 4.8: Unidades de conservação e áreas de preservação permanente (APP) na área de estudo.

4.4 Mineração

O início da mineração na Serra do Gandarela remonta à segunda metade do século XVIII, e coincide com o Ciclo do Ouro e com a ocupação da região das minas¹⁴, no Quadrilátero Ferrífero. Trata-se da mineração aurífera em Gongo Soco¹⁵, que teve produção iniciada em 1760 com iniciativa do Barão de Catas Altas (IEPHA, 1995). Em 1824, a mina é adquirida pela Imperial Brazilian Mining Association, cuja exploração de ouro dura até 1967, quando a São Carlos Company (EUA) adquire a mina para pesquisa de minério de ferro. Em 1986 a mina passa à propriedade do Grupo Santa Inês, que inicia a produção de ferro no ano seguinte (IEPHA, 1995). No ano 2000 a empresa Vale S.A. adquire a mina para exploração de minério de ferro, atividade que exerce até o presente estudo.

Outra mineração relevante presente na área de estudo situa-se na porção nordeste da área de estudo, a mina de Brucutu, de propriedade da empresa Vale S.A., inaugurada em 2006, segunda maior mina de ferro do Brasil (atrás da mina de Carajás (PA)) e a maior do planeta em capacidade inicial de produção. As duas minas de ferro citadas (cavas) correspondem a 6,5% (322,4 hectares) das áreas das cavas de exploração de minério de ferro no quadrilátero ferrífero, que correspondem a 4.926,4 hectares (GONTIJO, 2010).

Entretanto, apesar da grande importância destas, a extração mineral na Serra do Gandarela vai além. Segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral¹⁶ (DNPM), a Serra do

¹⁴ A região das minas, localizada na porção central do estado de Minas Gerais, foi inicialmente ocupada por portugueses, paulistas e nordestinos (MATOS et al., 2006) a partir de fins do século XVII, com a descoberta do ouro, e se intensificou ao longo do século XVIII, auge do Ciclo do Ouro, em que as transformações econômicas, sociais e políticas do território mineiro decorreram principalmente do fluxo de pessoas destinadas à exploração do ouro, e de maneira menos sensível, a partir das fazendas que surgiram para abastecer a região.

¹⁵ Segundo IEPHA (1995), [*...a origem do nome Gongo Soco é incerta. Segundo uma das versões, quando acontecia roubo na mina, o gongo era tocado, mas ninguém o ouvia. Outra versão diz que um escravo, vindo do Congo, foi encontrado na posição de galinha choca (palavra que teria originado “soco”) cavando escondido um depósito aurífero.*] Já para o viajante inglês Richard Burton, em visita à mineração de Gongo Soco em 1867: *“Explica-se que Gongo Soco significa: o gongo, ou a campainha, que não toca. Os brasileiros traduzem por: Esconderijo dos Ladrões”* (BURTON, 2001).

¹⁶ O DNPM foi inaugurado em 1934 e é o órgão *“responsável pelo controle da prospecção, pela concessão de licenças e de serviços estatísticos relativos às ocorrências minerais no Brasil, e teve objetivo inicial de recuperar o controle sobre as vastas reservas de minério de ferro existentes no Quadrilátero Ferrífero que estavam em mãos estrangeiras”* (SILVA, 1995 *apud* GONTIJO, 2010). Os dados supramencionados são relativos aos processos registrados até o dia 06 de novembro de 2011, data em que foram adquiridos.

Gandarela possui 100% de sua área coberta por áreas de pesquisa mineral¹⁷ (Figura 4.9). Os dados demonstram que na área de estudo prevalecem os processos pertencentes às empresas Vale S.A. (35,12%) e Anglogold Ashanti S.A. (7,44%) (Tabela 4.2), e que as substâncias mais pesquisadas na área são o ferro/minério de ferro (62,81%) e o ouro/minério de ouro (21,9%) (Tabela 4.3). É interessante notar que tanto os proprietários quanto as substâncias estão associados à grande mineração, ou seja, àquela que causa impactos pontualmente notáveis na paisagem.

Tabela 4.2: Processos Minerários por Proprietário na Área de Estudo

Proprietário	Processos	
	Número	%
Vale S.A.	85	35,12%
Anglogold Ashanti S.A.	18	7,44%
Minerações Brasileiras Reunidas S.A.	15	6,20%
Terrativa Minerai S.A.	11	4,55%
Outros	113	46,69%
Total	242	100,00%

Fonte: DNPM, 2011

Tabela 4.3: Processos Minerários por Substâncias Requeridas na Área de Estudo

Substância	Processos	
	Número	%
Ferro/Minério de Ferro	152	62,81%
Ouro/Minério de Ouro	53	21,90%
Outras Substâncias	37	15,29%
Total	242	100,00%

Fonte: DNPM, 2011

¹⁷ A pesquisa mineral é definida pelo Código de Mineração como "a execução dos trabalhos necessários à definição da jazida, sua avaliação e a determinação da exequibilidade do seu aproveitamento econômico" (CPRM, 2011).

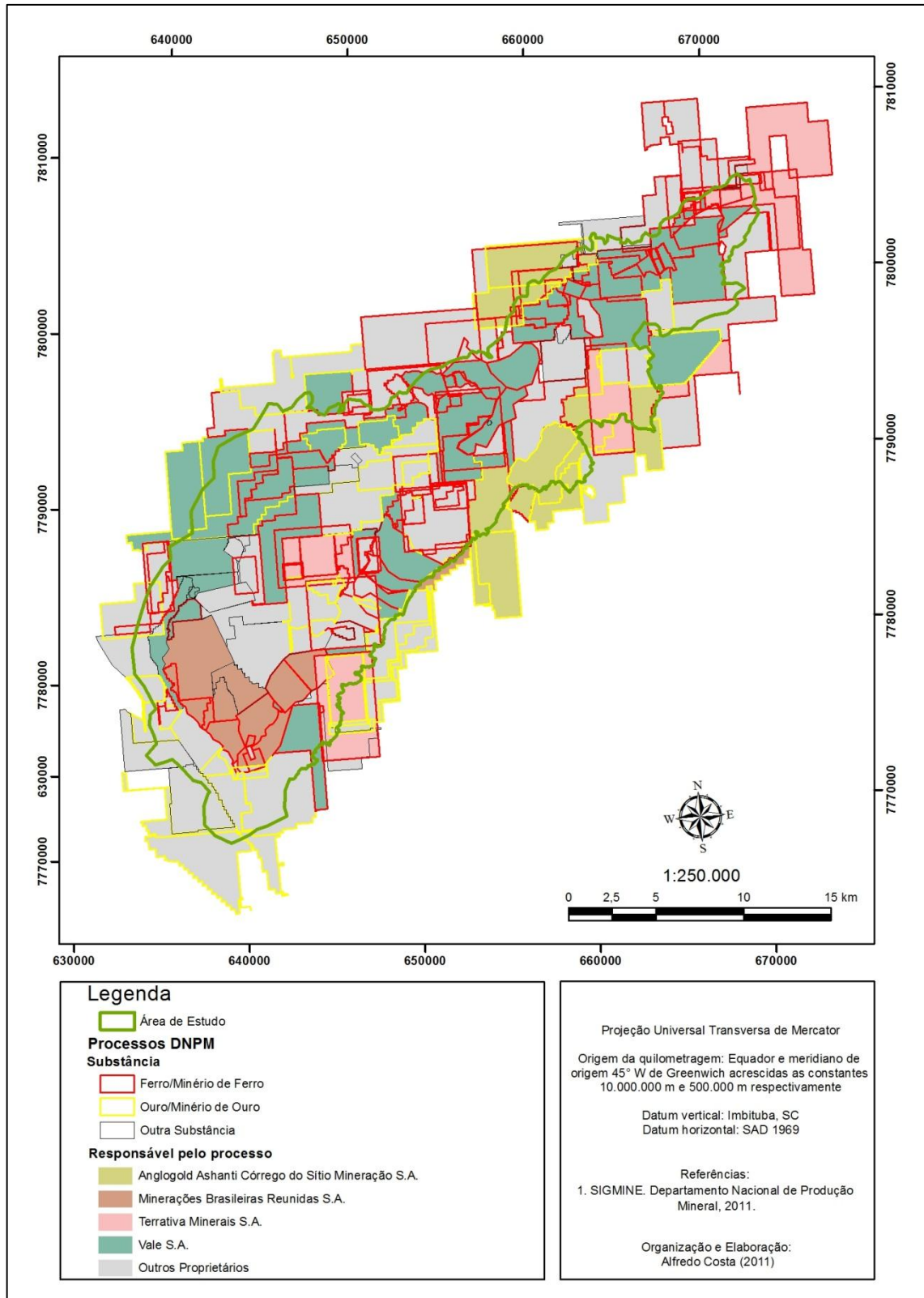


Figura 4.9: Processos DNPM na área de estudo por substância e responsável pelo processo até 06 de novembro de 2011.

Outro aspecto interessante revelado pelos dados do DNPM está associado ao período em que os processos minerários na área de estudo foram registrados: 48,76% deles concentram-se no

período 2001 a 2011 (Tabela 4.4), sendo que 94% destes processos tem como substância o ferro e o ouro, e 16,1% pertencem à Vale S.A., empresa que mais registrou processos no período. O alto número de processos minerários observados no último período pode ter sido motivado pela entrada da China na Organização Mundial do Comércio (OMC) em 2001, que aqueceu o mercado da mineração, pois potencializou as relações comerciais e impulsionou as exportações (GONTIJO, 2010). De fato, segundo a mesma autora, observou-se um aumento de 27,5% da produção de ferro no Brasil entre 2004 e 2009.

Tabela 4.4: Cronologia dos Processos Minerários na Área de Estudo

Período	Processos	
	Número	%
1930 - 1940	14	5,79%
1941 - 1950	4	1,65%
1951 - 1960	15	6,20%
1961 - 1970	14	5,79%
1971 - 1980	38	15,70%
1981 - 1990	27	11,16%
1991 - 2000	12	4,96%
2001 - 2011	118	48,76%
Total	242	100,00%

Fonte: DNPM, 2011

A Tabela 4.5 traz as fases em que se encontram os processos minerários, em que se ressalta que apenas aproximadamente um quarto deles se encontra em fase de concessão de lavra, ou seja, aquela etapa em que efetivamente pode-se iniciar a exploração mineral, e ocupam 14.270 hectares (31,1%) da área de estudo (Figura 4.10). Destes, 64,5% pertencem à empresa Vale S.A. e 12,9% à empresa AngloGold Ashanti¹⁸. As concessões predominam nos cristais superiores, e sobressaem as substâncias Ferro/Minério de Ferro, Ouro/Minério de Ouro e Bauxita. Os dados também salientam que existe um permanente interesse na região, já que quase um quarto dos processos estão em fase de requerimento de pesquisa (23,97%).

¹⁸ A base de dados do Departamento Nacional de Pesquisas Minerárias não informa em que data a última licença foi adquirida, apenas a data do requerimento do processo. Além disso, não informa quais concessões de lavra se tornaram minas. O mapeamento da evolução do uso e cobertura do solo serve de indicativo para isso.

Tabela 4.5: Processos Minerários por Fase do Processo na Área de Estudo

Fase	Descrição ¹⁹	Processos	
		Número	%
Requerimento de pesquisa	O requerimento de pesquisa é feito quando há intenção de exploração mineral em um determinado local.	58	23,97%
Autorização de pesquisa	A autorização de pesquisa é o documento que permite ao requerente iniciar a pesquisa mineral em uma determinada área, incluindo a definição da jazida, sua avaliação e a determinação da exequibilidade do seu aproveitamento econômico.	63	26,03%
Licenciamento	É o regime em que o proprietário do solo tem direito exclusivo à extração mineral ou a quem ele autorizar, exceto em imóveis públicos. A área máxima de exploração neste caso é de 50 hectares.	1	0,41%
Requerimento de lavra	Aprovado o relatório de pesquisa, o interessado recebe um ano para fazer o requerimento de lavra, que se aprovado, dá direito à exploração mineral da área pesquisada.	44	18,18%
Concessão de lavra	Aprovado o requerimento de lavra, o interessado recebe a concessão de lavra e o prazo de seis meses para iniciar a extração do mineral descoberto.	62	25,62%
Registro de extração	O registro de extração é restrito a substâncias de emprego imediato na construção civil. Esse registro é restrito a substâncias de uso imediato na construção civil de obras públicas, realizadas diretamente por órgãos públicos nacionais, estaduais ou municipais de administração autárquica ou direta. A exploração, neste caso, é restrita a cinco hectares.	1	0,41%
Disponibilidade	O processo minerário entra em disponibilidade quando o interessado na exploração não solicita a concessão de lavra. Neste caso, cabe ao DNPM, através de Edital publicado no Diário Oficial da União, professar a disponibilidade da jazida pesquisada, para novo requerimento da concessão de lavra.	13	5,37%
TOTAL-		242	100,00%

Fonte: DNPM, 2011

¹⁹ Síntese do que está descrito no Código Minerário Brasileiro.

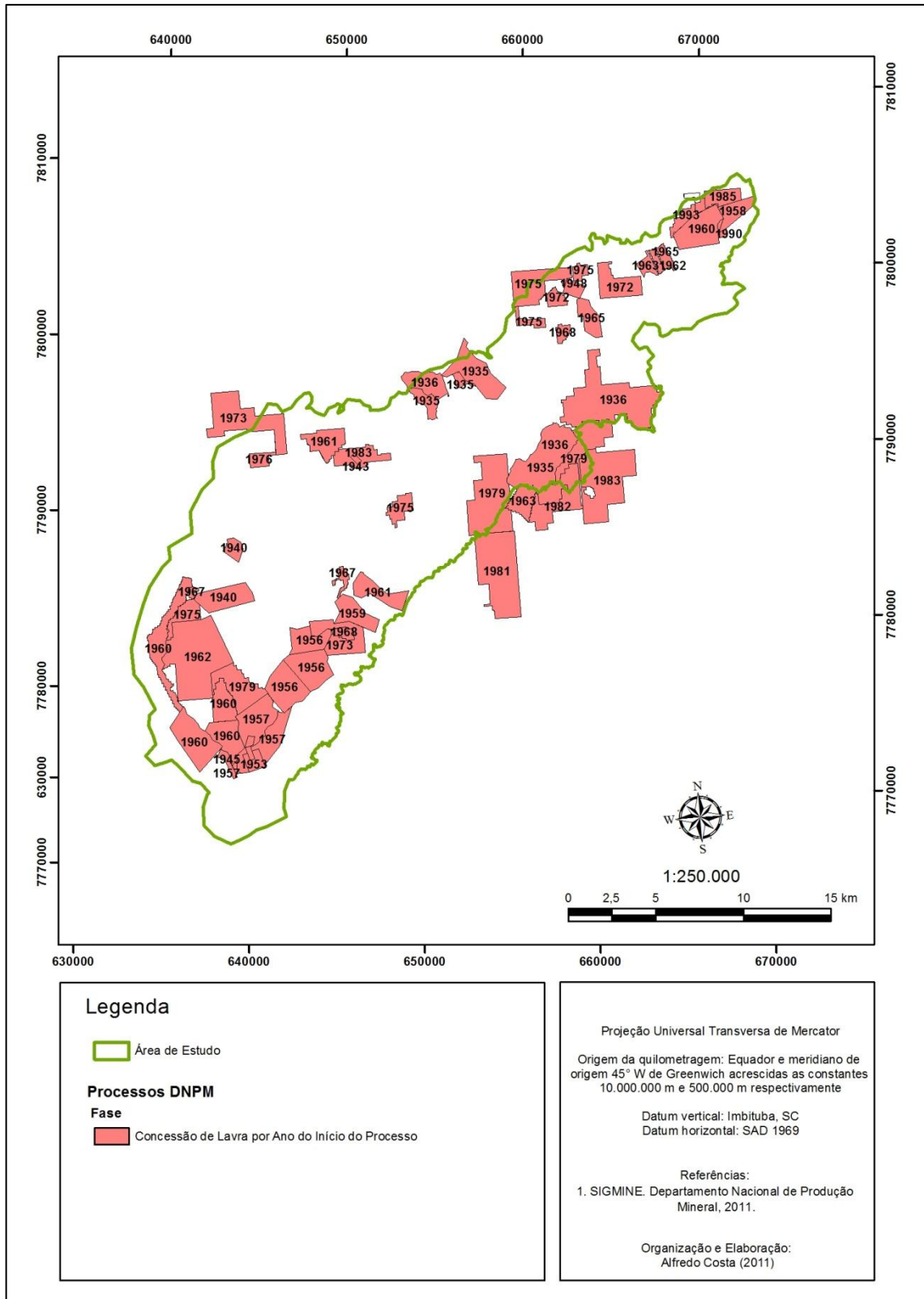


Figura 4.10: Processos DNPM em fase de concessão de lavra na área de estudo até 06 de novembro de 2011.

Tabela 4.6: Número de Concessões de Lavra na Área de Estudo

Proprietário	Número de Concessões de Lavra	%
Vale S A	28	45,2%
Minerações Brasileiras Reunidas S. A.	12	19,4%
Anglogold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S.A.	8	12,9%
Outros	14	22,6%
Total	62	100,0%

Fonte: DNPM, 2011

Esta breve exposição demonstra que esforços reais para a proteção do patrimônio vegetal da Serra do Gandarela urgem. Embora seja perceptível que há intenção de se minerar todo o território do Gandarela, os processos minerários que se encontram em fase mais adiantada localizam-se sobre áreas de campos rupestres canga e sobre áreas de floresta. Embora sejam áreas protegidas por APP, a ausência de mecanismos mais rigorosos e a fragilidade da fiscalização podem significar o prevalecimento dos interesses econômicos, o que resultará em perda de patrimônio paisagístico e de biodiversidade.

4.5 Ocupação

Conforme visto, a história da ocupação do Quadrilátero Ferrífero confunde-se com a história da mineração em Minas Gerais. A exploração aurífera na Serra do Gandarela durante o ciclo do ouro não teve a mesma intensidade que em outras áreas da "região das minas", e, portanto a urbanização observada nestas regiões (como nas atuais Mariana, Ouro Preto ou São João Del Rey) não teve eco na Serra. Ainda assim, o trânsito pelos caminhos da mineração e a exploração do ouro fomentaram o surgimento de alguns povoados na região, que serviram tanto como base para os garimpeiros, como locais produtores de insumos para atividade mineradora.

O melhor exemplo disso na área de estudo é o município de Barão de Cocais. Originalmente chamado de São João do Morro Grande, o então povoado foi inicialmente ocupado por sertanistas a procura de ouro, que ali construíram uma capela em homenagem a São João Batista. O ouro encontrado em abundância atraiu novos moradores, o que motivou a instalação da Paróquia em 1749. Apenas em 1943 é criado o município de Barão de Cocais, emancipado do município de Santa Bárbara (IBGE CIDADES, 2010).

É interessante ressaltar a dinamização econômica pela qual o município passou nas últimas décadas, influenciada principalmente pela aquisição e reativação da usina siderúrgica da Companhia Brasileira de Usinas Metalúrgicas pela empresa Gerdau, que fomentou a criação de empregos e a expansão imobiliária, além da expansão das atividades da mina de Brucutu (Vale S. A.) que, apesar de estar localizada no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, exerce influência direta sobre Barão de Cocais (ALVES & DINIZ, 2009). Além destas, o município conta com outras importantes indústrias de extração mineral e siderurgia, como a Socoimex e a São Bento Mineração, que juntamente à Gerdau e à Vale são os maiores responsáveis pela geração de renda no município.

Outras localidades, como a Vila do Congo e o Arraial de André do Mato Dentro, também remontam ao ciclo do ouro, porém, perderam visibilidade com o declínio da exploração aurífera. Estas e outras localidades identificadas na área de estudo (Figura 4.11) caracterizam-se atualmente e de forma geral como espaços que resultam das novas faces do meio rural. Este “novo” rural é resultado do avanço das relações urbanas sobre áreas tipicamente rurais (CORRÊA, 1995; SOUZA, 2001; SPOSITO, 2006). Tem-se com isso uma nova condição de rural que além de abrigar inéditas formas de uso do solo, abriga também um novo *ethos* (“jeito de ser”), diferente daquele associado às atividades agrícolas (SILVA, 2007).

Nesta perspectiva, estas localidades não podem ser vistas como espaços divergentes – funcional e territorialmente. De certa forma, constituem-se em territórios onde o urbano e o rural se tocam, ou seja, onde a cidade e o campo se misturam criando uma paisagem que guarda elementos dos dois “mundos”²⁰.

Esta realidade é reforçada pelo isolamento geográfico destas localidades. De fato, à exceção da sede de Barão de Cocais, o acesso a estas localidades não é simples, e se dá a partir de estradas de terra mal sinalizadas e de manutenção inconstante, cuja origem de boa parte delas está associada ao início das sondagens na década de 1980. Embora isto represente um aspecto dificultador ao crescimento destas localidades, é em larga medida responsável pela conservação da vegetação na Serra do Gandarela.

²⁰ Cabe ressaltar que não é objeto deste relatório desenvolver a discussão sobre a metodologia adotada no Brasil que define o que é população urbana ou população rural. No entanto, segundo Souza (2001), a metodologia adotada pelo IBGE classifica vilas e *idades* com poucas centenas de habitantes e com nítidas características de aglomerado rural como áreas urbanas. No Brasil a definição de cidade é dada pela Decreto-Lei 311, de 1938: o referido Decreto contribuiu para tornar pequenos povoados em cidades, atendendo muito mais a interesses políticos e partidários do que a um critério conceitual, que levasse em consideração as características estruturais e funcionais dos lugares.

De fato, boa parte do Gandarela apresenta baixíssima ocupação, como pode ser visualizado nas Figura 4.12 e Figura 4.13. A análise da população residente por setores censitários (IBGE, 2010) demonstra que na área de estudo a sede de Barão de Cocais concentra a maior parte dos habitantes, e que a população dos setores diminui na medida em que a distância à sede municipal aumenta. Além disso, observa-se que entre 2000 e 2010, a população ali residente cresceu de 32.885 para 34.997 habitantes, o que representou crescimento de 6,4% no período, inferior ao da Região Metropolitana de Belo horizonte (12,3%) e ao de Minas Gerais (9,4%). É interessante notar que, a despeito do tamanho dos setores censitários, a população neles relatada fica concentrada em suas localidades, de modo que a maior parte de suas áreas são, na realidade, vazios populacionais.

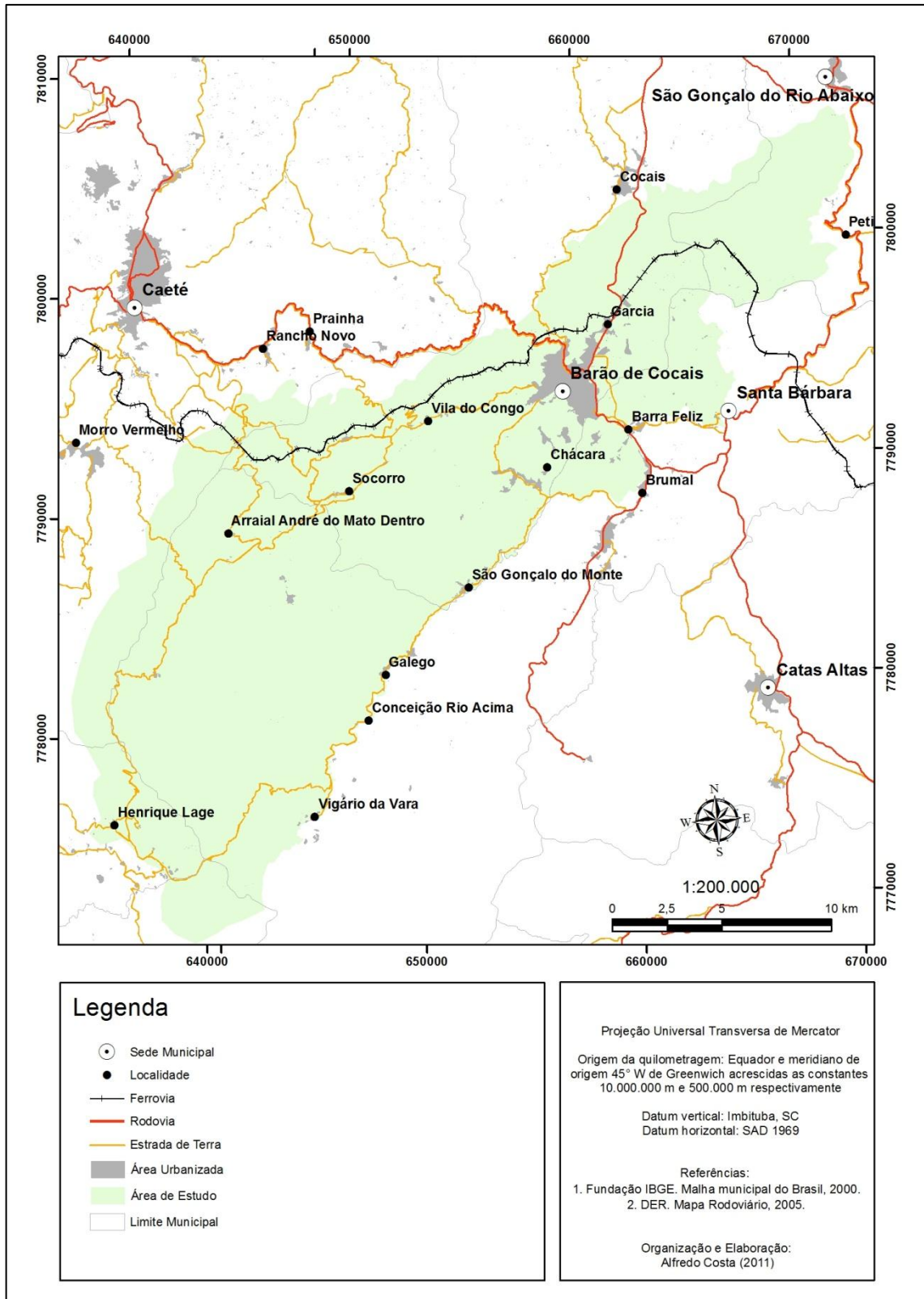


Figura 4.11: Principais localidades e acessos inseridos na área de estudo

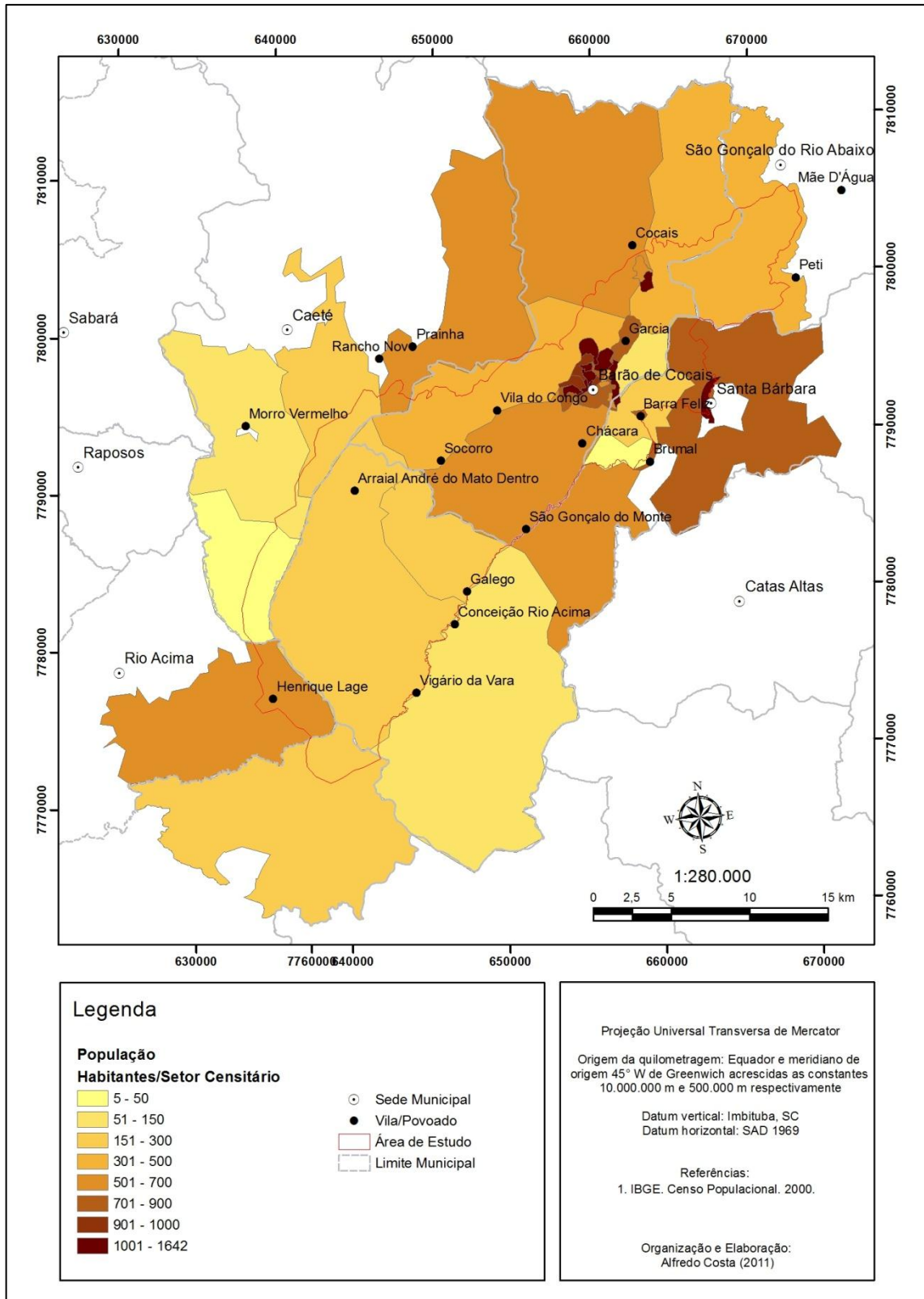


Figura 4.12: População total por setores censitários da área de estudo, ano 2000.

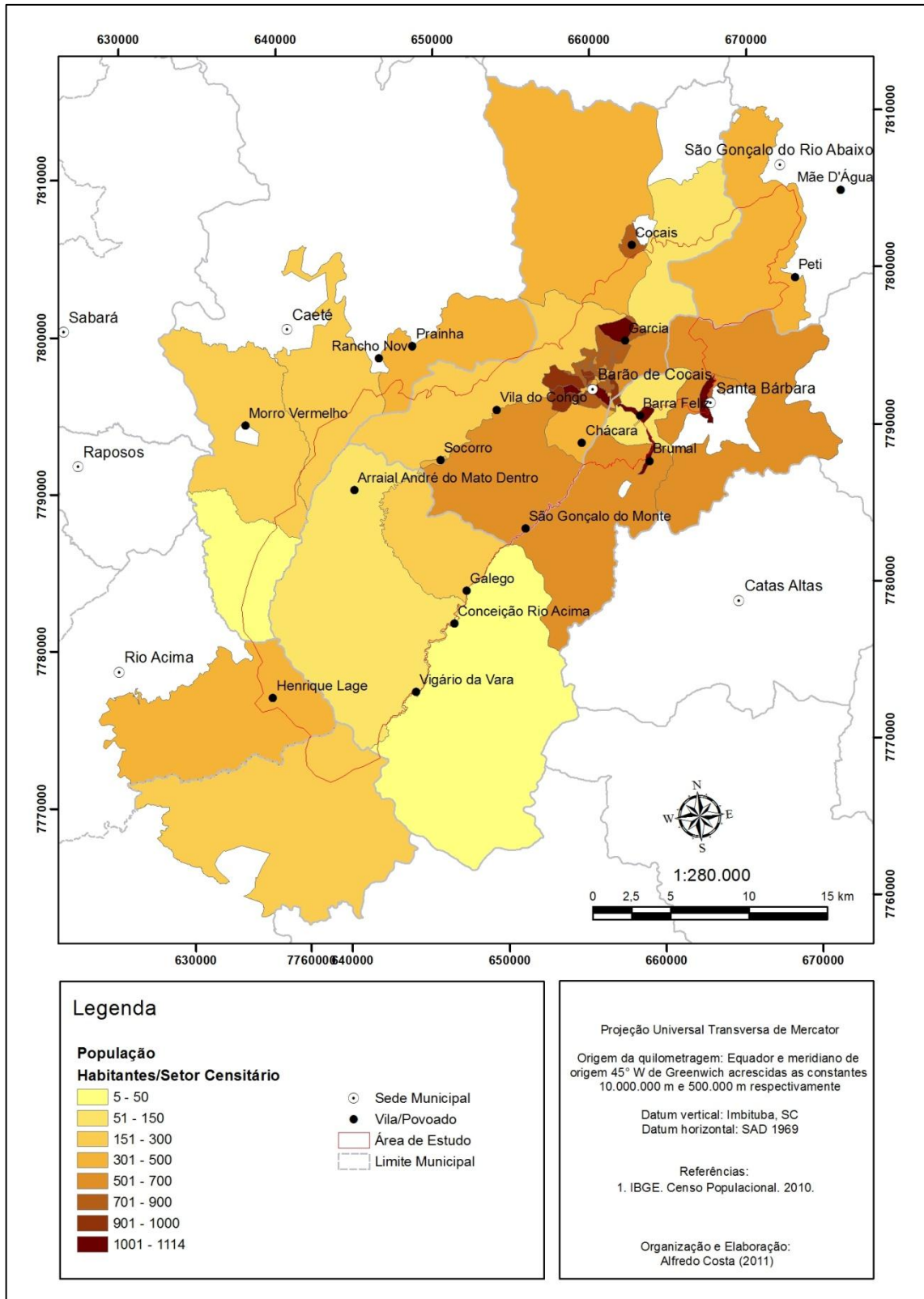


Figura 4.13: População total por setores censitários da área de estudo, ano 2010.

5. EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO NA SERRA DO GANDARELA

Este tópico traz os resultados e análise do mapeamento de uso do solo da área de estudo referente aos anos de 1987, 1994, 2003 e 2010, considerando as feições reflorestamento, floresta, campo, corpo hídrico, cultivo, mineração e área habitada, conforme descrito na metodologia. A análise dos dados obtidos será feita em quatro fases: uma primeira, em que é apresentado um breve panorama do que foi verificado na área de estudo nos passos temporais adotados; uma segunda, em que a evolução de cada uso e cobertura é analisado separadamente; uma terceira, em que a análise é feita com base em métricas de paisagem; e finalmente uma quarta, que resgata os fatores impulsionadores da evolução do uso e cobertura do solo observados na Serra do Gandarela.

5.1 Breve Panorama da Evolução do Uso do Solo na Serra do Gandarela

Em 1987, dos 45.816 hectares considerados, as coberturas de floresta representam 62,26% (28.525,5 ha), as de campo representam 16,88% (7.734,5 ha), e as de água representam 0,46% (209,3 ha) do território analisado. Os usos do território pelos cultivos representaram 14,2% (6.504,0 ha), o uso pela mineração representou 0,16% (71,6 ha), o uso pelo reflorestamento foi de 3,99% (1.828,1 ha) e o uso para habitação humana representou 2,06% (942,9 ha) (Tabela 5.1, Tabela 5.2, Figura 5.1 e Figura 5.2).

De 1987 a 1994, a cobertura de florestas apresentou perda de 2.352 hectares (-8,25%), e passaram a representar 57,13% da área de estudo. As áreas de campo apresentaram variação positiva de 1,77%. Os corpos hídricos apresentaram variação positiva de 3,38% (7,1 ha), e passaram a representar 0,47%. Em relação aos usos, os cultivos apresentaram avanço de 1.214 hectares, o que representou um crescimento de 18,67%. O uso do solo pela atividade de mineração apresentou crescimento de 264,12% (189,2 ha), embora espacialmente tenha baixa representatividade, de 0,57%. O reflorestamento, por sua vez, apresentou crescimento de 21,99% (402 hectares), e passou a representar 4,87% do território estudado. Por fim, a área habitada avançou em 42,73% (402,9 ha) (Figura 5.3).

Já de 1994 a 2003, a cobertura de florestas continuou apresentando perdas, porém, de maneira menos intensa, de 0,25% (138,2 ha). As áreas de campo, por sua vez, apresentaram perdas

bem mais significativas, de 6,58% (518,2 ha). Os corpos hídricos aumentaram na mesma proporção do período anterior, em 3,39% (7,3 ha), e passaram a representar 0,49% da área de estudo, diferença pouco significativa se comparada ao período anterior. As áreas de cultivo apresentaram ligeiro recuo, de 1,93% (107 ha), que foram substituídos por outros usos, como a mineração, que apresentou crescimento de 72,71% (189,6 ha), passando a ocupar 0,98% do território estudado. As áreas de reflorestamento cresceram em 6,2% (138,2 ha) e as áreas habitadas em 26,33% (353, ha) (Figura 5.4).

Entre 2003 e 2010, as coberturas de floresta apresentaram perda de 7,41% (1.935,5 ha), e passaram a representar 52,76% da área de estudo. Os campos, por sua vez, apresentaram recuperação de 3,17% (233 ha), e as coberturas de água cresceram em 103% (232,1 ha) em razão da construção da barragem da mina de Brucutu, região nordeste da área de estudo. Os cultivos também apresentaram avanço, de 8,24% (627 ha), e a mineração apresentou o maior crescimento no período analisado, de 178,66% (804,6 ha), associados à expansão das minas de Brucutu e Gongo Soco. Os reflorestamentos apresentaram decréscimo de 19,31% (457,5 ha), associado ao corte do eucalipto em diversas áreas, e as áreas habitadas cresceram em 29,16% (495,7 ha) (Figura 5.5).

No computo geral, de 1987 a 2010, as coberturas de florestas e campos sofreram diminuição de sua área em 15,26% e 1,92%, totalizando perda de 4.500,6 hectares. Os demais temas pesquisados apresentaram crescimento, sendo a água em 117,77%, o cultivo em 26,67%, a mineração em 1.652,36%, o reflorestamento em 4,53% e as áreas habitadas em 132,88%.

Tabela 5.1: Evolução do uso e cobertura do solo em valores absolutos.

Classe	Área (ha)			
	1987	1994	2003	2010
Reflorestamento	1.828,1	2.230,1	2.368,3	1.910,9
Floresta	28.525,5	26.172,9	26.108,6	24.173,1
Campo	7.734,6	7.871,6	7.353,3	7.586,3
Corpo Hídrico	209,3	216,4	223,8	455,9
Cultivo	6.504,0	7.718,4	7.611,4	8.238,8
Mineração	71,6	260,8	450,4	1.255,0
Área Habitada	942,9	1.345,9	1.700,2	2.195,9
Total	45.816,0	45.816,0	45.816,0	45.816,0

Tabela 5.2: Taxas de crescimento do uso e cobertura do solo no período analisado.

Classe	Taxa de crescimento no período (%)			
	1987 - 1994	1994 - 2003	2003 - 2010	1987 - 2010
Reflorestamento	21,99%	6,20%	-19,31%	4,53%
Floresta	-8,25%	-0,25%	-7,41%	-15,26%
Campo	1,77%	-6,58%	3,17%	-1,92%
Corpo Hídrico	3,38%	3,39%	103,74%	117,77%
Cultivo	18,67%	-1,39%	8,24%	26,67%
Mineração	264,12%	72,71%	178,66%	1652,36%
Área Habitada	42,73%	26,33%	29,16%	132,88%

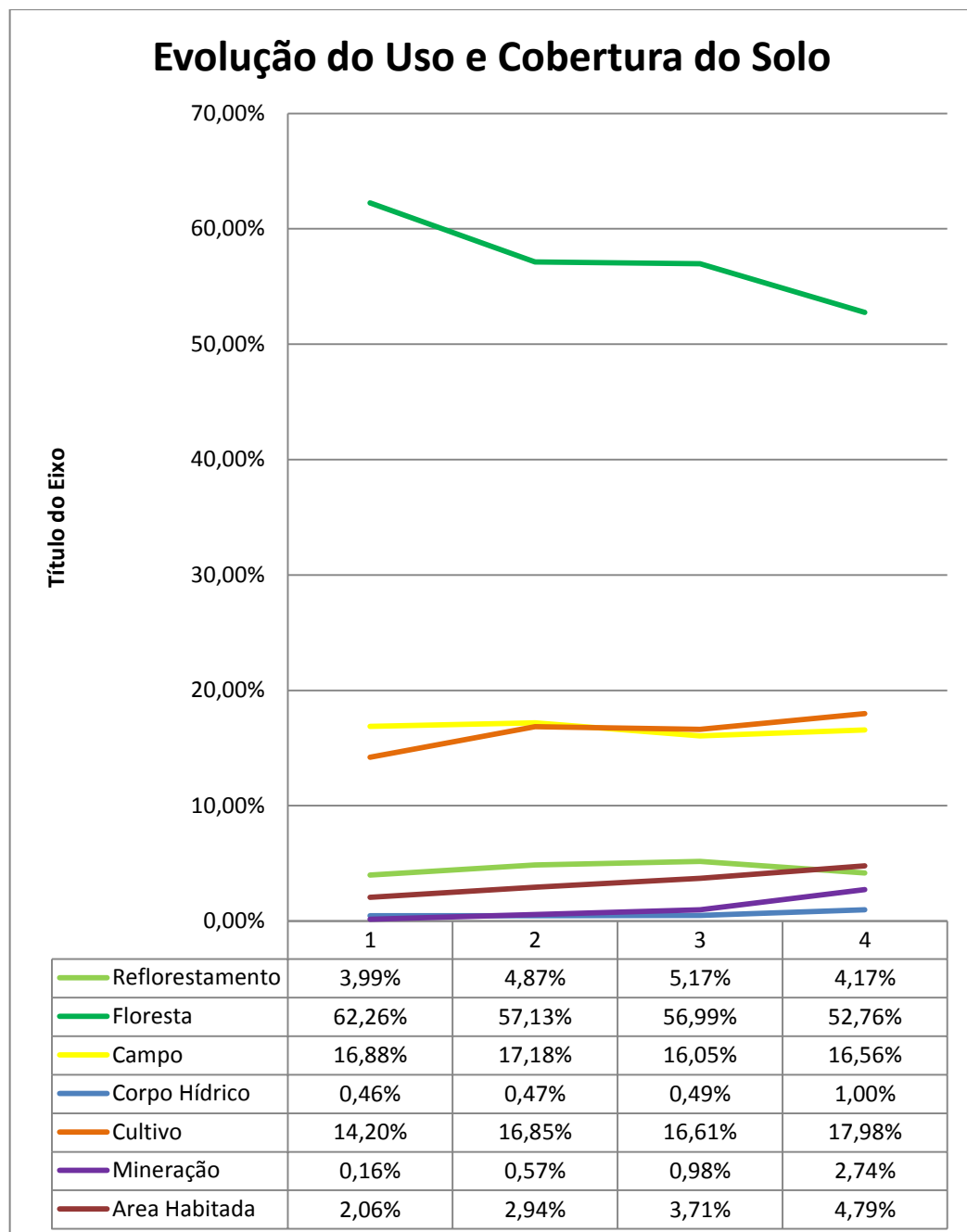


Figura 5.1: Evolução do uso e cobertura do solo em porcentagem da área ocupada.

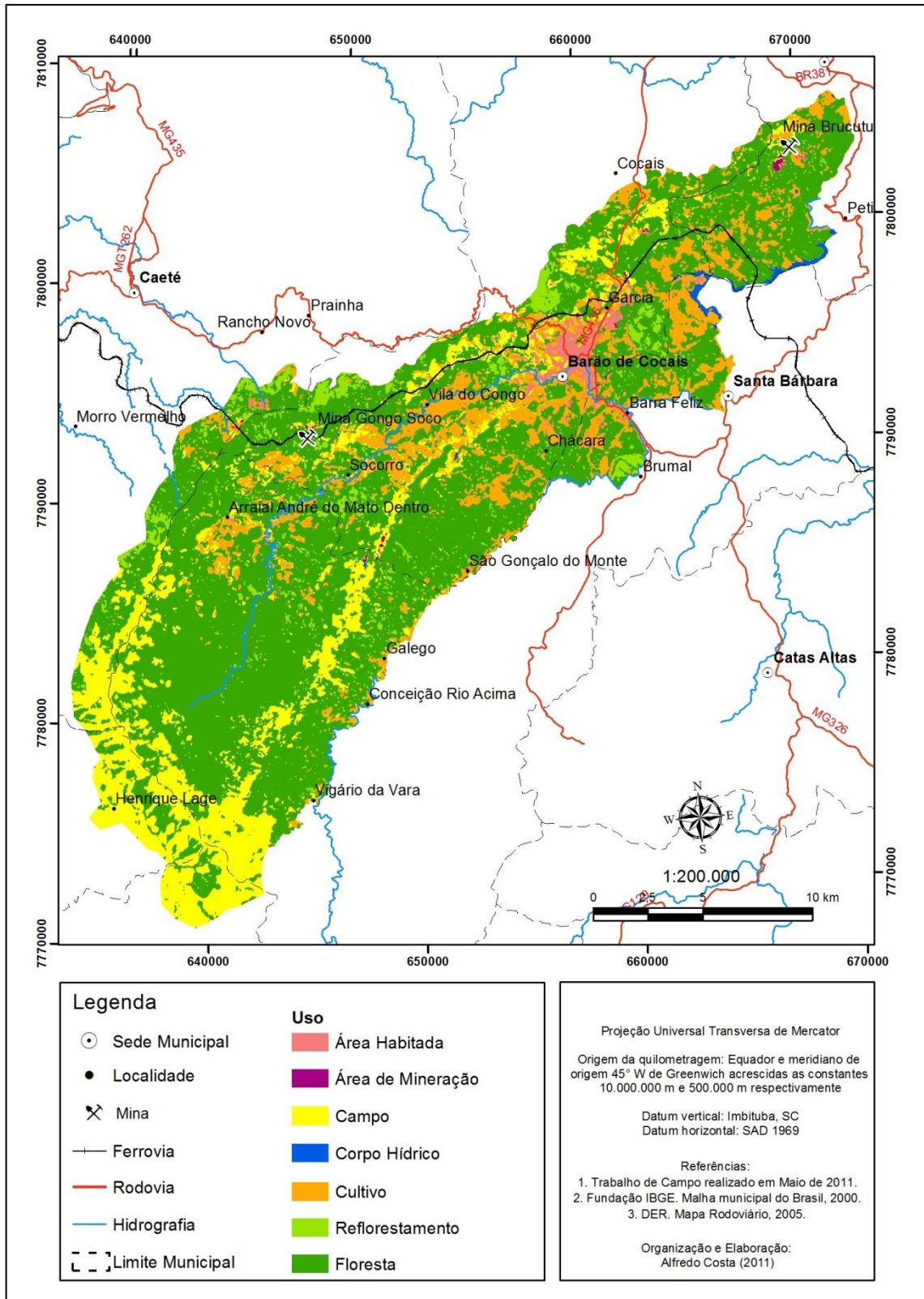


Figura 5.2: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 1987.

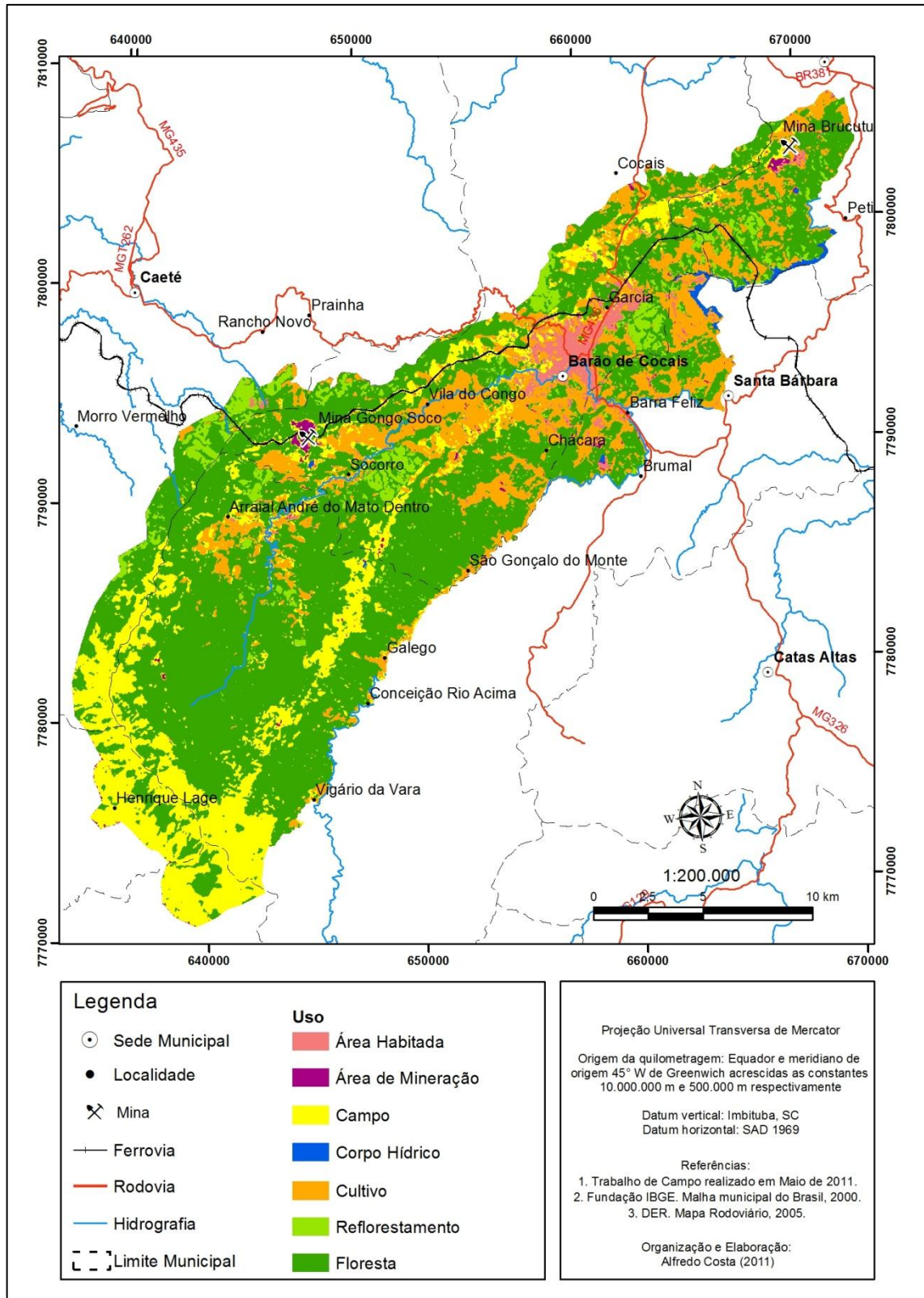


Figura 5.3: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 1994.

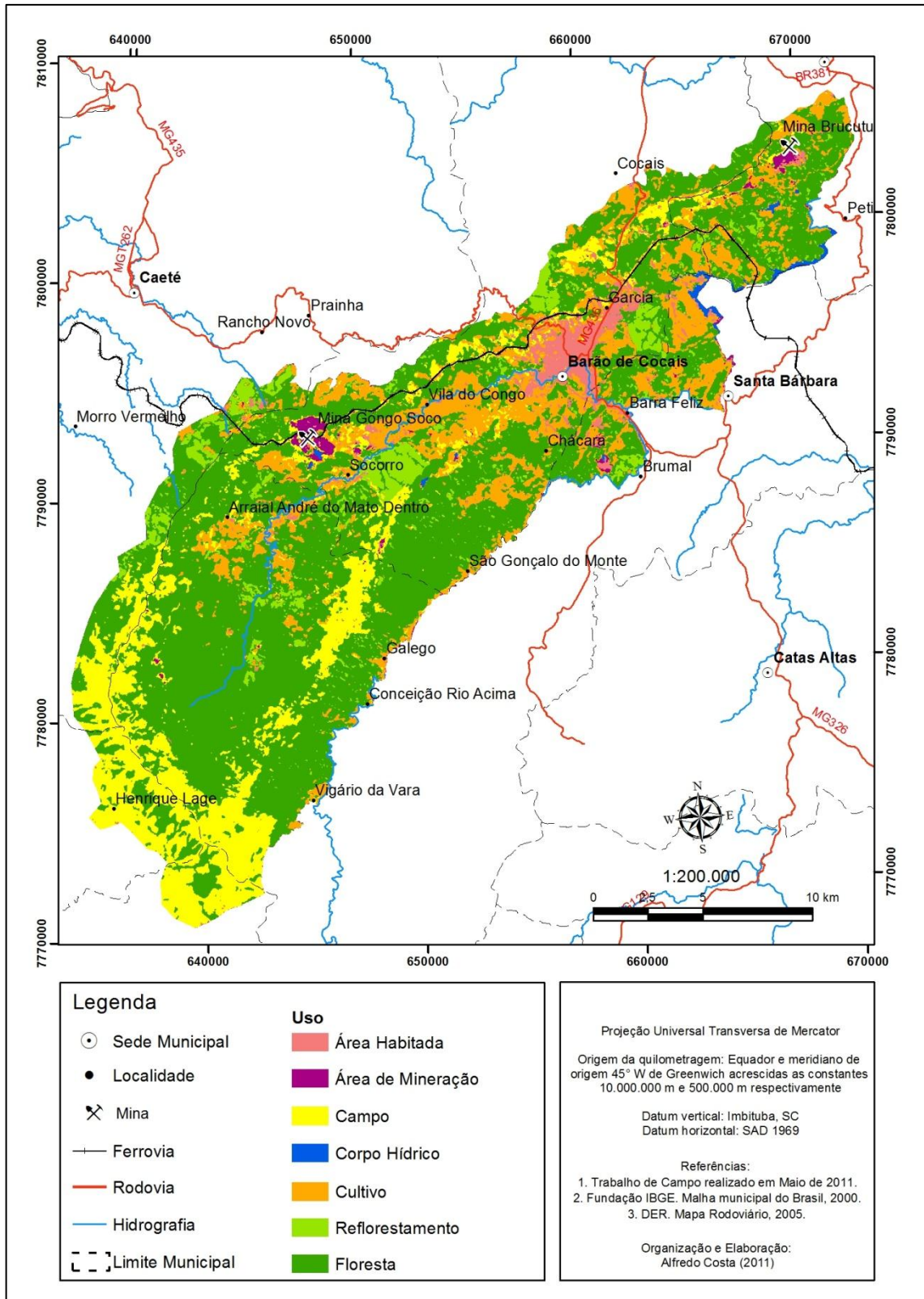


Figura 5.4: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 2003.

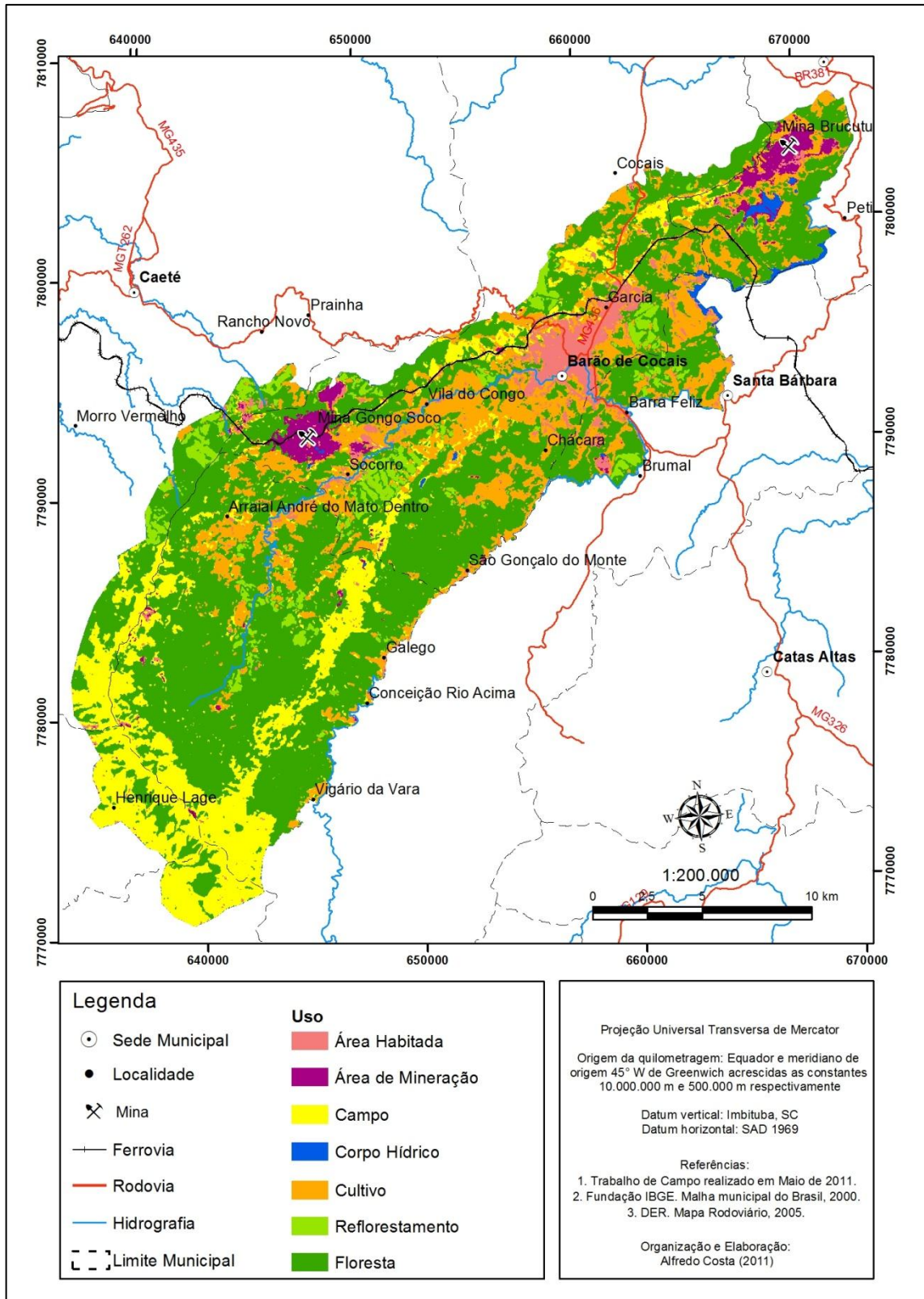


Figura 5.5: Uso e cobertura do solo na área de estudo em 2010.

5.2 Uso e Cobertura do Solo na Serra do Gandarela: Análise por Tema Mapeado

A análise da evolução do uso e cobertura do solo na Serra do Gandarela entre os anos de 1987 a 2010²¹ demonstrou, em primeiro lugar, o predomínio da cobertura de florestas²² - superior a 50% - em todo o período, sobretudo nas Cristas Intermediárias, nas Escarpas Interiores e Exteriores, em que há baixa densidade populacional e são raros os acessos. Entretanto, foram as florestas que proporcionalmente obtiveram maiores perdas territoriais, pois sua área diminuiu em 15,26% no período analisado, o que representou uma perda de aproximadamente 4.350 hectares. Os principais usos que influenciaram neste decréscimo foram o cultivo de pastagens e as atividades de reflorestamento de eucalipto, com maior intensidade, na borda nordeste e na região sudeste interior ao sinclinal; e da mineração, em menor intensidade, nas áreas ocupadas pelas minas de Brucutu e Gongo Soco (Tabela 5.3, Tabela 5.4 e Tabela 5.5, ao final do tópico).

Na região sudeste inferior ao sinclinal é possível observar, ao longo dos quatro passos temporais, a paulatina fragmentação florestal em razão da interiorização das práticas de cultivo e reflorestamento em pequena escala às margens dos rios, ao passo que a proximidade das vias e da sede Barão de Cocais - e, portanto, de sua frente de urbanização - são os possíveis impulsionadores das grandes manchas de reflorestamento e cultivo observados na borda nordeste da área de estudo. Nas bordas norte e leste, a perda florestal se deu respectivamente pela implantação das minas de Gongo Soco e Brucutu em escala industrial.

As áreas de campos, por sua vez, concentram-se nas regiões de maior altimetria, nas formações ferríferas localizadas nos Cristais Superiores e nos Cristais Superiores com feições cársticas, em sua maior parte em áreas de proteção permanente (topos), com acessibilidade limitada, cuja maior parte dos acessos foi criado para sondagens e é de difícil tráfego, além de apresentar baixa densidade populacional. Encontram-se melhor preservados nas regiões

²¹ As estatísticas a respeito da classificação, incluindo a matriz de confusão e os índices de acerto das classificações podem ser visualizados no Anexo 3.

²² É importante ressaltar que áreas de reflorestamento de eucalipto antigas tem resposta espectral muito semelhante à das matas nativas devido ao seu vigor, diferentemente de áreas novas de reflorestamento. Isso acontece porque o eucalipto jovem absorve muita água para seu desenvolvimento, o que reflete em uma alta resposta espectral de sua copa nas bandas 3 e 4 do sensor TM do Landsat, o que permite sua diferenciação das florestas naturais. Quando atinge a maturidade, o eucalipto absorve uma quantidade de água semelhante a de florestas naturais e sua copa passa a apresentar vigor vegetativo semelhante ao de florestas naturais. Deste modo, a despeito do esforço de campo, é possível que algumas manchas de reflorestamento tenham sido mapeadas como remanescentes florestais.

centro e sudeste, e sofreram maiores transformações nas bordas norte e nordeste da área de estudo.

A cobertura de campo apresentou baixa variação no período analisado, motivada principalmente pelo avanço do cultivo nas escarpas interiores da borda norte e pela atividade de mineração pelas minas de Gongo Soco e Brucutu nas cristas em que se localizam. Apesar da baixa representatividade desta supressão no período analisado, de 1,92% (143 hectares), a sua localização sobre as formações ferríferas, associada à rigidez locacional da atividade minerária representa um forte risco à sua preservação. A observação do mapa de concessões de lavra demonstra com clareza a iminente supressão dessas áreas, inclusive naquelas áreas em que os campos encontram-se melhor preservados. A variação observada entre campo e floresta se deve exclusivamente à confusão gerada durante a classificação, em razão da ecóclina entre as florestas e os campos, caracterizado pela vegetação savânica, o que não prejudica a análise.



Foto 1: Campo - Vegetação Rupestre sobre Canga



Foto 2: Floresta - Vista para Área de Florestas na porção central da área de estudo



Foto 3: Campo - Área de Campo Rupestre no Topo da Serra do Gandarela



Foto 4: Floresta - Área de cultivo no primeiro plano e florestas no segundo plano

As áreas cobertas por corpos hídricos variaram muito pouco entre 1987 e 2003, - sendo representado sobremaneira por uma porção da represa de Peti²³, incluída na área de estudo, localizada na porção leste da área de estudo, - mais das vezes em razão da construção de pequenos açudes para uso agrícola e de atividades minerárias de pequena escala. Entre 2003 e 2010 a cobertura de água na área de estudo dobrou em razão da construção da barragem de Brucutu na região nordeste da área de estudo, fruto da expansão da mina de Brucutú, e ocupou áreas de floresta, cultivo e reflorestamento. É interessante ressaltar que a instalação de outros empreendimentos minerários de grande porte poderão definir novas manchas de água na paisagem, como exigência ao processamento do minério extraído.

Áreas cobertas por cultivos²⁴ foram identificadas em toda área de estudo, em diferentes escalas, e representam em sua grande maioria áreas de pastagem, principalmente na Depressão do Ribeirão Socorro e da Depressão do Ribeirão Conceição. Na primeira podem ser observadas grandes e médias manchas mais próximas ao talvegue do Ribeirão Socorro, ao passo que manchas pequenas e esparsas podem ser visualizadas nas regiões mais elevadas da bacia. Já na porção da área de estudo inserida na Depressão do Ribeirão Conceição predomina agricultura familiar praticada nas localidades de Vigário da Vara, Conceição do Rio Acima, Galego, São Gonçalo do Monte.

A evolução das áreas de cultivo se deu majoritariamente sobre áreas de floresta e, de maneira menos intensa, sobre as áreas de campo. O recuo das áreas de cultivo observado em 2003 se deve principalmente ao avanço das áreas de mineração sobre áreas originalmente utilizadas para pastagens.

²³ A represa de Peti foi instalada em 1946 e serve à usina de PETI, de propriedade da Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG), com potência instalada de 9,400 Mw (Fonte: http://www.cemig.com.br/_layouts/usinas/wp_usinas_interna.asp?codigo=44).

²⁴ Devido ao tamanho do pixel das imagens Landsat utilizadas (30 metros), as edificações rurais, geralmente pequenas e esparsas, muitas vezes foram classificadas como cultivo.



Foto 5: Corpo Hídrico - Lagoa nas Proximidades da Mineração Extramil



Foto 6: Cultivo - Áreas de cultivo em André do Mato Dentro



Foto 7: Cultivo - Área de pastagem na porção norte da área de estudo



Foto 8: Cultivo - Cultura de subsistência no povoado de Cruz dos Peixotos

As áreas dedicadas a atividades da mineração apresentaram crescimento de 1.652% no período analisado, tendo sua área original em 1987 de 71,6 hectares transformada em 1.225 hectares em 2010. Embora tenha apresentado crescimento significativo, a área ocupada pela mineração representa apenas 2,74% da área de estudo, concentrada principalmente na Serra do Tamanduá (Mina de Brucutú) e na Serra do Gongo Soco (Mina de Gongo Soco), sobre os Cristais Superiores das Formações Ferríferas, e em menor escala na Serra do Maquiné e na Serra da Pedra. Observa-se que a atividade mineradora substituiu regiões de campos e florestas, mas também de cultivos, em sua maioria pastagens.

As áreas habitadas da área de estudo concentraram-se majoritariamente nas porções mais baixas do relevo, parte na Depressão do Rio Socorro e parte nas Escarpas Interiores, em que se localiza a sede de Barão de Cocais, e de maneira minoritária através de pequenas manchas espalhadas pela área de estudo associadas, prioritariamente, a áreas de cultivo. A evolução deste tipo de uso está intimamente ligada ao crescimento populacional urbano do município

de Barão de Cocais, cuja expansão acompanha o vale do rio São João e é regulada pelo relevo regional. As demais áreas classificadas como habitadas estão associadas em sua maioria a pequenos núcleos rurais - alguns deles centenários, como o Arraial André do Mato Dentro, a vila do Socorro e o povoado de Conceição do Rio Acima - e em sua minoria às edificações associadas à atividade mineradora. Ressalta-se que estradas com edificações em suas adjacências também foram classificadas como área habitada.



Foto 9: Área Habitada - Vista de Barão de Cocais



Foto 10: Área Habitada - Vista de Barão de Cocais



Foto 11: Área Habitada e Reflorestamento-
Carvoaria em André do Mato Dentro



Foto 12: Área Habitada - Casa de apicultor em
André do Mato Dentro

Quanto às áreas de reflorestamento, foram identificados dois tipos predominantes: áreas de produção em escala industrial voltada a produção de carvão para atender às indústrias metalúrgicas e siderúrgicas da região do Vale do Aço, e para a produção de celulose, realizada principalmente pela empresa Cenibra²⁵, concentradas na Depressão do Ribeirão Socorro e nas

²⁵ Celulose Nipo-brasileira (CENIBRA), fundada em 1973 e que atua em 54 municípios, incluindo Caeté, Barão de Cocais, Santa Bárbara, São Gonçalo do Rio Abaixo, municípios interceptados pela área de estudo. (Fonte: <http://www.cenibra.com.br/>).

Escarpas Interiores; e áreas de produção em escala familiar, realizada na proximidade dos povoados rurais como alternativa de fonte renda, localizadas nas cristas intermediárias e na Depressão do Ribeirão Conceição. No segundo caso, o plantio de eucalipto funciona como investimento, ou seja, só é cortado quando o mercado está favorável ou quando há necessidade de renda por parte das famílias. Nas proximidades de André do Mato Dentro, por exemplo, as plantações de eucalipto são utilizadas em associação à apicultura para produção de mel. Esta prática é comum nos povoados da região, que vendem parte da sua produção de maneira artesanal e parte para a empresa Mel Santa Bárbara²⁶, localizada no município de Santa Bárbara (MG).

Os reflorestamentos²⁷ ocupam área superior a da mineração, porém, seu ritmo de crescimento na área de estudo foi baixo, principalmente em razão de que as áreas utilizadas para reflorestamento geralmente são reutilizadas, conforme capacidade de recuperação do solo. Apesar disso, as áreas mais utilizadas para expansão do eucalipto foram as de florestas, se resalta a interiorização deste uso e dos cultivos na região sudeste interior ao sinclinal, que concentra a maior mancha de florestas da área de estudo. O decréscimo na atividade de reflorestamento observado no período 2003 a 2010 deve-se muito provavelmente à extração de madeira destas áreas, que foram reclassificadas como áreas de cultivo, uma vez que não há como prever qual será o uso da terra após o corte.



Foto 13: Reflorestamento - Reflorestamento as margens do acesso para a mineração MSOL



Foto 14: Reflorestamento - Áreas de depósito de corte de reflorestamento

²⁶ A empresa Mel Santa Bárbara foi fundada em 1982 e é importante produtora de mel em Minas Gerais.

²⁷ Uma vez que as áreas dedicadas ao reflorestamento que apresentaram corte recente têm resposta espectral semelhante às demais áreas de cultivo (portanto automaticamente classificadas na categoria cultivo), realizou-se a reclassificação destas áreas no pós-processamento, a partir da verificação do mapeamento e da experiência em campo.

5.3 Uso e Cobertura do Solo na Serra do Gandarela: Análise a Partir de Índices Estruturais da Paisagem

Conforme demonstrado na revisão bibliográfica, a análise de índices estruturais da paisagem é interessante ao refinamento da análise das transformações na paisagem. Foram calculados para os quatro períodos analisados o número de manchas, o tamanho médio das manchas, o desvio padrão das áreas das manchas por classe selecionada, o total de bordas e o índice de forma média²⁸. Conforme sugerido por Lourenço (2009), a análise destes índices será feita ao nível de paisagem e ao nível das classes, sendo que este último será analisado com maior vigor.

A análise do número de manchas ao nível da paisagem demonstra o decréscimo do número de manchas de 1987 a 1994, provavelmente associado à diminuição do número de manchas de campo, que está fortemente associado à instalação de Gongo Soco e Brucutú, e de maneira mais branda à expansão da sede de Barão de Cocais. O avanço do cultivo e das áreas habitadas no intervalo entre 1994 e 2003 resultou em um sensível aumento no número de manchas, que se manteve constante em 2010. No caso das florestas, o aumento do número de manchas está fortemente associado à sua fragmentação ao longo do período analisado. Vale a pena ressaltar que a construção da barragem de Brucutu, bem como de pequenos açudes isolados, representou um salto no número de manchas de corpos hídricos identificadas em 2010 (Figura 5.6).

²⁸ Aqui serão apresentados os dados em gráficos, somente. Os dados completos encontram-se no Anexo 4.

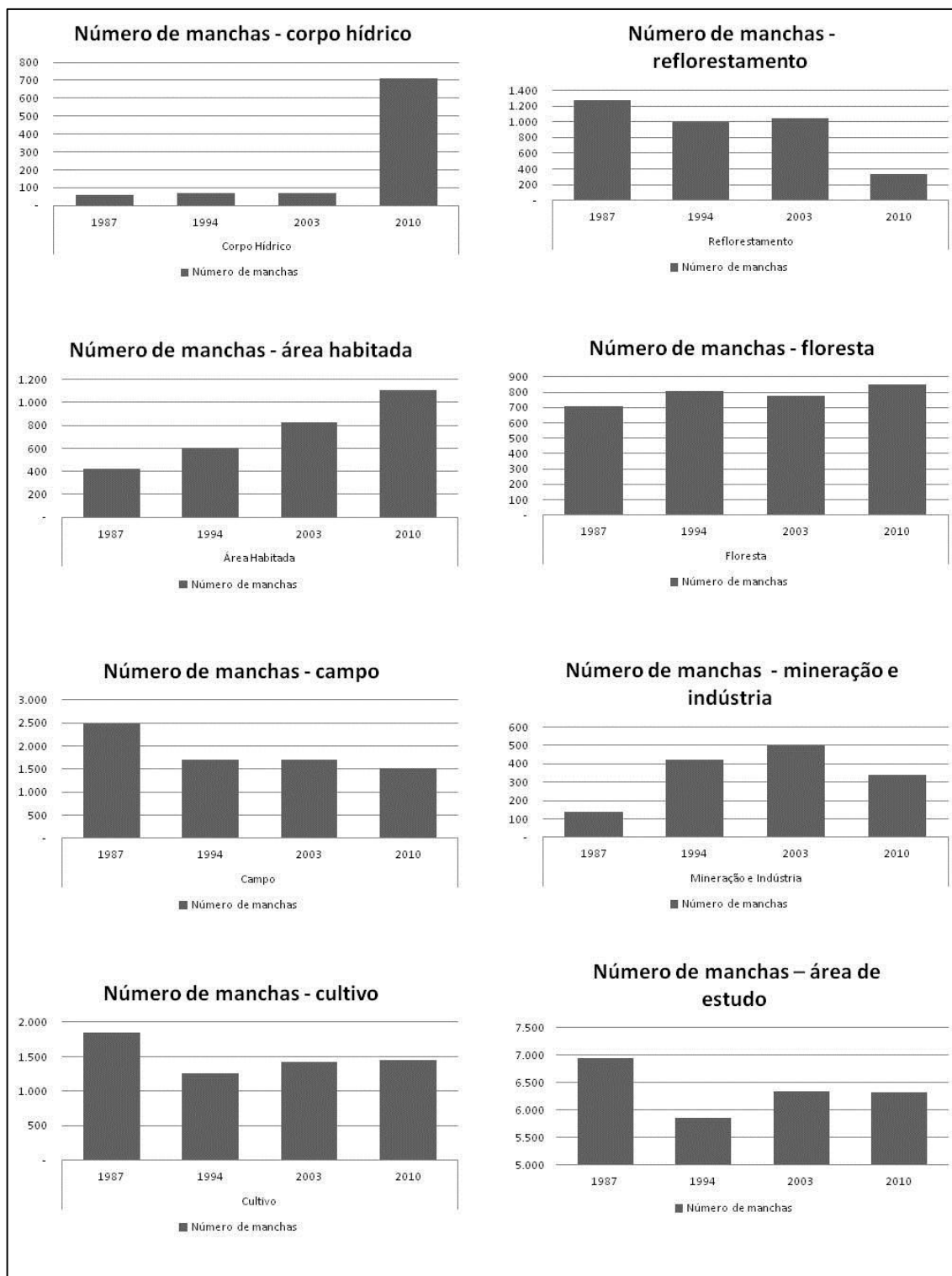


Figura 5.6: Evolução do índice "número de manchas" ao nível da classe de uso do solo e ao nível da área de estudo (1987 – 2010)

A análise do tamanho médio das manchas por classe demonstrou o sensível crescimento das áreas e mineração e reflorestamento, ao passo que as manchas de cultivo, área habitada, e corpos hídricos apresentaram decréscimo de tamanho médio, possivelmente relacionado ao

processo lento de expansão destes usos. A cobertura de florestas, além de ter demonstrado o aumento no número de manchas, também demonstrou a diminuição do seu tamanho médio, o que comprova a tendência a sua fragmentação. Já as manchas de campo, embora tenham apresentado decréscimo em seu número, apresentaram o aumento do seu tamanho médio, possivelmente associado ao isolamento e capacidade de resiliência dos grandes fragmentos campestres (Figura 5.7).

A análise do gráfico de desvios padrões para as classes analisadas demonstra que a variação entre o tamanho das manchas no contexto de suas classes variou pouco para corpos hídricos, área habitada, campo, cultivo e eucalipto. No caso das áreas de uso pela mineração, observa-se que em 2010 há uma maior gama de tamanho de manchas, possivelmente devido às proporções que as minas de Gongo Soco e Brucutú ganharam no período, bastante diferentes do padrão de mineração observado nos anos pregressos. As florestas, por sua vez, apresentaram uma queda no desvio padrão de suas manchas, informação que quando associada ao aumento no número de manchas e à diminuição no tamanho médio das manchas, demonstra que muito possivelmente os pequenos fragmentos de florestas estão sendo substituídos por usos diversos, ao passo que o avanço do destes mesmos usos são responsáveis pela diminuição das grandes manchas (Figura 5.8).

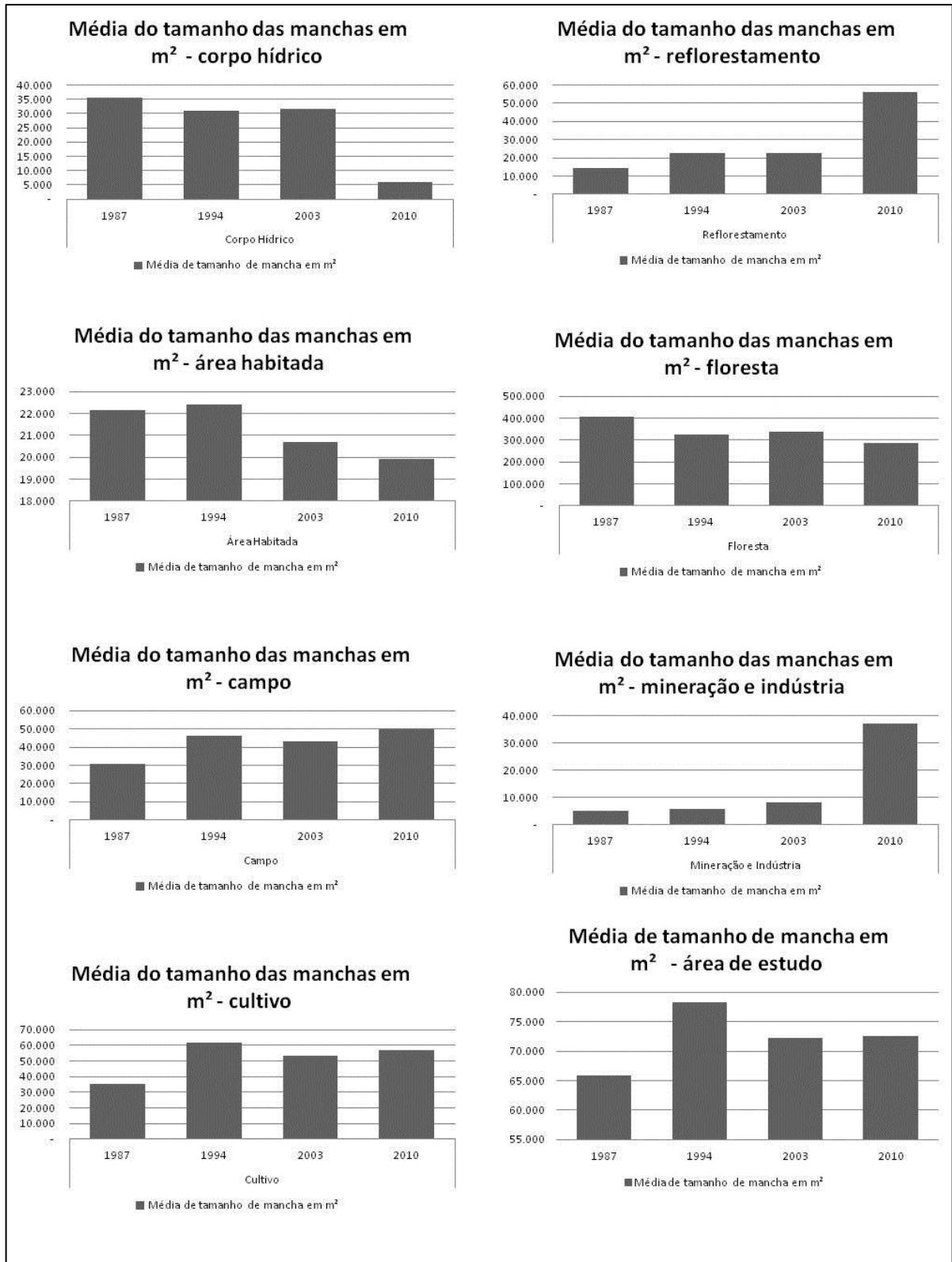


Figura 5.7: “Dimensão média das manchas” de cada classe de uso do solo (ha) e ao nível da área de estudo (1987 – 2010)

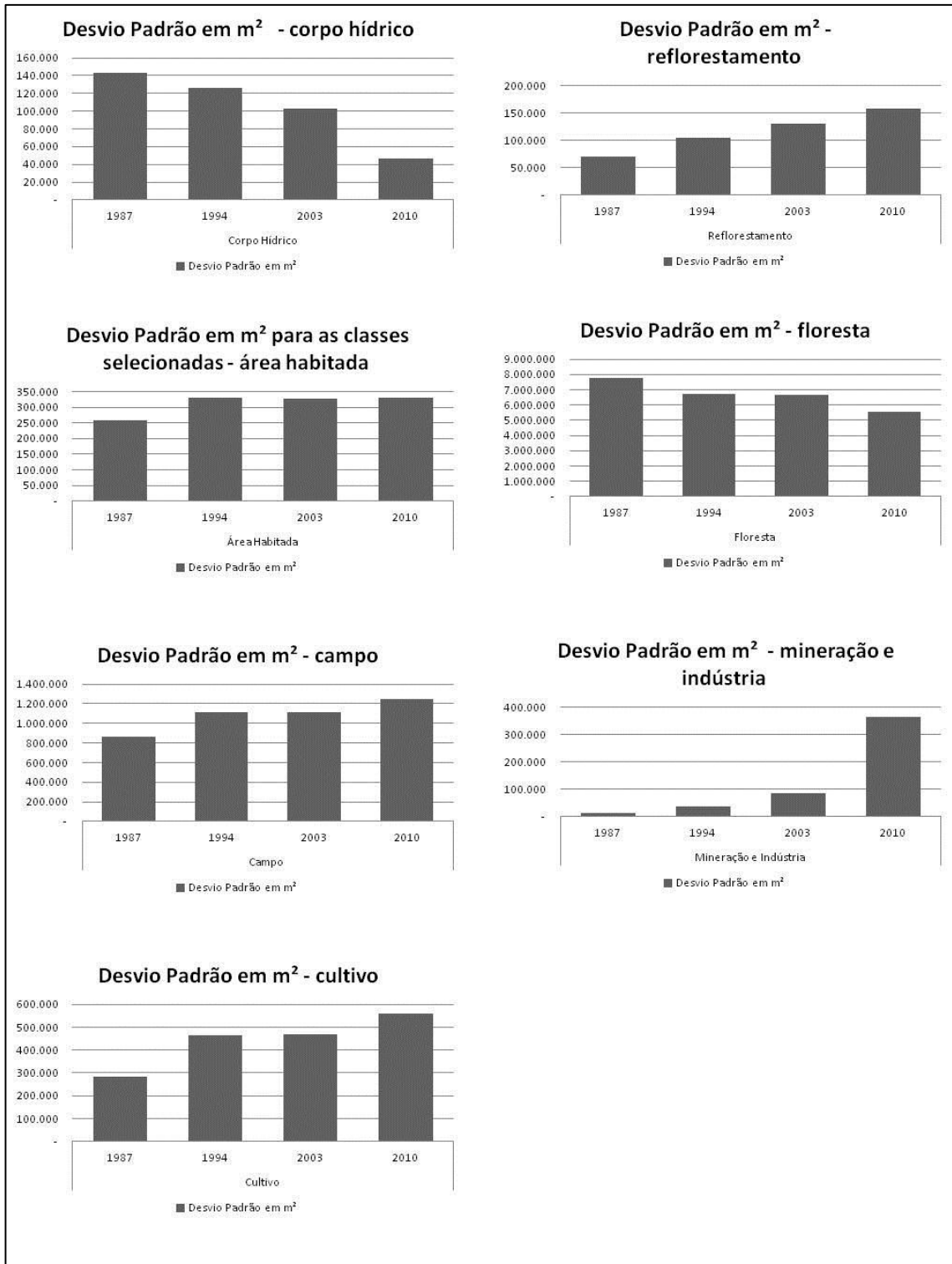


Figura 5.8: Evolução do índice “desvio padrão da dimensão das manchas” ao nível da paisagem (1987 – 2010)

Conforme relata Lourenço (2009), o número de manchas na paisagem é proporcional ao número de bordas na mesma, fato observado na figura 5.8. Confirma-se portanto o processo de homogeneização da paisagem entre 1987 e 1994, e da paulatina fragmentação da mesma a

partir do avanço dos usos sobre as grandes manchas de florestas, que tiveram sua borda diminuída ao longo do período analisado. É possível verificar que os usos mineração, cultivo e área habitada apresentaram crescimento de suas bordas no período. Apesar do número de manchas de cultivo ter apresentado baixa variação e do número de manchas de mineração ter diminuído entre 2003 e 2010, a borda dos mesmos aumentou, o que pode significar a fusão de suas manchas em diversas escalas, e o conseqüente aumento de sua representatividade (Figura 5.9).

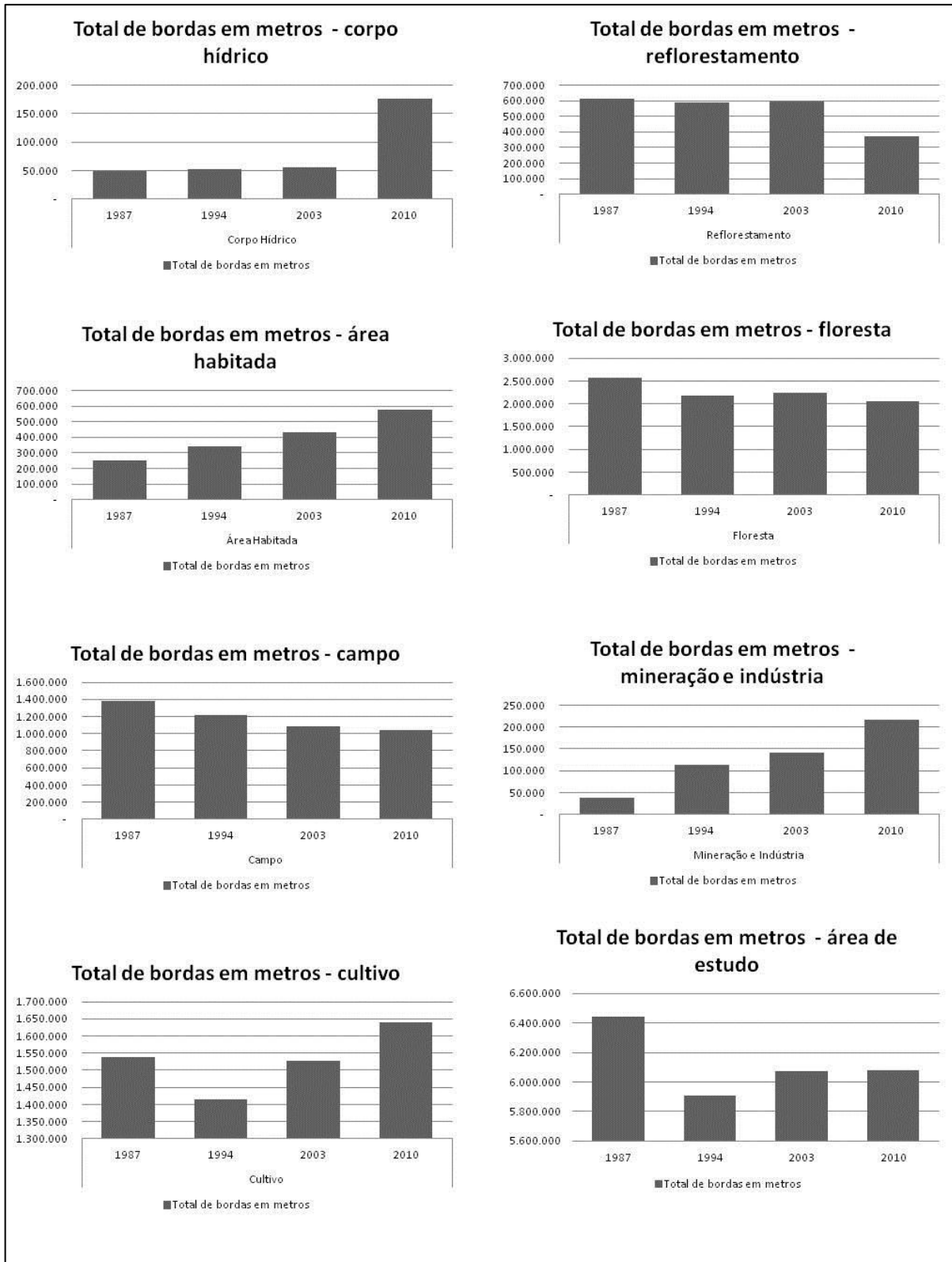


Figura 5.9: “Total de bordas” de cada classe de uso do solo (metros) (1987 – 2010).

Por fim, a análise do índice de forma média - que se baseia na razão entre o perímetro e a área das manchas e cujo valor varia a partir de um, conforme a complexidade das formas da mancha - demonstra que a despeito do menor número de manchas e perímetros no ano de 1994, o índice de forma média foi o mais alto, ou seja, apresentou manchas mais irregulares e complexas de um modo geral. Ao nível das classes, observou-se variação positiva no índice de forma do reflorestamento, possivelmente em razão de sua poda irregular; na mineração, associado à sua expansão que é mais das vezes pautada pela localização do mineral explorado, o que pode conferir formas complexas à frente de exploração; e no cultivo, mais das vezes em razão de sua expansão gradual sobre as áreas de floresta, principalmente. A classe relacionada aos corpos hídricos apresentou diminuição no seu índice de forma entre 2003 e 2010, provavelmente associado à barragem de Brucutu. As demais classes apresentaram baixa variação do índice de forma média (Figura 5.10).

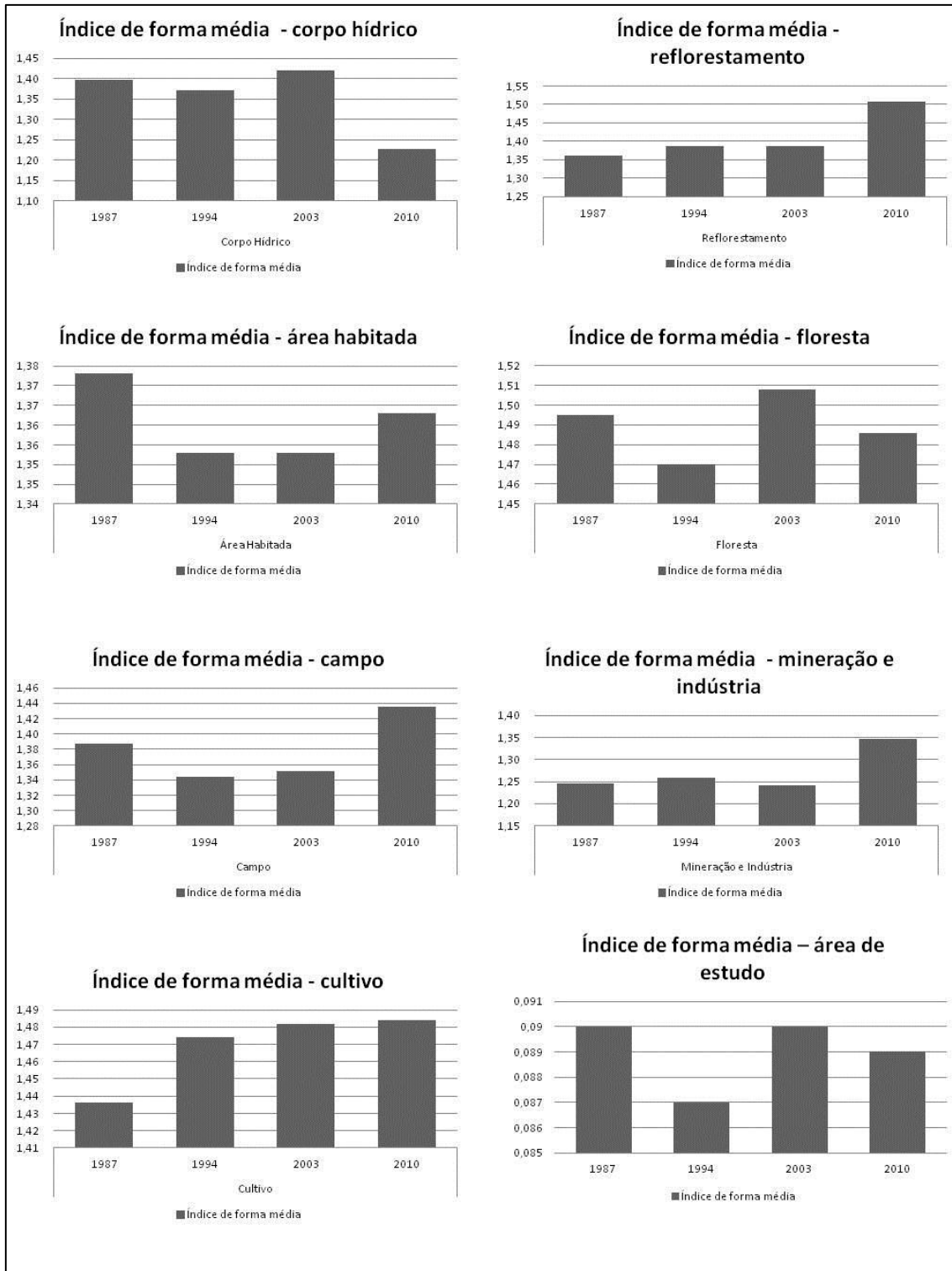


Figura 5.10: “Índice médio de forma” para cada classe de uso do solo e ao nível da área de estudo (1987 – 2010)

5.4 Fatores Impulsionadores da Evolução do Uso e Cobertura do Solo na Serra do Gandarela

A vegetação é um dos componentes do quadro natural de maior susceptibilidade à interferência antrópica comprovada pela constatação de que, ao longo da história da humanidade, os processos de ocupação do espaço são invariavelmente precedidos pela retirada da cobertura vegetal (CHRISTOFOLETTI, 1995; GUERRA E MARÇAL, 2006). Ademais, o modelado da paisagem é vastamente influenciado pela vegetação, determinante em diversos processos geomorfológicos: além de minimizar a intensidade dos processos erosivos e resguardar o solo da ação da chuva, ela também beneficia a infiltração das águas e a consequente recarga dos aquíferos, garantindo a perpetuação do ciclo hidrológico (THORNES, 1990). No mesmo sentido, é fonte importante de matéria orgânica ao solo, essencial a conservação do ecossistema. Por tudo isso, é possível afirmar que a vegetação é um elemento fundamental da paisagem, e suas relações diretas e indiretas com outros elementos implicam na estruturação da paisagem e na definição de sua qualidade ambiental (FELIPPE *et al.*, 2009).

Conforme observado, a paisagem na Serra do Gandarela está se transformando em razão dos avanços das atividades humanas. Foi possível constatar que a cobertura de florestas apresentou perdas em área quase trinta vezes maior que a dos campos. Isto pode ser justificado principalmente pela localização dos campos, nas porções mais altas do relevo, com baixa acessibilidade, e mais das vezes localizado sobre solos impróprios para agricultura. As florestas, por sua vez, encontram-se nas principais frentes de expansão urbana e rural, mesmo porque são a matriz da paisagem analisada, e sua fragmentação só pode ser vista como prejudicial à conservação dos ecossistemas regionais. A análise dos mapas e das métricas demonstra que os pequenos fragmentos florestais próximos às frentes de expansão diversas são geralmente preferidos para a substituição de cobertura. Ainda assim, é possível vislumbrar uma grande mancha florestal na porção oeste da área de estudo, que vêm resistindo aos intentos de ocupação humana.

No que diz respeito ao avanço dos cultivos na área de estudo, chamou atenção o fato de ter apresentado variação positiva no período analisado. Dados da Pesquisa Agropecuária Municipal (PAM), realizada pelo IBGE, demonstra que, se considerando o somatório das lavouras temporárias e das lavouras permanentes dos municípios interceptados pela área de estudo no período de 1990 a 2010, observou-se o crescimento negativo (IBGE, 2010). De

fato, à exceção de Itabirito, os demais municípios apresentaram, individualmente, crescimento negativo da agricultura. O fato de se observar a expansão das áreas de cultivo na Serra do Gandarela se deve muito mais à expansão das áreas de pastagem voltada à pecuária extensiva, conforme relatado, e em menor escala, à agricultura familiar praticada na região, incluindo a retirada de lenha. Entretanto, esta expansão, embora lenta, tem contribuído para a fragmentação florestal na região, principalmente a montante do Ribeirão São João e ao longo do Ribeirão Conceição.

É interessante ressaltar que apesar do caráter da expansão observado neste período, o naturalista francês Auguste de Saint-Hilaire já expressava, em 1831, uma forte preocupação com as rápidas taxas de conversão de florestas em pastagens e áreas cultivadas na região das minas através da prática despreocupada de desmatamentos e queimadas, que segundo ele, tinham efeitos devastadores sobre a fauna e flora da região (SAINT-HILAIRE, 1975; BRITO *et al.*, 1997; DE PAULA *et al.*, 1997). Este simples relato, associado ao histórico das ocupações humanas da região, pode indicar que parte das florestas observadas na região, principalmente próximas às áreas mineradoras, devem ser florestas secundárias, embora já bastante antigas.

As áreas urbanas na Serra do Gandarela aumentaram de maneira mais significativa que os cultivos, impulsionado principalmente pela expansão urbana de Barão de Cocais, em larga medida apoiada na economia minerária e siderúrgica desenvolvida na região. Conforme relatado por Alves e Diniz (2009), a dinâmica de crescimento da cidade é ordenada pelo relevo acidentado em que a cidade se insere, e segue o eixo viário (MG 436) que conecta grandes centros funcionais, como Belo Horizonte, João Monlevade e Itabira. Outra frente de expansão está localizada ao longo do Ribeirão São João, clara frente de expansão dos cultivos, que está fomentando o surgimento de pequenos núcleos rurais.

A mineração, por sua vez, foi a atividade que apresentou maior crescimento relativo no período, conforme demonstrado, e ao contrário do avanço do cultivo na região, teve motivação majoritariamente internacional. As duas grandes minerações da região pertencem à empresa Vale S.A., e a maior parte das concessões de lavra pertencem a esta empresa e à empresa AngloGold Ashanti, ambas multinacionais que realizam a mineração de larga escala em caráter industrial voltado à exportação. Conforme visto na caracterização da área de estudo, a exploração mineral ganhou um grande impulso com a entrada da China na Organização Mundial do Comércio no ano 2000, o que praticamente dobrou o interesse da

indústria mineral na região. O fato das concessões de lavra na região serem voltadas à exploração de ferro e ouro - e, portanto, localizada sobre as formações ferríferas - põe em risco a vegetação de campo rupestre sobre canga presente na região, já bastante degradada em outras áreas do Quadrilátero Ferrífero. Outro aspecto preocupante, neste sentido, é que estas mesmas concessões estão localizadas na porção mais alta do Sinclinal Gandarela e, se vierem a se tornar realidade, comprometerá o regime hídrico da região, pois ocupará os topos de morro que, conforme relatado por Felipe & Magalhães (2009), são áreas preferenciais de recarga de aquíferos.

As frentes de reflorestamento apresentaram crescimento em área de 4,5% no período analisado, resultante das frentes de expansão dos cultivos de eucalipto no vale do aço e do vale do Rio Piracicaba, voltadas principalmente à produção de carvão e celulose. Conforme relatado, estas frentes de expansão podem ser visualizadas nas escarpas exteriores e interiores da área de estudo, próximos aos acessos. Há também o eucalipto cultivado em caráter familiar, em escala menor e, em comparação ao primeiro, de impacto pouco representativo na serra.

É evidente que os processos identificados não tiveram início na década de oitenta, foco do mapeamento. As transformações do uso e cobertura do solo na área de estudo tiveram influência de políticas e ações em âmbito nacional e internacional, embora de maneira menos intensa que em outras áreas da região das minas e do Vale do Aço mineiro. A revisão bibliográfica sugere que a década de 1920 pode ser considerada um marco no início das transformações observadas na área de estudo, pois foi quando se iniciou a instalação de grandes siderúrgicas em Minas Gerais, localizadas na área e nas adjacências da área de estudo, e do início da transformação do parque siderúrgico brasileiro. A Companhia Brasileira de Usinas Metalúrgicas, por exemplo, foi instalada em Barão de Cocais em 1925.

O marco econômico fundamental foi o encampamento da Companhia Siderúrgica Mineira, em 1921, pelo grupo belgo-luxemburguês ARBED (Acieries Reunies de Burbach-Eich-Dudelange) que fez surgir o maior produtor de ferro gusa e aço do país à época, a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira (CSBM), situação que perdurou até 1946, quando surgiu a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda (RJ) (MONTE-MÓR *et al.*, 1997). Segundo Santos (2009), foi a CSBM que abriu as portas para a produção de aço em escala industrial a carvão vegetal - dada a carência de carvão mineral de boa qualidade - no Brasil, que foi adotada por outras usinas em momentos posteriores. Gonçalves (2006) relata

que Louis Ensich, industrial belga radicado em Minas Gerais a partir da década de 1920 para desenvolver o projeto da CSBM, definiu como a promoção da substituição das formações arbóreas nativas por outros tipos de florestas que, por sua "natureza", permitiriam um "aproveitamento organizado" da madeira (GONÇALVES, 2006:1 - grifo do autor).

A instalação da CSBM foi um agente impulsionador do desmatamento na região, já que ainda havia grande disponibilidade de florestas nativas, e as primeiras políticas em favor do reflorestamento só vieram a surgir na década de 60. O avanço da siderurgia pôs em cheque a sobrevivência dos pequenos proprietários que, acuados pela expansão das propriedades das siderúrgicas, passaram a depender da transformação das matas nativas de suas propriedades em carvão, que era vendido para as grandes empresas a preços inferiores aos obtidos por elas em suas áreas (BRITO *et al.*, 1997).

Nesta época, podia-se observar um processo embrionário de urbanização verificado apenas em algumas cidades tomadas para suporte de atividades industriais, como era o caso de Santa Bárbara e do futuro município de Barão de Cocais (MONTE-MÓR *et al.*, 1997).

É evidente que os mineiros não ficaram satisfeitos com a instalação da CSN no estado do Rio de Janeiro, que teve mais motivos políticos que técnicos (SANTOS, 2009; MELLO, 2010), e então se iniciou um grande empenho político para atrair indústrias siderúrgicas no território mineiro. O desdobramento disso foi a instalação da Acesita (Timóteo) e da Usiminas (Ipatinga), que adotaram como matriz energética o carvão mineral, e que se beneficiaram da proximidade com a EFVM, além da grande disponibilidade hídrica e da topografia favorável à instalação deste tipo de empreendimento (FERNANDES, 2005). A intensificação da atividade industrial fez intensificar também a urbanização nestas regiões nas décadas de 1940/1950, com taxas superiores as nacionais. Já na década de 60, Barão de Cocais apresentava um grau de urbanização próximo a 70%.

Em 1950 reaparece na pauta de discussões nacionais a questão das riquezas florestais do Brasil, em uma perspectiva menos conservacionista (dada a verificada impossibilidade de regeneração das matas nativas frente ao crescimento da demanda siderúrgica), e mais no sentido da substituição destas áreas por florestas de eucalipto. Neste ínterim, em 1966 surgiu a primeira proposta de incentivos ao reflorestamento (lei, nº 5.106, 1966), com o objetivo implícito de conservar as matas nativas, e com objetivo explícito de reduzir os custos da produção de carvão vegetal e, portanto, torná-lo economicamente viável.

Outro fato importante relacionado ao desenvolvimento da indústria siderúrgica em Minas Gerais e no Brasil também ocorreu na década de 60, quando a liberalização do setor extrativista mineral à participação do capital estrangeiro impulsionou a exportações e fez brotar grandes projetos mineradores através de empresas como a Samitri, a Samarco e a MBR (entre outras).

Foi também nesta década que o papel do Estado junto aos empreendimentos de plantio de florestas homogêneas se fortaleceu, e culminou na criação do Instituto Estadual de Florestas (IEF-MG) e no Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), que prontamente iniciaram programas de reflorestamento com eucalipto.

Já em 1970, o país assistiu à diversificação da pauta produtiva mineral e à expansão da fronteira mineral, orientada pelo Estado, ambas provenientes do surto de crescimento brasileiro (BARBIERI *et al.*, 1997). Foi também nesta década que a legislação brasileira tornou-se mais atraente à indústria de reflorestamento, já que foi possibilitada à pessoa jurídica descontar um determinado valor no imposto de renda e revertê-lo em investimento de reflorestamento posterior. Em 1974 foi criado o Fundo de Investimentos Setoriais (Fiset) para estimular o reflorestamento através da concentração de recursos e, portanto, com investimentos mais vultosos e em economia de escala (BRITO *et al.*, 1997:75). Em 1979 o Brasil passa de importador a exportador de papel e celulose, e em 1984, constituiu-se no Brasil a maior área reflorestada do mundo (CARNEIRO, 2004). Apesar disso, em 1987, 75% do carvão vegetal ainda era originário de matas nativas, sendo a metade produzida na região noroeste de MG, região que também passou a abrigar a maior parte das florestas de reflorestamento.

Outro fato importante ao entendimento das transformações espaciais advindas do avanço da siderurgia foi a instalação da fábrica de celulose Cenibra, com alto grau de automação, eucalipto como matéria-prima e capacidade de produção de 350 mil toneladas/ano (MONTE-MÓR *et al.*, 1997). A rápida expansão de seu território através da compra de propriedades acaba por significar mudanças importantes na lógica produtiva, sendo a sua marca mais importante a transformação de pequenos proprietários em trabalhadores temporários, que muitas vezes migram para núcleos urbanos ou acampamentos de empresas. A instalação desta nova lógica de produção e trabalho acaba por acelerar as taxas de urbanização nos municípios em que a empresa atua em sua maioria na bacia do rio Doce. Para Monte-Mór *et*

al., (1997), as grandes empresas de mineração e do setor siderúrgico têm sido as principais responsáveis pelo desenvolvimento econômico da região nos últimos 50 anos.

O desenvolvimento das atividades mineradoras viu-se, nas duas décadas seguintes (1980/90), diante de alguns desafios, como queda do preço internacional dos produtos minerais decorrente do excesso de estoques no mercado internacional, impactos decorrentes da mudança tecnológica sobre a demanda desses produtos, e concorrência das novas reservas minerais localizadas em outras regiões do país (BARBIERI *et al.*, 1997). Isso acabou determinando a paralisação de algumas minas, além da queda da demanda por aço e da redução interna e externa dos seus preços, queda de lucros e investimentos no setor, o que acabou por implicar em dificuldades de modernização e no distanciamento dos padrões internacionais de qualidade e competitividade (SANTOS, 2009). Ainda assim, o setor mínero-siderúrgico manteve-se como base econômica dos municípios em que exerciam suas atividades, além de um dos principais responsáveis pelos problemas ambientais neles recorrentes.

No mesmo período verificou-se um processo mundial de desestatização da indústria siderúrgica, que também ocorreu no Brasil, revertendo a tendência de controle estatal apresentada desde 1940. Foi a solução natural encontrada pelo Estado para as dificuldades enfrentadas pelo setor no período. Assim, entre 1991 e 1993 foi implementado o Plano Nacional de Desestatização que transferiu empresas como a Usiminas, a Açominas e a Acesita para capital privado. Isso acabou resultando em uma reestruturação produtiva, com desdobramentos na redução significativa de suas despesas e melhoria de gestão (SANTOS, 2009). Entretanto, a produção siderúrgica mineira não se alterou significativamente no anos 90, principalmente pela ausência de investimentos em ampliações ou novas usinas.

Todavia, o consumo de produtos siderúrgicos no Brasil se ampliou em mais de 20% na década de 2000, sustentado pela ampliação da produção do parque siderúrgico nacional, que aumentou sua produção em 21,7% entre 2000 e 2007, e as importações ultrapassaram 1,5 milhões de toneladas. Minas Gerais, contudo, manteve-se como principal produtor brasileiro de aço, graças a complexa estrutura produtiva formada no estado ao longo do século XX (SANTOS, 2009).

Na Serra do Gandarela, os desdobramentos - embora tenham ganhado impulso só recentemente - seguem a tendência de reprodução dos anseios siderúrgicos e minerários

tradicionais do estado de Minas Gerais, visualizado na instalação de minas, indústrias siderúrgicas e áreas de reflorestamento para matéria prima das indústrias siderúrgica e de celulose. Conforme exposto, a Serra do Gandarela contém um dos maiores remanescentes florestais do Quadrilátero Ferrífero, que conserva grande diversidade geocológica e que representa tanto uma fronteira a ser transposta pelos anseios econômicos, quando uma área a ser protegida destes mesmos anseios, já que é perceptível a tendência de substituição das florestas por usos diversos de maneira indiscriminada na região.

5.5 Identificação de Unidades de Paisagem na Serra do Gandarela

O entendimento dos fenômenos que pautaram as transformações na Serra do Gandarela permitiu a identificação de padrões espaciais diferenciáveis na paisagem Serra do Gandarela. Estas unidades de paisagem permitem um melhor entendimento de sua dinâmica total, uma vez que os usos e/ou coberturas predominantes em uma geralmente são determinantes ou determináveis pelos usos e/ou coberturas das unidades de paisagem a ela adjacentes.

Neste sentido, a delimitação das unidades de paisagem (UP) na área de estudo levou em consideração o uso e cobertura do solo no ano básico de 1987 (Figura 5.2). Neste mapeamento procurou-se identificar mosaicos com características semelhantes e complementares no contexto global da área de estudo, levando em conta toda a discussão realizada até este momento. Neste sentido, a despeito da matriz da área de estudo ser a cobertura florestal em diversos níveis sucessionais, para cada unidade de paisagem foi feita uma leitura de matriz local. Deste modo, foram identificados oito padrões de mosaico distribuídos entre dezessete unidades de paisagem (Figura 5.11). Abaixo se encontram as características básicas de cada padrão de mosaico identificado.

O mosaico 1 apresenta matriz de florestas com amplas áreas de cultivo e de reflorestamento, e é perceptível nas UP I e II. A proximidade com a sede do município de Barão de Cocais, e consequentemente com os acessos à cidade propicia a difusão do cultivo no mosaico.

O mosaico 2, por sua vez, apresenta matriz de campos com manchas de floresta em vários estágios de sucessão nas encostas, geralmente matas ciliares, e pequenas manchas de mineração. É identificado nas UP II, IV, V e VI. A formação ferrífera Cauê é a principal litologia presente no mosaico, o que explica a predominância de campos ferruginosos.

Já o mosaico 3 contém manchas cuja matriz é o uso urbano, com fragmentos de floresta em seu interior e fragmentos de campo nas porções mais altas do relevo, visualizado na UP VII. Abriga a cidade de maior expressão na região, Barão de Cocais, cuja importância remonta a época do ciclo do ouro. A área é praticamente toda habitada. A cidade além de ser um importante ponto de apoio às empresas mineradoras e siderúrgicas que se instalaram na região, também oferece um fácil acesso propiciado tanto pela ferrovia Vitória – Minas, quanto pelas rodovias MG 436 e MG 262. As rodovias, juntamente com a ferrovia, são um importante vetor modificador da paisagem.

O mosaico 4 é composto por matriz de florestas em diversos estágios sucessionais com pequenas manchas de campo e ocorrências esparsas de pequenas manchas de reflorestamento e cultivo, presente na UP VIII. Esta região é recoberta pelos filitos do Grupo Piracicaba que são especialmente sujeitos a escorregamentos, o que faz com que obras de engenharia, mineração ou mesmo o desmatamento, sejam capazes de alterar a dinâmica natural da região. Tal fato associado à dificuldade do acesso faz com que a floresta tenha sido bastante preservada.

O mosaico 5 apresenta predomínio de florestas com manchas de campo nas porções mais altas do relevo e uso principal voltado ao reflorestamento. Os usos são identificados, com menor relevância, como cultivo e mineração, apresentado nas UP XIX, X e XI. Pode-se perceber que nas duas áreas ao sul que compõem o mosaico são identificadas algumas áreas de preservação permanente, devido à presença de topos do morro. Este fato provavelmente contribui para a grande quantidade de vegetação natural no local. Já a presença da formação ferrífera Cauê ao norte atraiu empreendimentos mineradores para a região ao longo do tempo.

O mosaico 6 é formado por matriz de florestas em diversos estágios de sucessão e grandes manchas de campos nas porções mais altas do relevo, e ocorrência de grandes manchas de reflorestamento, composto pela UP XII. Este mosaico tem como base a formação ferrífera Cauê, sendo que as grandes manchas de campo estão em áreas da canga ferruginosa, nas áreas mais altas do relevo. Já o reflorestamento é voltado majoritariamente à produção de celulose e de carvão vegetal, tendo em vista a facilidade de escoamento devido à proximidade da ferrovia e das rodovias que dão acesso à região.

O mosaico 7 é aquele cuja matriz é o cultivo, com predomínio de pastagens, e fragmentos de florestas e de campos, é presente nas UP XIII, XIV e XV. Alguns dos principais povoados da

região, como a Vila do Congo, Arraial de André do Mato Dentro e Socorro se localizam neste mosaico, o que explica o predomínio de áreas de cultivo e pastagem, tendo em vista que a agricultura familiar é praticada pela população que vive na região, e parte dela faz parte de cooperativas, que possibilita a venda do excedente de produção.

Por fim, o mosaico 8 é composto pela matriz de cultivo, com predomínio de agricultura familiar às margens do rio Conceição, com fragmentos florestais, composto pelas UP XVI e XVII. A fertilidade advinda dos sedimentos transportados pelo rio faz com que a população local utilize estas terras para cultivo. Ademais a umidade proveniente do ambiente aquático propicia a formação da porção de floresta.

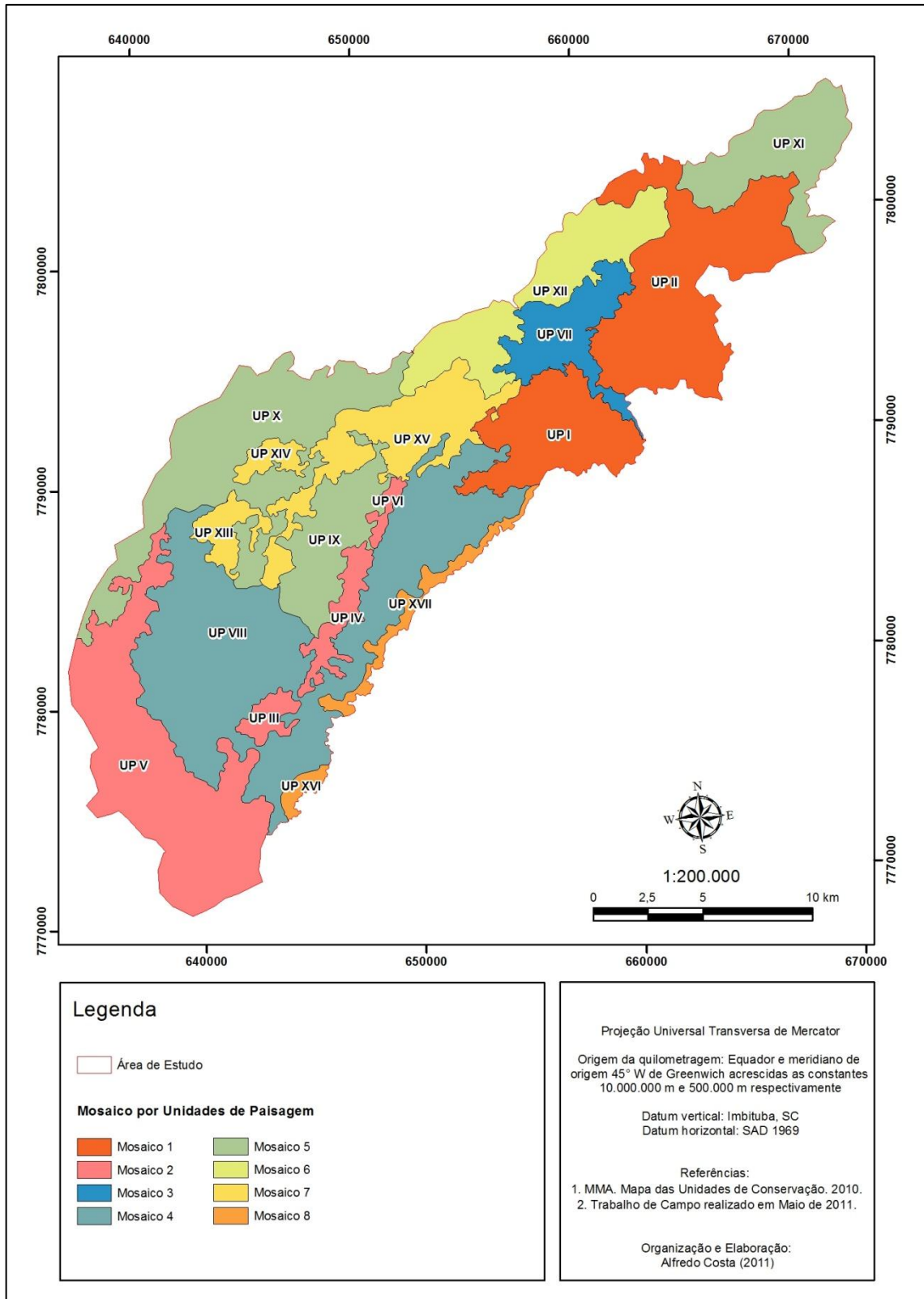


Figura 5.11: Unidades de paisagem e mosaicos na área de estudo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O exercício aqui realizado foi capaz de demonstrar uma séria tendência à degradação dos ambientes naturais da Serra do Gandarela, seja pelas práticas agropastoris, pelo avanço da silvicultura ou pelo crescente interesse da mineração na área. As concessões de lavra mapeadas na região revelam a intenção de exploração destas áreas em curto prazo, já que as mesmas significam que as mineradoras estão autorizadas a extrair o minério do subsolo. Cabe aos órgãos ambientais brasileiros avaliar se o interesse econômico desta atividade deve se sobrepor ao interesse ambiental, de conservação da biodiversidade ali existente. O ritmo de crescimento desta atividade na região não deve servir de incentivo à sua expansão, mas sim como incentivo à reflexão da validade deste tipo de exploração que, apesar do retorno financeiro aos municípios e ao Estado Brasileiro, significam um legado de degradação e destruição de uma das paisagens mais belas do país. As práticas de cultivo e silvicultura devem ser observadas de perto, pois estão menos sujeitas a regulamentação do estado, e também representam um risco à biodiversidade da região e à qualidade dos solos. Em concordância com Lamounier *et al.* (2010),

Nesse contexto, Ab'Saber (2003) coloca o grande dilema dos tempos modernos: o economismo e o ecologismo. Enquanto o ecologismo se baseia na conservação da natureza como um paraíso ambiental, o economismo consome a natureza esgotando seus recursos, sendo necessário um ponto de equilíbrio entre conservação e desenvolvimento. Assim a Serra do Gandarela, como uma das poucas áreas ainda bem preservadas do Quadrilátero Ferrífero-MG, poderia se apresentar então como um ponto de equilíbrio entre as áreas já exploradas e o que ainda existe de preservado (LAMOUNIER, 2010 :164).

Assim, algumas ações poderiam ser tomadas para garantir o manejo sustentável da serra, como o não asfaltamento dos acessos internos a ela, já que o asfaltamento poderia intensificar o fluxo de veículos, inclusive pesados, e que comprometeriam a biodiversidade da região e poderiam impulsionar as atividades econômicas ali existentes, além de fomentar o desenvolvimento de novas, que contribuiriam para o aumento da degradação das áreas naturais. Uma segunda medida seria a criação de um parque nacional na região, de uso restritivo, mas que não impedisse a visitação e a atividade mineradora já estabelecida, desde que feita de maneira responsável e sob fiscalização. Iniciativas de educação ambiental e treinamento da população local poderiam garantir o melhor aproveitamento das terras, que continuariam férteis por mais tempo e retardariam o avanço dos cultivos. Outra iniciativa para desenvolvimento sustentável da região seria a implantação de roteiros ecoturísticos, que

valorizassem as belezas naturais e fomentasse o desenvolvimento local dos moradores, fornecendo-lhes uma alternativa de geração de renda.

Um próximo passo desta pesquisa pode ser a modelagem de possíveis cenários futuros, considerando o mapeamento realizado e as métricas obtidas²⁹. Esta modelagem poderá potencializar de maneira significativa a discussão sobre os possíveis destinos da Serra do Gandarela, considerando cenários de ecologismo, economismo e governança, entre outros.

Por fim, cabe relatar que as técnicas utilizadas permitiram a realização do objetivo proposto. Alguns avanços possíveis seriam o refinamento do mapeamento do uso e cobertura do solo, considerando-se mais classes e outras imagens de satélite de melhor resolução; o cálculo das métricas de paisagem por unidades de paisagem, que permitiria uma resposta mais acurada das transformações em nível local; e a correção das métricas de paisagem com o relevo da área de estudo, conforme sugere o trabalho de Hoechstetter (2008), que garantiriam respostas mais precisas da fragmentação do uso e cobertura do solo.

Toda maneira, acredita-se que este estudo represente um avanço no entendimento da dinâmica da Serra do Gandarela, que contém poucas informações disponíveis quando comparada a outras áreas mineradoras da região do Quadrilátero Ferrífero. A expectativa é de que este estudo seja capaz de fornecer base para novas discussões sobre a serra, e possa auxiliar nas decisões sobre o destino da mesma.

²⁹ O autor deste trabalho se disponibiliza a fornecer os dados apresentados neste trabalho, desde que sejam utilizados para o prosseguimento dos estudos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F.F. & MARSHAK, S. “Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero”. *Precambrian Research*, v. 90, 29-58, 1998.

ALMEIDA, A. S.; SANTOS, R. L.; CHAVES, J. M.. Mapeamento de Uso e Ocupação do Solo no Município de Jeremoabo-BA: Uso do Algoritmo Máxima Verossimilhança (MAXVER). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. São Paulo: MCT/INPE, 2011. p. 7255-7262.

ALVES, M. A. S.; DINIZ, A. M. A.. O Zoneamento Morfológico Funcional das Cidades Médias Mineiras: O Exemplo de Barão de Cocais. *Revista Sociedade & Natureza*, 2009.

ANTUNES, A. F. B.. Fundamentos de sensoriamento remoto em ambiente de geoprocessamento. Material Didático. UFPR, 2011.

BAETA, N.. Pioneirismo de Monlevade na implantação da siderurgia e Minas Gerais. *Revista da Fundação João Pinheiro*. Vol 1, N 2. Belo Horizonte, 1971.

BARBIERI, A.; TORRES, C.; SCILIAR, C.; PINHO, M.; RUIZ, R.; LINS, S.. Estrutura econômica regional e meio ambiente. In: João Antônio de Paula. (Org.). *Biodiversidade, População e Economia: uma região de mata atlântica*. 1ª ed. Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar; ECMVC; PADCT/CIAMB, 1997, v., p. 47-90.

BARROS, L. F.; BARROS, P. H. C.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.. Condicionamento litológico e tectônico na morfometria da bacia do Rio Conceição – Quadrilátero Ferrífero/mg. *Revista de Geografia*, Vol. 27, No 1.Esp (2010)

BRITO, F.; OLIVEIRA, A. M.; JUNQUEIRA, A.. A ocupação do território e a devastação da mata atlântica. In: João Antônio de Paula. (Org.). *Biodiversidade, População e Economia: uma região de mata atlântica*. 1ª ed. Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar; ECMVC; PADCT/CIAMB, 1997, v., p. 47-90.

BURTON, R. F.. *Viagem do Rio de Janeiro a Morro Velho*. Brasília (DF): Senado Federal, Conselho Editorial, 2001. 527 p. (O Brasil visto por estrangeiros).

CARNEIRO, E. J.. A evolução histórica dos usos das condições naturais em Minas Gerais. In: II Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2004, Indaiatuba - SP. Anais do II Encontro Nacional da ANPPAS, 2004.

CASIMIRO, P. C.. Uso do Solo – Ecologia da Paisagem: Quantificação da Estrutura da Paisagem para Análise de Padrões Espaciais – Concelho de Mértola, Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas. 2002.

CHRISTOFOLETTI, A. A geografia física no estudo das mudanças ambientais. In: CHRISTOFOLETTI, A.; BECKER, B.; DAVIDOVICH, F.; GEIGER, P. Geografia e meio ambiente no Brasil. São Paulo; Rio de Janeiro: Hucitec, 1995. Parte IV, p.334-345.

CORRÊA, R. L. O espaço urbano. São Paulo: Editora Ática, 1995;

CROSTA, A. P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas: IG/Unicamp, 1992. 170p.

DE PAULA, J. A.; GUERRA, C.; BRITO, F. R. A.; BARBOSA, F. ; NABUCO, M. R. . Dinâmica capitalista, divisão internacional do trabalho e meio ambiente. In: João Antônio de Paula. (Org.). Biodiversidade, População e Economia: uma região de mata atlântica. 1ª ed. Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar; ECMVC; PADCT/CIAMB, 1997, v. , p. 27-46.

DORR, J. V. N.; GAIR, J. E.; POMERONE, J. B. & RYNEARSON, G. A.. Revisão Estratigráfica Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 36p.,1957 (Avulso 81).

DORR, J. V. N.. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS. Professional Papers, Washington D.C., n. 641-A, 1969. 110 p.

ELMIRO, M. A. T.. Introdução ao Sensoriamento Remoto e Processamento Digital de Imagens da Terra. Material Didático. UFMG, 2010.

FABRI, F.; MARENT, B. R.; SALGADO, A. A. R.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.. Classificação dos Trechos dos Cursos Fluviais da Bacia do Rio Conceição Quadrilátero Ferrífero/MG: resultados preliminares. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II

Encontro Latino-Americano de Geomorfologia, 2008, Belo Horizonte. VII SINAGEO. Belo Horizonte, 2008.

FARIAS JUNIOR, E. P.. Estudo comparativo entre algoritmos de regras de associação de forma normal e incremental de dados. Dissertação de Pós-Graduação. PUC-PR. 2008.

FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JR., A. P.. Espacialização e classificação de topos como zonas preferenciais de recarga natural de aquíferos: o caso de Belo Horizonte MG. Geografias (UFMG), v. 5, p. 67-82, 2009.

FELIPPE, M. F.; BUENO, J.; COSTA, A.. Desmatamento na Bacia do Rio Mucuri (MG, Brasil) no período de 1989 a 2008: uso de imagens Cbers e Landsat na espacialização dos remanescentes florestais. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 2713-2720.

FERNANDES, F. (org.). “Comunidade e sociedade no Brasil: Leituras básicas de introdução ao estudo macro-sociológico do Brasil” São Paulo. Editora Nacional. 2ª ed. 1975.

FERREIRA, V. O.; SAADI, A.. (In)disponibilidade hídrica e subdesenvolvimento socioeconômico em unidades de paisagem da bacia do rio Jequitinhonha, em Minas Gerais. Caminhos de Geografia (UFU), v. 12, p. 166-180, 2011.

FIGUEIREDO, D.. Apostila - Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. 2005.

FONSECA, L. M. G. Processamento digital de imagens. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2000. 105p.

GONÇALVES, M. T.. A formação da economia das plantações florestais nos Vales do Rio Doce e do Aço de Minas Gerais (1940-2000): notas sobre história econômica e ambiental de uma região. In: Seminário sobre a Economia Mineira, 2006, Diamantina. Anais do XII Seminário sobre a Economia Mineira, 2006.

GONTIJO, N. M.. Análise da expansão das áreas minerárias de ferro no Quadrilátero Ferrífero Na segunda metade do século XX e suas implicações ambientais. Monografia. IGC/UFMG. Belo Horizonte, 2010.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E.. Processamento de Imagens Digitais. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2000. 509p

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. Geomorfologia ambiental. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

GUIMARÃES, R.M.. Seleção de geoindicadores para determinação de áreas de fragilidade face às pressões antrópicas: contribuição da análise geossistêmica e da ecologia da paisagem no Espinhaço Meridional. Belo Horizonte/ MG: UFMG, 2004. Dissertação de Mestrado.

GUISARD, D. M. P.; KUPLICH, T. M.; MORELLI, A.F.. Análise da cobertura florestal no município de São José dos Campos entre 1973 e 2004 utilizando sensoriamento remoto e ecologia de paisagem. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2006, Florianópolis. Anais XIII SBSR, 2007.

HAYAKAWA, E. H.; PRADO, B. R.; TAVARES JUNIOR, J. B.; SOUZA FILHO, E. E. ; COUTO, E. V.. Avaliação multitemporal da planície de inundação do Alto Rio Paraná (região de Porto Rico, PR) através de classificação supervisionada e não supervisionada de imagens Landsat-5/TM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal - RN. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009. p. 5865-5872.

HOECHSTETTER, S.; WALZ, U.; DANG, L.H.; THINH, N. X.. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics. Landscape Online 3, 1-14. 2008.

IEPHA. Projeto Ruínas de Gongo Soco. Relatório Final das Pesquisas Histórica e Arqueológica, v. I, Barão de Cocais/Sede, 1995.

INPE. Atlas dos remanescentes florestais da mata atlântica período 2005-2008. Relatório Parcial. São Paulo, 2009.

JENSEN, J, R.. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1986.

JESUS, J. R. P.. Análise da Dinâmica do Uso e Ocupação do Solo no Município de São Gonçalo do Rio Abaixo/MG – 1988 a 2009. Monografia. XII Curso de Especialização em Geoprocessamento - UFMG, 2010.

LAMOUNIER, W. L. SALGADO, A. A. R. CARVALHO, V. L. M. & MARENT, B. R. As Correlações entre Geologia e Distribuição da Cobertura Vegetal e Uso do Solo na Serra do

Gandarela, Quadrilátero Ferrífero-MG. Revista Geografias. Belo Horizonte. .6(1) 152-165 janeiro-junho de 2010.

LANG, S.; BLASCHKE, T. (Org.). Análise da paisagem com SIG. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2008. 283 p.

LOURENÇO, D. C. G. R.. Avaliação de áreas invadidas por espécies de Acacia na Paisagem Protegida da Arriba Fóssil da Costa de Caparica. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2009.

LUCAS, D. F.. Análise Espacial dos Fragmentos Florestais no Município de São Gonçalo do Rio Abaixo/MG. Monografia. XIII Curso de Especialização em Geoprocessamento. 2011.

MACEDO, A. B.; LIOTTE, S. V.; PEDRO, M. F.. Utilização de técnicas de Geoprocessamento para apoio ao planejamento físico-territorial do município de Pariqueira Açu. In: GISBRASIL, 1999, Salvador. GISBRASIL, 1999. p. 1-14.

MAILLARD, P. Material Didático: Introdução ao sensoriamento remoto. IGC/UFMG. 2000.

MATSUKUMA, C. K. Análise comparativa de algoritmos de classificação não-supervisionada, no mapeamento do uso e cobertura do solo. 2002. 84 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2002.

MEDINA, A. I.; DANTAS, M.E.; SAADI, A.. Projeto APA Sul RMBH: geomorfologia, mapa geomorfológico, escala 1:50.000 em 3 partes. - Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2005.

MELLO, E. M. R.. As condições estruturantes da siderurgia mineira: recursos naturais, estado e elite instruída. Tese de Doutorado. IGC/UFMG. Belo Horizonte, 2010.

METZGER, J. P.. O que é ecologia de paisagens? . Biota Neotropica (Ed. Portuguesa), Campinas, SP, v. 1, n. 1/2, p. 1-9, 2001.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 19 fev. 2012. (hipsometria e declividade)

MONTE-MÓR, R; COSTA, H; MATA-MACHADO, D; COELHO, E. ULLMAN, M.; CARNEIRO, V.. Ocupação do território e estrutura urbana. In: João Antônio de Paula. (Org.).

Biodiversidade, População e Economia: uma região de mata atlântica. 1ª ed. Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar; ECMVC; PADCT/CIAMB, 1997, v., p. 47-90.

MORAES, E.C. Fundamentos de sensoriamento remoto. São José dos Campos: DSR/INPE, 2002.

MOREIRA, M.A.. Tratamento de dados de satélites. Curso de Sensoriamento Remoto aplicado a estudos ambientais. DSR/INPE, 2003.

NAGENDRA, H., MUNROEB, D., SOUTHWORTH, J.. From pattern to process: landscape fragmentation and the analysis of land use/land cover change. Agriculture, Ecosystems and Environment 101 - 2004.

NASA. The Landsat Program. 2012. Disponível em: <http://Landsat.gsfc.nasa.gov/>

NAVEH, Z.; LIEBERMAN, A.S. Landscape ecology: Theory and application. New York, Spring Verlag, 1989. 356p. Série Environment Management.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. Introdução ao Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2001, 68 p.

OLIVEIRA, N. V.; ENDO, I.; OLIVEIRA, L. G. S.. Geometria do Sinclinal Gandarela baseada na Deconvolução Euler 2D e 3D - Quadrilátero Ferrífero (MG). Revista Brasileira de Geofísica, 23(3): 221-232. 2005.

PANTOJA, N. V.; SAITO, E. A.; FONSECA, L. M. G.; ANDERSON, L. O. ; SOARES, J. V.; VALERIANO, D. M.. Detecção de mudanças a partir de imagens TM/Landsat na Amazônia Sul Ocidental. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto XIV, 2009, Natal. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos : INPE, 2009. v. 14. p. 6037-6044.

PDDI. Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Sistema de Informação Geográfica do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Relatório Técnico. Coordenação: MOURA, A. C. M. Belo Horizonte. Abril de 2010.

RAMOS, R. R. D.; LOPES, H. L.; MELO JÚNIOR, J. C. F.; CANDEIAS, Ana Lúcia Bezerra; SIQUEIRA FILHO, J. A.. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença

Normalizada (NDVI) na Avaliação de Áreas Degradadas e Potenciais Para Unidades de Conservação. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnológicas da Geoinformação, 2010, Recife. A Informação Geoespacial: Inovação Tecnológica, Ocupação e Monitoramento, 2010.

RICHARDS, J. A.; JIA, X.. Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction. 3 edition. Ed Springer. Australia, 1999.

ROSA, R.. A utilização de imagens TM/Landsat em levantamento de uso do solo. Universidade Federal de Uberlândia. Departamento de Geografia. 2003.

SAINT-HILAIRE, A. Viagem pelas províncias do Rio de Janeiro e Minas Gerais. Belo Horizonte : Itatiaia, 1975.

SALGUEIRO, T. B.. Paisagem e geografia. Finisterra, XXXVI, 72, 2991, 0pp. 37-53.

SANTOS, U. P.. Ambiente Institucional e Inovação na Siderurgia de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. UFMG/Cedeplar. Belo Horizonte, MG. 2009.

SCHIER, R. A.. Trajetórias do Conceito de Paisagem na Geografia. Ra'e ga, Curitiba, v. 7, n. 7, p. 79-85, 2003.

SILVA, J. F. G.. O novo rural brasileiro. Nova Economia (UFMG), Belo Horizonte/MG, v. 7, n.1, p. 43-82, 1997.

SILVA, J. R.; SALGADO, A. A. R.. Mapeamento das unidades de relevo da região da Serra do Gandarela - Quadrilátero Ferrífero-/MG. Revista Geografias. Belo Horizonte 05(2) 107-125 julho-dezembro de 2009.

SPINOLA, D. N.; COTA, J.; RESCK, B. C.; PORTES, R. C.; CRISPIM, F. A.. Análise da evolução espacial da mina de Brucutú, em São Gonçalo do Rio Abaixo - MG entre 2003 e 2008 através da classificação supervisionada de imagens multitemporais Landsat 5 TM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2009.

SOARES-FILHO, B. S.. Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 1998. 299 p.

SOUZA, M. L.. ABC do desenvolvimento urbano. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

SPOSITO, M. E. B.. A questão cidade-campo: perspectivas a partir da cidade. In SPOSITO, M. E. B. *et al.* Cidade e Campo: relações e contradições entre urbano e rural. São Paulo: Expressão Popular, 2006.

THORNES, J.B.. The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation. In: Thornes, J.B. (ed.) Vegetation and erosion: processes and environments. Chichester: John Wiley & Sons, 1990. p. 41-53.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M.. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens- fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat 5, na região do reservatório de Tucuruí/PA. Acta Amazônica, Manaus, AM, v. 34, n. 3, p. 487-493, 2004.

8. ANEXOS

ANEXO A

CARACTERIZAÇÕES E DEFINIÇÕES SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS UTILIZADOS NESTE ESTUDO.

SENSORIAMENTO REMOTO

DEFINIÇÃO

Discussões sobre o conceito de "Sensoriamento Remoto"¹ são realizadas em praticamente todos os trabalhos que se propõe a analisar fenômenos da superfície terrestre a partir de imagens aéreas². A leitura dos trabalhos de Jensen (1986), Fonseca (2000), Novo & Ponzoni (2001) e Antunes (2011) permitem definir sensoriamento remoto como a técnica de aquisição de informações sobre um objeto ou fenômeno sem fazer contato físico com o objeto. Uma forma comum de sensoriamento remoto a captação de luz pelos olhos.

No meio científico, o termo refere-se geralmente a utilização de tecnologias de sensores aéreos para detectar e diferenciar objetos na Terra (na superfície, atmosfera ou oceanos) a partir da radiação eletromagnética refletida e emitida por eles. Esta será a definição adotada neste estudo.

HISTÓRICO

O processo evolutivo do sensoriamento remoto por satélites foi determinado pelo desenvolvimento de quatro segmentos tecnológicos, a saber: os sistemas sensores, que são instrumentos de captação de dados e imagens; os sistemas de telemetria, responsáveis pela transmissão de dados e imagens para as estações terrestres; os sistemas de processamento, que são os recursos computacionais físicos e digitais; e os sistemas de lançamento, que envolvem

¹ Uma breve pesquisa pelo termo "sensoriamento remoto" na SCIELO (Biblioteca Científica Eletrônica em Linha) revelou 148 ocorrências de artigos científicos que mencionam o termo.

² Não é objetivo deste trabalho esgotar o tema, mas sim, apresentar os conceitos fundamentais para compreensão do estudo realizado.

o desenvolvimento de pesquisas aeronáuticas espaciais, além das bases de lançamento e dos foguetes (FIGUEIREDO, 2005).

Novo & Ponzoni (2001) relatam a trajetória do sensoriamento remoto pela história. Segundo eles, os primeiros usos do sensoriamento remoto para análise de objetos terrestres data da segunda metade do século XIX, quando em 1858 o Corpo de Engenharia da França realizou o mapeamento topográfico de parte do território francês através de fotografias feitas a partir de balões. O desenvolvimento das técnicas de fotografia, aliadas à invenção do avião, alavancou as possibilidades de imageamento de recursos naturais: em 1909, o território italiano foi fotografado pela primeira vez a partir de um avião pelos irmãos Wright, ainda em preto e branco. A utilização de imageamento utilizando aviões permanece até a atualidade (JANSEN, 1986).

Ainda segundo os mesmos autores, em 1930 foram realizadas as primeiras fotografias aéreas coloridas, mesma época em que os estudos sobre filmes sensíveis à radiação infravermelha foram iniciados. Esta tecnologia - de captação de radiação infravermelha - foi utilizada na Segunda Guerra Mundial para detecção de camuflagem, geralmente confundida com a cobertura do solo nas fotografias tradicionais. Entretanto, foi apenas a partir dos anos 60 que sistemas orbitais e sistemas de radar para sensoriamento remoto se tornaram operacionais. Na década de 70 é lançado o primeiro satélite para levantamento de recursos terrestres³, em caráter experimental, que levava a bordo um sensor multiespectral. O sucesso foi tamanho que o satélite ganhou o nome de Landsat e originou o mais longo programa de sensoriamento remoto existente. Em 1978 é lançado o primeiro satélite orbital de radar, o SeaSat, cuja operação durou apenas três meses. Mais tarde, na década de 90, informações orbitais de radar voltaram a ser disponíveis (ELMIRO, 2010).

Antunes (2011) relata que nas décadas de 70 e 80 as aplicações do sensoriamento remoto para levantamento de recursos ambientais só permitiam o mapeamento em pequenas e médias escalas (1:50.000 a 1.000.000). Em 1997 entram em órbita satélites de alta resolução, que expandem as aplicações desta geotecnologia e passam a permitir mapeamentos em médias e grandes escalas (1:5.000 à 1:25.000). A partir de então os sensores vem evoluindo em nível de detalhamento, permitindo análises cada vez mais acuradas das transformações na superfície terrestre.

³ Originalmente chamado de ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite 1*) (MAILLARD, 2000).

PRINCÍPIOS FÍSICOS BÁSICOS

Segundo Jensen (1986), um sistema remoto funciona a partir da interação entre um determinado objeto na superfície terrestre e um sensor, através da radiação eletromagnética ou energia eletromagnética. O processo mais comum de sensoriamento remoto, segundo ele, parte da irradiação de energia pelo sol, que viaja pelo vácuo espacial à velocidade da luz até alcançar o planeta Terra, na qual interage com sua atmosfera, com sua superfície e novamente com sua atmosfera. Por fim, atinge o sensor remoto e interage com seus componentes ópticos.

A radiação eletromagnética (REM), por ser capaz de se propagar pelo vácuo, é o meio através do qual os dados são transmitidos. Todo corpo emite REM, cuja intensidade varia de acordo com sua temperatura. Quando a radiação eletromagnética incide sobre um objeto, parte dela é absorvida, parte é refletida e parte é transmitida. Seguindo princípio da conservação da energia, expresso pela segunda lei da termodinâmica, a soma destes três elementos é igual à energia incidente (RAMOS et al, 2010). A REM obedece ao princípio fundamental da teoria das ondas, cuja equação geral é (equação 1):

$$C = f\lambda$$

Onde:

C = velocidade da luz (m/s)

f = frequência (ciclo/s ou Hz)

λ = comprimento de onda (m)

As ondas eletromagnéticas viajam de forma senoidal e harmônica na velocidade da luz ($C = 3 \times 10^8$ m/s) (Figura 1). O comprimento de onda (λ) é definido pela distância entre os picos ou os fundos da onda, e a frequência é definida pela quantidade de picos que passam por um ponto fixo em uma unidade de tempo. A unidade de medida mais utilizada para medir um comprimento de onda é o micrometro (μm) (ELMIRO, 2010).

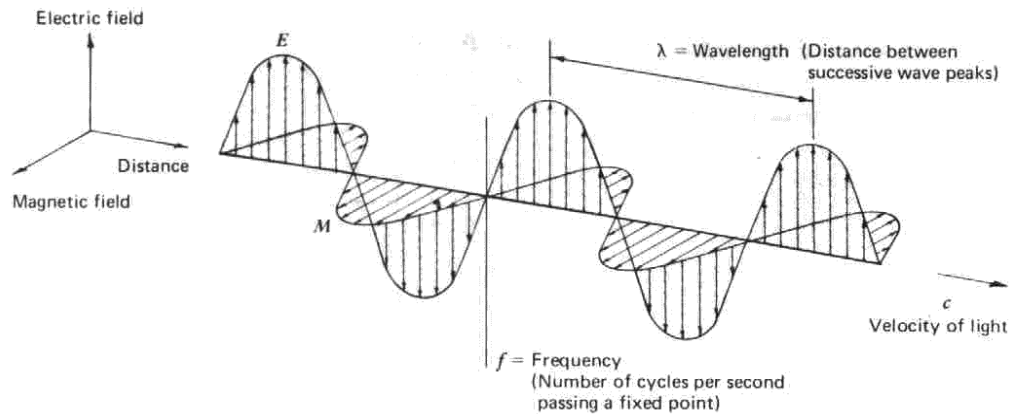


Figura 1: Comportamento das ondas eletromagnéticas. Extraído de Elmiro (2010).

Como observado na equação 1, a intensidade da radiação eletromagnética não varia. O que varia, de maneira proporcional, é o comprimento ou a frequência de determinada onda. Esta variação gera diferentes tipos de ondas distribuídas pelo espectro magnético (Figura 2). O olho humano só percebe a região chamada de "luz visível" do espectro eletromagnético, e ao sensoriamento remoto interessam principalmente as regiões do espectro: luz visível, infravermelho e microondas (ELMIRO, 2010), captadas por sensores preparados para codificar em bandas as informações captadas segundo sua frequência, intensidade e polarização da onda (ANTUNES, 2011).

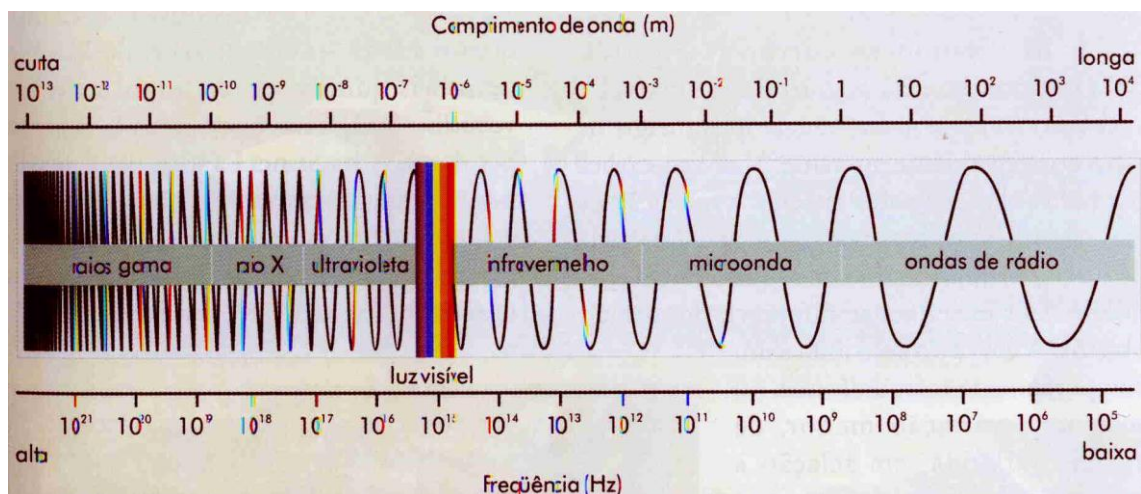


Figura 2: regiões do espectro eletromagnético. Extraído de Elmiro (2010).

A energia eletromagnética refletida pela superfície dos objetos guarda informações sobre os mesmos, pois dependem em larga medida de suas propriedades físico-químicas. Uma imagem é formada pela captura das ondas eletromagnéticas refletidas ou emitidas por um objeto. A identificação e diferenciação dos objetos é feita a partir do conhecimento prévio do

comportamento espectral dos alvos investigados, verificados a partir de sua curva de reflectância espectral. Os satélites podem levar sensores sensíveis à faixas específicas do espectro magnético. O Quadro 1 traz informações sobre o comportamento dos objetos quando captados pelas bandas espectrais do sensor Thematic Mapper do Landsat 5, fonte das imagens utilizadas neste estudo (Jensen, 1986).

Quadro 1: Características das bandas espectrais do sensor Thematic Mapper do Landsat 4 e 5, segundo Jansen (1986).

Banda	Comprimento de onda	Descrição
1	0,45 – 0,52 μm	(Azul). Essa banda tem maior penetração em corpos d'água, assim como fornece suporte para análise de uso da terra, solo e características da vegetação. O limite inferior do comprimento de onda é abaixo do pico de transmitância da água clara. O limite superior é o de absorção por clorofila no azul para vegetação verde saudável. Comprimentos de onda < 0,45 μm são substancialmente influenciados por espalhamento e absorção atmosférica.
2	0,52 – 0,60 μm	(Verde). Essa banda cobre a região entre as bandas de absorção pela clorofila no azul e no vermelho e responde à reflectância da vegetação sadia no verde.
3	0,63 – 0,69 μm	(Vermelho). Essa é a banda vermelha de absorção por clorofila da vegetação verde sadia e é útil para discriminação da vegetação. É também útil para delinear os limites de classes de solos e tipos de rochas. Essa banda pode exibir mais contrastes que as bandas 1 e 2 devido ao efeito reduzido de atenuação atmosférica. O limite superior de 0,69 μm é importante porque compreende o início de uma região espectral de 0,68 a 0,75 μm em que a reflectância muda abruptamente (borda vermelha ou red edger), o que pode reduzir a precisão das investigações da vegetação.
4	0,76 – 0,90 μm	(Infravermelho próximo). Pelas razões discutidas anteriormente, o limite inferior dessa banda foi posicionado acima de 0,75 μm (término da borda vermelha). Esta banda é muito sensível à quantidade de biomassa da vegetação e/ou área foliar presente. É útil para identificação de culturas e para realçar contrastes entre solo/cultura e terra/água.
5	1,55 – 1,75 μm	(Infravermelho médio – SWIR). Essa banda é sensível à turgidez ou quantidade de água nas plantas. Esta informação é útil em estudos de estresse de culturas e em investigações de vigor das plantas. Essa é uma das poucas bandas que podem ser usadas para discriminar nuvens, neve e gelo.
6	10,4 – 12,5 μm	(Infravermelho termal). Essa banda mede a quantidade de energia radiante infravermelha emitida das superfícies. A temperatura aparente é uma função da emissividade e da temperatura verdadeira (cinética) da superfície. É útil para localizar atividade geotermal, mapeamento de inércia termal para investigações geológicas, classificação e análise de estresse de vegetação, e para estudos de unidade de solos. Esta banda frequentemente capta informação única sobre diferenças em aspecto topográfico em áreas montanhosas.
7	2,08 – 2,35 μm	(Infravermelho médio – SWIR – shortwave infrared, ou infravermelho de ondas curtas). Essa é uma importante banda para a discriminação de formações geológicas de rochas. Ela tem sido efetiva para identificar zonas de alteração hidrotermal em rochas.

NÍVEIS DE AQUISIÇÃO

Segundo Moraes (2002) e Elmiro (2010), o sensoriamento remoto pode ser feito em nível terrestre, sub-orbital e orbital a partir de sensores imageadores ou não imageadores. Em nível terrestre, os sensores são geralmente usados para pesquisas sobre o comportamento espectral dos objetos. O sensoriamento em nível sub-orbital é feito por aviões, a partir dos quais são feitas as fotografias aéreas (aerofotogrametria) e imageamentos por radar. Já em nível orbital, o imageamento é feito a partir de balões meteorológicos e de satélites, os primeiros utilizados no monitoramento do clima e da atmosfera, e os últimos nos estudos de recursos naturais. A partir destes três níveis, é possível mapear objetos e fenômenos na superfície terrestre em grande, média e pequena escala (MORAES, 2002) (Figura 3).

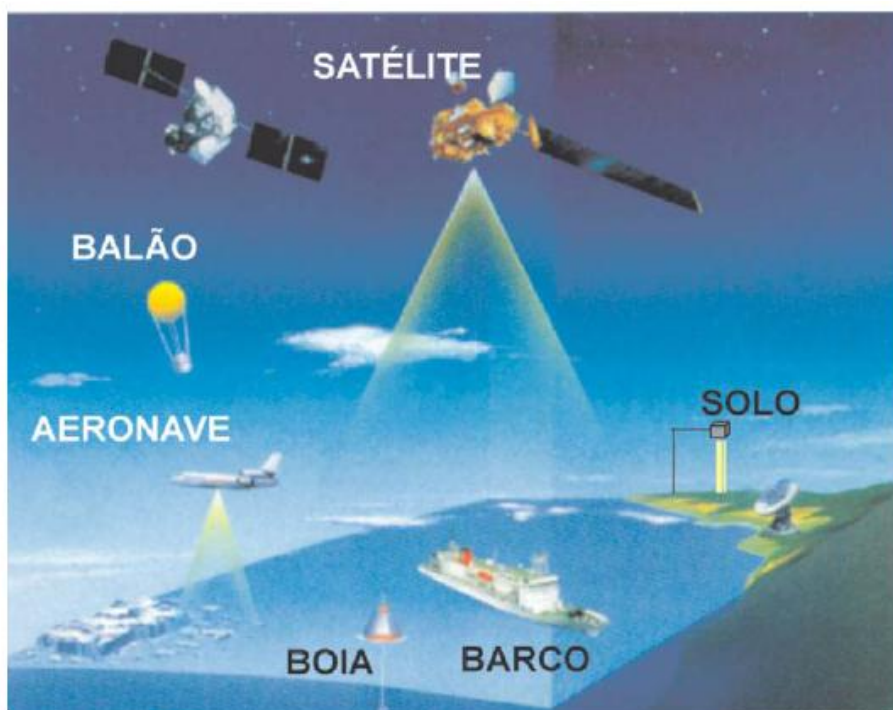


Figura 3: Níveis de coleta de dados (MOREIRA, 2001 apud MORAES, 2002).

Como relatado, os sensores podem ser diferenciados entre imageadores e não imageadores, passivos ou ativos. Segundo Moraes (2002), os sensores imageadores fornecem imagens, tais como as produzidas por câmeras fotográficas e *scanners*, ao passo que os sensores não imageadores - conhecidos por radiômetros ou espectrorradiômetro - fornecem informações em formas de dígitos ou gráficos. Os sensores passivos não possuem fonte própria de energia eletromagnética, e, portanto registram a radiação refletida naturalmente pelos objetos. Uma câmera tradicional sem flash é um exemplo de sensor passivo. Já os sensores ativos possuem fonte própria de energia eletromagnética, que é emitida sobre os objetos terrestres. A energia

refletida é detectada e registrada pelo sensor emissor, que calcula a diferença entre a energia emitida e captada. Como exemplo, pode-se citar o radar SRTM⁴, utilizado para mapear o relevo terrestre (ELMIRO, 2010).

RESOLUÇÃO

As imagens de sensoriamento remoto são capturadas pelos sensores imageadores, e são compostas de pixels quantizados em valores discretos proporcionais ao brilho do terreno (ELMIRO, 2010). O formato destas imagens varia de acordo com as características dos sensores, que se relacionam a sua resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica.

A resolução espacial ou geométrica representa o nível de detalhamento da imagem, e indica qual a dimensão do menor objeto que pode ser diferenciado. Não deve ser confundida com o tamanho do pixel. Já a resolução temporal refere-se ao intervalo de tempo levado pelo satélite para sobrevoar uma mesma área duas vezes. A resolução espectral está relacionada à largura espectral que o sensor opera, ou seja, o número de canais usados para registrar imagens. Por fim, a resolução radiométrica diz respeito ao número de bits⁵ por pixel existente na imagem para representar um valor de cinza, ou seja, representa a capacidade do sensor em distinguir a energia emitida pelos objetos e de evitar falsos contornos (MORAES, 2002).

Ressalta-se que as imagens obtidas pelos sensores registram a variação de energia eletromagnética em níveis de cinza dentro de uma determinada frequência (banda), sendo que os maiores valores representam uma melhor resposta espectral, e reciprocamente. Uma imagem colorida é obtida através da associação de três bandas recoloridas artificialmente.

O PROGRAMA LANDSAT

O mapeamento de uso e cobertura do solo apresentado neste trabalho foi baseado em imagens do sensor TM do satélite Landsat 5. Segundo Maillard (2000), o programa Landsat iniciou-se em 1972, com o lançamento do ERTS-1 (supracitado) e teve continuidade até os dias de hoje, com o lançamento de mais seis satélites (Quadro 2). Desde 1978 o programa Landsat é

⁴ *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), lançado no ano 2000 pela Agência Espacial Americana (NASA). O mapa hipsométrico apresentado neste estudo utiliza a imagem obtida por este radar.

⁵ O Bit é a menor unidade computacional de informação, capaz de assumir apenas dois valores, 0 ou 1. É a simplificação do termo inglês "binary digit" (dígito binário).

operado pela empresa EOSAT. Imagens deste satélite são disponibilizadas para o território brasileiro gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Quadro 2: Satélites do Programa Landsat, adaptado de NASA (2012).

Plataforma	Lançamento	Término da operação
ETRS-1 (Landsat 1)	23 julho de 1972	06 de janeiro de 1978
Landsat 2	22 de janeiro de 1975	22 de janeiro de 1981
Landsat 3	05 de março de 1978	31 de março de 1983
Landsat 4	16 de julho de 1982	1993
Landsat 5	01 de março de 1984	Ainda em funcionamento.
Landsat 6	Lançado 05 de outubro de 1993, não conseguiu atingir a órbita.	-
Landsat 7	15 abril de 1999	Ainda em funcionamento, mas com falha na verificação das linhas de corretor (maio de 2003).

Conforme pode ser verificado na Quadro 3(MAILLARD, 2000), os três primeiros satélites do programa Landsat levavam a bordo sensores RBV (Return Beam Vidicon), com operação nas regiões espectrais visível e infravermelho (quatro bandas espectrais). Os satélites Landsat 4 e 5 receberam um sensor mais moderno, o TM (Thematic Mapper), capaz de operar com melhor resolução espacial em 6 bandas espectrais, nas regiões visível, infravermelho próximo e médio, além de uma banda espectral no infravermelho térmico. O Landsat 7, lançado em 1999, levou consigo o sensor ETM (Enhanced TM), com as mesmas bandas do seu antecessor TM, adicionado de uma banda pancromática, que capta a frequência 0,50 -0,90 μm e resolução espacial de 15 metros. Os satélites Landsat têm órbita heliossíncrona e resolução temporal de 18 dias (Quadro 4).

Quadro 3: Características dos sensores a bordos dos satélites Landsat, adaptado de Maillard (2000).

Características dos sensores a bordos dos satélites Landsat				
Sensor	MSS - Multispectral Scanner	RBV - Return Beam Vidicon	TM - Thematic Mapper	ETM - Enhanced TM
Resolução espacial	79x82m	80m (LANDSAT 1 E 2)	30m (bandas 1-5 e 7)	15m (banda pan-X)
		30m (LANDSAT 3)	120m (banda 6)	30m (multispectral)
				60m (IV térmico)
Número de bandas	4	3	7	8
Descrição das bandas espectrais	banda 4 0,5-0,6 μm	banda 1 0,475-0,575 μm	banda 1 0,45-0,52 μm	As mesmas bandas que o TM com uma banda pancromática adicional: SiPD 0,50 -0,90 μm
	banda 5 0,6-0,7 μm	banda 2 0,580-0,680 μm	banda 2 0,52-0,60 μm	
	banda 6 0,7-0,8 μm	banda 3 0,690-0,830 μm	banda 3 0,63-0,69 μm	
	banda 7 0,8-1,1 μm		banda 4 0,76-0,90 μm	
			banda 5 1,55-1,75 μm	
			banda 6 10,4-12,5 μm	
		banda 7 2,08-2,35 μm		
Plataformas	LANDSAT 1-5	LANDSAT 1-3	LANDSAT 4-5	LANDSAT 7

Quadro 4: Características da órbita dos satélites Landsat, adaptado de Maillard (2000).

Características da órbita dos satélites Landsat	
Tipo	heliossíncrona
Inclinação	99° no equador
Período	103 minutos
Cruzamento do equador	9h:30 (hora local)
Ciclo de cobertura	18 dias
Duração do ciclo	251 revoluções
Distância entre órbitas adjacentes	159 km (no equador)
Distância entre órbitas sucessivas	2760 km (no equador)
Altitude média	Landsat 1-3: 920 km/ Landsat 4-7: 705 km

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (PDI)

DEFINIÇÃO

A manipulação de imagens em ambiente computacional é conhecida como processamento digital de imagens (MARQUES FILHO & VIEIRA NETO, 1999; FONSECA, 2000). Neste processo, o produto resultante pode ser uma nova imagem, um mapa temático ou uma descrição da imagem, mas o elemento de entrada deve ser necessariamente uma imagem. O PDI visa, de um modo geral, transformar a imagem de uma maneira que facilite a identificação, extração e interpretação de informações da mesma. Associado aos produtos de sensoriamento remoto permite a diferenciação, classificação e análise dos objetos da terra por seu comportamento espectral, além da integração de dados espaciais. O processamento digital de imagens provenientes de sensoriamento remoto para análise dos recursos da terra consiste das etapas de pré-processamento, processamento e análise, conforme pode ser visto na Figura 4.

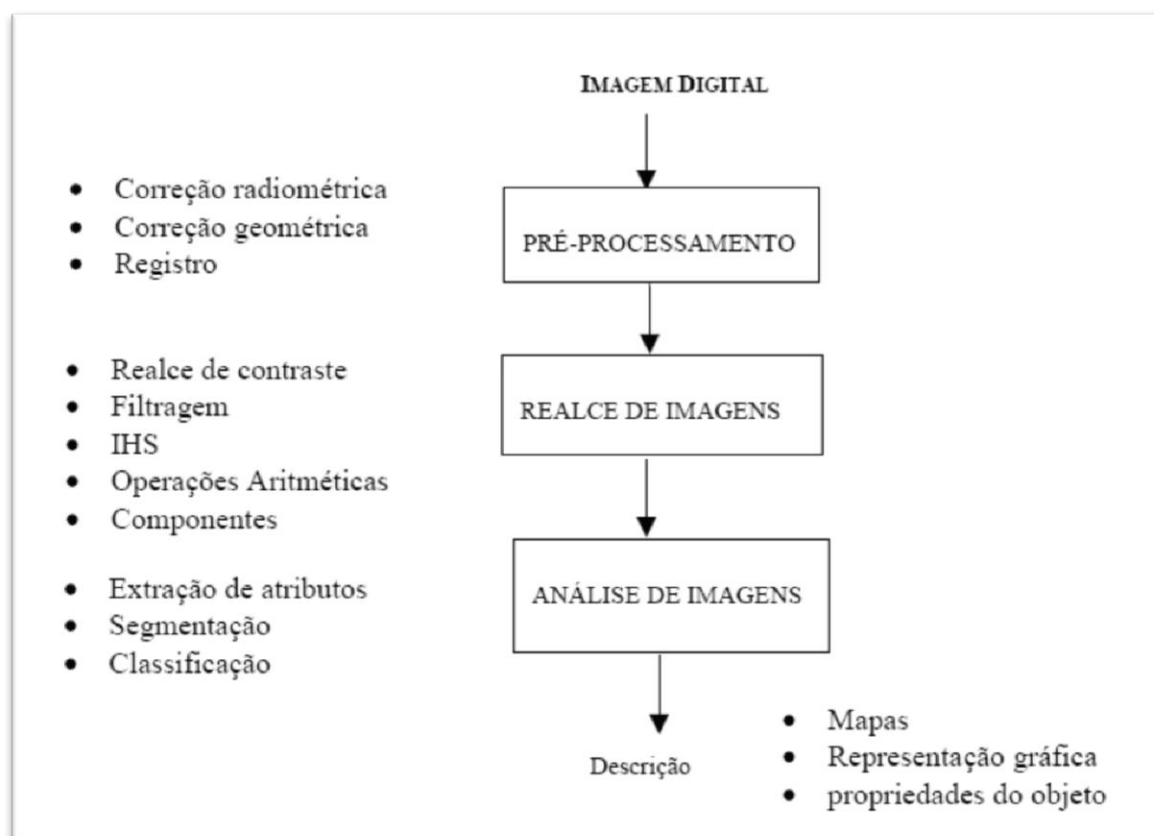


Figura 4: Etapas do processamento de imagens. Fonte: FONSECA, (2000).

PRÉ-PROCESSAMENTO

As imagens obtidas pelos sensores remotos geralmente apresentam distorções radiométricas, atmosféricas e geométricas, como brilho e/ou contraste inadequado ou a presença de ruídos, que devem ser corrigidas antes do processamento da imagem. A etapa de pré-processamento configura-se assim como uma das etapas mais importantes do processamento digital, uma vez que atenua e remove as imperfeições presentes nas imagens originais (JANSEN, 1986).

A correção radiométrica visa reparar os ruídos radiométricos de uma imagem. Estes ruídos podem ser classificados como "coerentes", que apresentam um padrão, ou "aleatórios", quando não apresentam padrão. Os tipos de correção mais comuns são a restauração de imagem, a correção de linhas ruins e a correção de pixels isolados (FONSECA, 2000).

A restauração de imagens é realizada para reduzir as distorções introduzidas pelos sensores em razão do tamanho do detector, da difração óptica, e da filtragem eletrônica, que tornam a resolução efetiva da imagem, em geral, pior que a resolução nominal. O efeito desta correção

é o de realce das feições na imagem e o aprimoramento da resolução efetiva (CROSTA, 1992).

A correção de linhas ruins é feita quando se identifica que a qualidade da informação dos pixels de uma linha ou coluna de uma banda da imagem não estão coerentes (geralmente muito similares), ou mesmo quando há perda total da informação desta linha ou coluna. Este tipo de problema geralmente é resultante da saturação de um dos detectores do satélite, ou mesmo de complicações na aquisição, registro, transmissão ou processamento de dados. A correção da linha ou coluna defeituosa pode ser feita a partir de sua estimativa através de suas linhas ou colunas adjacentes, segundo a hipótese de correlação espacial entre os dados, através da interpolação ou média dessas linhas ou colunas adjacentes.

Já a correção de pixels isolados é realizada para correção de pixels aleatórios deteriorados por ruído. Estes pixels são corrigidos através da substituição pelas médias dos seus vizinhos mais próximos, desde que os mesmos não estejam deteriorados também. Outra alternativa é a utilização de filtros, como o de mediana ou o morfológico.

A correção geométrica, por sua vez, é realizada com objetivo de corrigir as distorções sistemáticas inseridas na imagem durante sua aquisição, além permitir a integração da imagem com outras bases cartográficas e informações. Estas distorções podem ser geradas principalmente pela curvatura da terra, pelo movimento relativo entre a Terra e o satélite, por sensores de campo de visão amplo que geram distorções panorâmicas, e pelo arrastamento da imagem durante a varredura (FONSECA, 2000).

Essa correção é realizada em três etapas: o mapeamento direto, que vincula as coordenadas de imagem às coordenadas geográficas com o objetivo de reduzir as distorções; o mapeamento inverso, fundamental para a definição dos níveis de cinza que compõem a imagem na terceira etapa; e a reamostragem, em que é feita a interpolação dos níveis de cinza da imagem original a partir do mapeamento inverso.

O mapeamento direto pode ser realizado através dos modelos de correções independentes, fotogramétrico ou polinomial. No modelo de correções independentes, os pixels são realocados a partir da modelagem isolada de cada efeito visto. Este modelo não é considerado ideal porque trata as distorções de maneira isolada, e, portanto, ignora a correlação entre as fontes de distorção.

Já o modelo fotogramétrico utiliza o cálculo das coordenadas de um pixel estabelecendo uma relação entre os parâmetros do sistema de imageamento e o elipsóide de referência do mapeamento. Este modelo permite o cálculo de coordenadas de maneira independente, sem procedimento externo.

O modelo polinomial é basicamente realizado a partir de uma função polinomial parametrizada por pontos de controle identificados tanto na imagem quando no sistema de referência cartográfica. É o sistema de correção mais utilizado, que depende de uma boa distribuição dos pontos de controle, da precisão das suas coordenadas e da adequação polinomial à área que se pretende modelar.

A segunda etapa da correção geométrica consiste do mapeamento inverso. Ele é imprescindível porque na primeira etapa é definida apenas a geometria e o espaço geográfico da imagem original, sem trazer consigo os níveis de cinza de cada pixel. O mapeamento inverso recupera esta informação da imagem de entrada, e o reassocia aos mesmos pixels em sua nova posição.

A terceira etapa é a reamostragem da imagem, que gera uma nova imagem a partir da interpolação das informações geradas pelo mapeamento inverso. Os métodos mais utilizados nesta fase são a reamostragem pelo vizinho mais próximo, a reamostragem bilinear e a reamostragem por convolução cúbica.

Por fim, a correção atmosférica tem por objetivo corrigir a influência da atmosfera na resposta dos objetos, pois subtrai valores de brilho de energia radiante dos mesmos por absorção atmosférica, e por outro lado adiciona valores a sua resposta original em razão do espalhamento atmosférico.

O método mais comum para correção deste efeito é a subtração dos valores de todos os pixels de uma banda pelo valor mais baixo encontrado entre os pixels desta banda. Isto porque os pixels de menores valores geralmente representam áreas de sombra ou de água limpa, cuja resposta espectral real geralmente é nula ou próxima de nula. Assim, considera-se que os valores registrados como respostas destes alvos são resultantes da contribuição aditiva da atmosfera.

PROCESSAMENTO

A etapa de processamento, também conhecida como etapa de realce, visa melhorar a qualidade visual da imagem já pré-processada, e ressaltar algumas características que se deseja investigar. As operações de processamento geralmente são feitas em cada uma das bandas que compõem a imagem a ser trabalhada e, portanto, são realizadas sobre o nível de cinza da destas bandas. As operações podem ser pontuais, quando atuam na escala de cinza da imagem e dependem apenas do valor antigo do pixel; ou locais, quando é feita a filtragem de toda a matriz que compõe a imagem, e que depende dos valores dos pontos vizinhos.

A transformação da escala de cinza, ou transformação de contraste, objetiva melhorar a qualidade visual de uma imagem a olho nu, sem alterar a informação nela contida. No caso de uma imagem de 8 bits, um pixel pode assumir um valor em um intervalo de 256 possíveis, mas dependendo dos fatores que atuaram na formação da imagem (condições do sensor, de iluminação ou das próprias características da cena), o intervalo ocupado pelos valores dos pixels pode ser muito menor. Neste caso, diz-se que a imagem tem baixo contraste, e a proximidade dos valores dos pixels torna sua leitura bastante complicada.

A distribuição dos valores de cinza em uma imagem pode ser verificada em seu histograma. Uma imagem com bom contraste possui as barras espalhadas ao longo de seu eixo, ao passo que uma imagem com contraste ruim possui as colunas acumuladas em uma região específica do histograma. A transformação da escala de cinza, portanto, consiste da redistribuição destas colunas mal distribuídas ao longo de todo o eixo do histograma (Figura 5). As principais funções de transformação são a função linear, função de raiz quadrada, função quadrada e função logarítmica (GONZALES & WOODS, 2000).

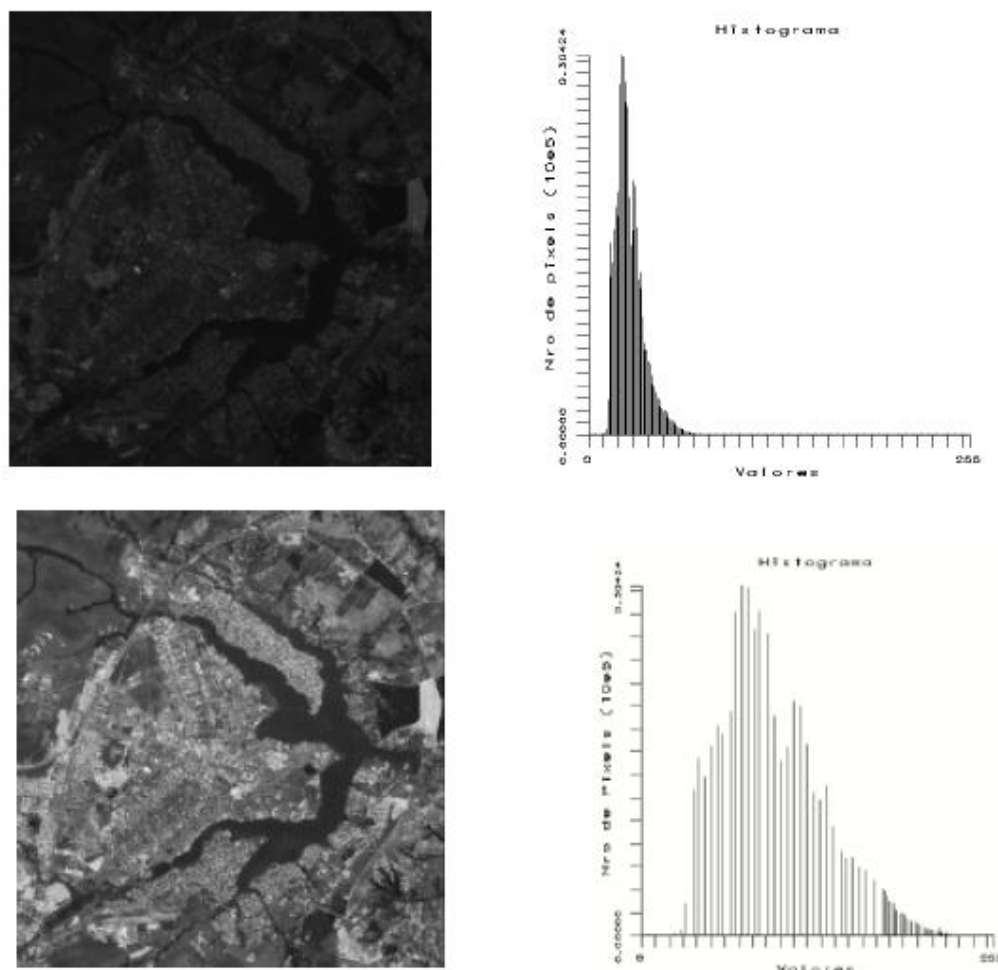


Figura 5: Exemplo de transformação linear de contraste para imagem Landsat TM 5, banda 3, de Brasília-DF.
Fonte: FONSECA, 2000

A operação de filtragem de uma imagem, por sua vez, consiste da transformação de seus pixels em razão de seus pixels vizinhos, e pode ser realizada através de filtros lineares, não-lineares e os morfológicos. Os filtros são aplicados sobre a imagem a partir de matrizes conhecidas como máscaras, que envolvem o pixel a ser filtrado. O valor do pixel então é então substituído por um novo valor que depende dos valores dos pixels vizinhos e do peso da máscara. Por simetria, as máscaras possuem um número de linhas/colunas ímpar, e para sua maior eficiência computacional, este número deve ser pequeno, geralmente variando até sete.

Os resultados dos filtros podem ser a suavização da imagem (filtro linear passa-baixa ou filtro não-linear da mediana), o realce de bordas (filtro linear passa-alta), o realce de feições segundo sua orientação geométrica (filtro linear direcional), e filtros de erosão e dilatação (filtros morfológicos) (GONZALES & WOODS, 2000).

O processo de filtragem deve ser usado com cautela, de acordo com as informações que se deseja extrair das imagens. Para a classificação da mesma, são importantes para a diferenciação de grandes classes e homogeneização das pequenas, por exemplo, que lhe conferem melhor acurácia e menor quantidade de ruídos.

CLASSIFICAÇÃO

No processo de análise dos recursos da terra, a classificação das informações contidas nas imagens de satélite é um excelente recurso para reconhecer e diferenciar padrões e objetos presentes em uma imagem de maneira rápida e eficiente (CROSTA, 1992). O processo de classificação gera uma imagem temática, com classes diferenciadas por cores ou símbolos definidos pelo usuário (Figura 6).

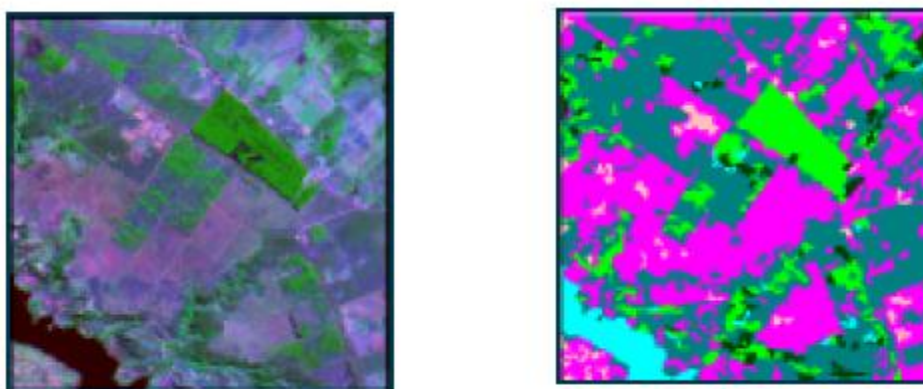


Figura 6: Representação de uma imagem original e uma imagem classificada. Fonte: FONSECA, 2000

A classificação de imagens pode ser realizada de forma manual ou automática. A classificação manual - ou fotointerpretação - é aquela em que o especialista extrai as informações da imagem a partir da verificação manual da imagem. Já a classificação automática é feita em ambiente computacional, onde é realizada uma análise quantitativa dos atributos numéricos da imagem. Os resultados da classificação automática devem ser validados pelo operador, cujo conhecimento sobre a área analisada permitirá aferir a qualidade da classificação (MOREIRA, 2003).

As vantagens da classificação automática são a aferição de áreas com maior precisão, pois considera a resposta do pixel, e a possibilidade de se utilizar mais de três bandas espectrais, que fornecem maior quantidade de dados para a classificação. A maior vantagem da fotointerpretação é o conhecimento prévio do operador sobre a área de estudo (CROSTA, 1992).

As classificações automáticas são divididas entre supervisionadas e não supervisionadas. A classificação supervisionada parte da premissa de que as classes de uma imagem podem ser identificadas e diferenciadas através de uma função de densidade de probabilidade, ou seja, que considera seus parâmetros estatísticos como critério de decisão. Estes parâmetros são baseados em uma seleção na imagem de amostras representativas das classes que se deseja diferenciar, processo denominado treinamento. O treinamento de todas as classes deve ser homogêneo e deve considerar toda a variação dos níveis de cinza para a classe investigada, sendo que quanto mais áreas homogêneas forem identificadas na imagem, maior será a precisão do seu mapeamento (MACEDO, 1999). Os algoritmos mais utilizados para classificação supervisionada são o de Máxima Verossimilhança (MAXVER), o de Distância Euclidiana e do Paralelepípedo⁶.

De maneira objetiva, uma classificação supervisionada deve seguir os seguintes passos (CROSTA, 1992): seleção das classes ou objetos a serem diferenciados, seleção dos conjuntos amostrais na imagem para cada uma das classes (treinamento), seleção do algoritmo de classificação, estimativa de parâmetros de classificação, identificação dos pixels ou regiões a partir das classes selecionadas com base nos parâmetros estatísticos obtidos, e geração de mapas e/ou dados tabulares com os resultados da classificação.

O método MAXVER, adotado neste estudo, é o mais utilizado para classificação de imagens de sensoriamento remoto, e calcula a variância e a correlação dos padrões de resposta espectral para classificar um pixel desconhecido (MACEDO, 1999). Requer um treinamento exaustivo, com um número elevado de pixels em cada conjunto amostral. Os conjuntos de treinamentos são utilizados para definir o diagrama de dispersão das classes escolhidas a partir da probabilidade Gaussiana referente a cada um dos conjuntos.

Segundo Fonseca (2000) o algoritmo MAXVER pode ser assim deduzido: considerando que as classes espectrais de uma imagem sejam descritas como:

$$w_i, i = 1, \dots, M$$

Onde M é o número total de classes, determina-se a que classe de um pixel com valor espectral x pertence, a partir da probabilidade de que a classe w_i seja correta para ele, ou seja:

⁶ Para maior detalhamento dos dois últimos métodos, ver Fonseca (2000).

$$p(w_i | \bar{x}), i = 1, \dots, M \quad (1)$$

Assim, o critério de classificação será dado por:

$$\bar{x} \in w_i \text{ se } p(w_i | \bar{x}) > p(w_j | \bar{x}) \text{ para todo } i \neq j \quad (2)$$

Desta forma, os pixels são classificados nas classes de maior probabilidade, embora esta probabilidade seja desconhecida. A estimativa desta probabilidade é realizada a partir do treinamento, que apresenta a chance de haver um pixel da classe w_t com um vetor espectral x representado pela probabilidade $p(x|w_t)$, relacionada à probabilidade descrita em (1) assim:

$$p(w_i | \bar{x}) = p(\bar{x} | w_i)p(w_i) \quad (3)$$

Desta maneira, o critério de decisão apresentado em (2) torna-se:

$$\bar{x} \in w_i \text{ se } p(\bar{x} | w_i)p(w_i) > p(\bar{x} | w_j)p(w_j) \text{ para todo } i \neq j \quad (4)$$

Sendo $p(w_t)$ a probabilidade de que a classe w_t , seja verificada na imagem. A partir daí, partindo da propriedade natural dos alvos de ter uma distribuição normal de probabilidade para as classes, o critério de decisão passa a:

$$\bar{x} \in w_i \text{ se } g_i(x) > g_j(x) \text{ para todo } i \neq j \quad (5)$$

Onde:

$$g_i(x) = -\ln |\Sigma_i| - (\bar{x} - \bar{m}_i)^t \Sigma_i^{-1} (\bar{x} - \bar{m}_i) \quad (6)$$

Sendo \bar{m} e Σ_i o vetor média e matriz de covariância da classe i calculada em treinamento.

Ressalta-se que o critério de decisão deve considerar o limiar de decisão, que indica a percentagem de pixels que irá pertencer a uma classe considerando-se a distribuição de probabilidade desta classe, o que equilibra a chance de algum pixel ser classificado erroneamente por estar no limite entre classes, ou por ter sido inserido erroneamente no treinamento. Um limite de 95%, por exemplo, ignora os 5% dos pixels de menor probabilidade, que deve ser classificado pelo operador *a posteriori*.

Os métodos de classificação não supervisionados, por sua vez, são feitos a partir da associação estatística, através de métodos de agrupamento por similaridade, de um pixel a uma classe espectral sem o conhecimento prévio do operador sobre estas classes ou sua quantidade. São utilizados quando não há dados de treinamento sobre a área, ou quando estes dados não são confiáveis, ou mesmo como base para uma classificação supervisionada. Um algoritmo comum para a classificação não supervisionada é o Isoseg⁷.

Os classificadores também podem subdividir-se entre classificadores pixel a pixel, que partem da informação espectral de cada pixel para gerar áreas homogêneas; e classificadores por região, em que a imagem é segmentada em regiões de comportamento espectral semelhante, que posteriormente são associadas a classes (CROSTA, 1992).

A qualidade de classificação pode ser avaliada a partir de sua matriz de confusão. A matriz de confusão, também chamada de matriz de erro, é uma ferramenta para confrontar o número de classificações corretas em uma imagem em relação àquela previstas para cada classe (RICHARDS & JIA, 1999). Segundo Farias Junior (2008) é uma maneira de se calcular tanto medidas de avaliação de hipóteses em problemas de classificação computacional, quanto para avaliar a qualidade de regras de associação.

O intuito da análise da matriz de confusão é de verificar o número de previsões corretas em relação às esperadas para cada regra (MACEDO, 1999). Os acertos se agrupam na diagonal principal da matriz, e os demais elementos representam erros na classificação. Há dois tipos de erros possíveis: de omissão e de inclusão. O erro de omissão é decorrente de pixels classificados em categorias erradas, e o erro de inclusão está relacionado à classe que recebe pixels que não pertencem a ela. A matriz de confusão é uma ferramenta ideal porque possui todos os seus elementos iguais a zero, uma vez que não comete erros. Ressalta-se, todavia,

⁷ Para maior detalhamento do método, ver Fonseca (2000).

que atingir este ideal é bastante difícil, uma vez que muitos alvos possuem características espectrais semelhantes.

A validação das classificações geralmente é feita a partir do índice de Kappa. O índice Kappa é baseado e na medida de concordância entre a classificação obtida e a referência (dados de campo) adotada para a estimativa da exatidão e em critérios da análise multivariada discreta (PONZONI & ALMEIDA, 1996). O índice de Kappa é definido pela função (FONSECA, 2000):

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad (7)$$

Onde:

r é o número de linhas ou colunas da matriz de confusão;

x_{ii} é o número de observações na diagonal da matriz;

$x_{i+} = \sum_j x_{ij}$ é a soma dos valores da linha i ;

$x_{+i} = \sum_j x_{ji}$ é a soma dos valores da coluna i ;

e N é o número total de observações.

Utiliza-se o índice Kappa como ferramenta de análise das classificações, a partir dos limites estabelecidos por Landis e Koch (1977) (HAYAKAWA et al., 2009), conforme o Quadro 5.

Quadro 5: Limiares do índice Kappa utilizados

Índice Kappa	Desempenho da classificação
0,00	Péssima
0,01 a 0,20	Ruim
0,21 a 0,40	Razoável
0,41 a 0,60	Boa
0,61 a 0,80	Muito Boa
0,81 a 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977, p. 165) apud Hayakawa et al. (2009).

A pós-classificação é a última etapa do processo de classificação. Esta etapa constitui-se de um conjunto de procedimentos para uniformização dos resultados, e mais das vezes visa homogeneizar pixels que foram classificados de maneira diversa àqueles a ele adjacente. Esta correção pode ser feita manualmente, através da edição matricial da imagem, ou através de filtros matriciais.

ANEXO B

ESTATÍSTICAS DE CLASSIFICAÇÃO

Matriz de Confusão e Acurácia do Mapeamento - 1994 (%)										
Classe	Reflorestamento	Floresta	Campo	Corpo D'Água	Cultivo	Mineração	Área Ocupada	Total	Comission	User Acc.
Reflorestamento	98,02	1,26%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	9,25%	4,87%	95,13%
Floresta	1,98%	91,90%	1,11%	0,56%	0,00%	0,51%	0,00%	33,48%	1,63%	98,37%
Campo	0,00%	6,78%	89,90%	0,51%	8,94%	0,51%	4,04%	23,72%	14,30%	85,70%
Corpo D'Água	0,00%	0,00%	0,00%	97,24%	0,00%	0,00%	0,00%	18,11%	0,00%	100,00%
Cultivo	0,00%	0,06%	8,34%	0,22%	86,59%	0,00%	2,02%	8,73%	23,29%	76,71%
Mineração	0,00%	0,00%	0,19%	1,29%	0,00%	98,99%	0,51%	2,36%	12,89%	87,11%
Área Ocupada	0,00%	0,00%	0,46%	0,17%	4,47%	0,00%	93,43%	4,36%	11,06%	88,94%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%			
Omission	1,98%	8,10%	10,10%	2,76%	13,41%	1,01%	6,57%			
Prod. Acc.	98,02%	91,90%	89,90%	97,24%	86,59%	98,99%	93,43%			

Precisão Geral = 92.1965%

Coeficiente Kappa = 0.9080

Matriz de Confusão e Acurácia do Mapeamento - 1994 (%)										
Classe	Reflorestamento	Floresta	Campo	Corpo D'Água	Cultivo	Mineração	Área Ocupada	Total	Comission	User Acc.
Reflorestamento	95,90%	0,33%	0,00%	0,16%	0,00%	0,00%	0,00%	12,51%	1,31%	98,69%
Floresta	4,10%	95,67%	1,80%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	44,92%	1,82%	98,18%
Campo	0,00%	3,89%	85,61%	0,78%	7,27%	2,21%	5,00%	16,53%	17,29%	82,71%
Corpo D'Água	0,00%	0,01%	0,06%	96,25%	0,00%	0,00%	0,00%	8,43%	0,16%	99,84%
Cultivo	0,00%	0,00%	8,32%	0,10%	90,39%	0,00%	2,50%	11,58%	12,06%	87,94%
Mineração	0,00%	0,09%	2,19%	2,34%	0,04%	96,76%	0,58%	3,20%	19,20%	80,80%
Área Ocupada	0,00%	0,02%	2,02%	0,31%	2,30%	1,02%	91,92%	2,82%	22,90%	77,10%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%			
Omission	4,10%	4,33%	14,39%	3,75%	9,61%	3,24%	8,08%			
Prod. Acc.	95,90%	95,67%	85,61%	96,25%	90,39%	96,76%	91,92%			

Precisão Geral = 90.8781%

Coefficiente Kappa = 0.8916

Matriz de Confusão e Acurácia do Mapeamento - 2003 (%)										
Classe	Reflorestamento	Floresta	Campo	Corpo D'Água	Cultivo	Mineração	Área Ocupada	Total	Comission	User Acc.
Reflorestamento	95,70%	1,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	16,72%	1,65%	98,35%
Floresta	4,26%	95,56%	1,44%	0,68%	0,00%	0,00%	0,00%	26,16%	4,26%	95,74%
Campo	0,00%	3,28%	93,46%	0,17%	9,14%	0,55%	1,70%	21,59%	9,34%	90,66%
Corpo D'Água	0,00%	0,00%	0,00%	96,49%	0,00%	0,00%	0,00%	11,46%	0,00%	100,00%
Cultivo	0,04%	0,00%	4,11%	0,45%	84,60%	0,74%	3,77%	10,45%	11,32%	88,68%
Mineração	0,00%	0,10%	0,35%	2,21%	0,43%	96,14%	1,58%	7,53%	6,61%	93,39%
Área Ocupada	0,00%	0,00%	0,64%	0,00%	5,83%	2,57%	92,94%	6,09%	15,77%	84,23%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%			
Omission	4,30%	4,44%	6,54%	3,51%	15,40%	3,86%	7,06%			
Prod. Acc.	95,70%	95,56%	93,46%	96,49%	84,60%	96,14%	92,94%			

Precisão Geral = 92.3801%

Coefficiente Kappa = 0.9119

Matriz de Confusão e Acurácia do Mapeamento - 2010 (%)										
Classe	Reflorestamento	Floresta	Campo	Corpo D'Água	Cultivo	Mineração	Área Ocupada	Total	Comission	User Acc.
Reflorestamento	96,41%	0,16%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	13,99%	0,37%	99,63%
Floresta	3,24%	96,15%	7,26%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	31,78%	4,59%	95,41%
Campo	0,00%	3,58%	90,94%	0,67%	3,77%	6,40%	0,10%	15,03%	17,79%	82,21%
Corpo D'Água	0,00%	0,00%	0,14%	97,99%	0,00%	0,09%	0,00%	9,82%	0,36%	99,64%
Cultivo	0,35%	0,11%	1,04%	0,43%	95,12%	0,15%	5,84%	8,28%	6,46%	93,54%
Mineração	0,00%	0,00%	0,52%	0,87%	0,00%	91,32%	2,04%	16,91%	1,42%	98,58%
Área Ocupada	0,00%	0,00%	0,09%	0,00%	1,11%	2,05%	92,02%	4,19%	11,35%	88,65%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%			
Omission	3,59%	3,85%	9,06%	2,01%	4,88%	8,68%	7,98%			
Prod. Acc.	96,41%	96,15%	90,94%	97,99%	95,12%	91,32%	92,02%			

Precisão Geral = 93.2743%

Coefficiente Kappa = 0.9229

ANEXO C

MÉTRICAS DE PAISAGEM

Índices ao Nível de Paisagem

ANALYSIS - LANDSCAPE LEVEL

Tipo	Métrica	Ano			
		1987	1994	2003	2010
Area	<i>Total Area (TA):</i>	458156700,00 m ²	458156700,00 m ²	458156700,00 m ²	458156700,00 m ²
	<i>Total Patches (NP):</i>	6952	5851	6346	6321
Edge	<i>Edge Density (ED):</i>	140,61	128,92	132,54	132,71
	<i>Total Edge (TE):</i>	6442080	5906640	6072420	6080100
	<i>Mean Patch Edge (MPE):</i>	926,65	1009,51	956,89	961,89
Form	<i>Mean Shape Index (MSI):</i>	1,385	1,404	1,396	1,396
	<i>Mean Perimeter-Area Ratio (MPAR):</i>	0,09	0,087	0,09	0,089
	<i>Mean Fractal Dimension (MFRACT):</i>	1,384	1,382	1,384	1,383

Índices ao Nível de Classes

ANALYSIS - CLASS LEVEL										
Ano	Classe	NP	CA	MPS	PSSD	TE	MPE	MSI	MPAR	MFRACT
1987	Mineração e Indústria	140,00	717.300,00	5.123,57	14.509,63	37.440,00	267,43	1,25	0,10	1,39
1987	Campo	2.495,00	77.322.600,00	30.991,02	859.340,52	1.381.860,00	553,85	1,34	0,10	1,39
1987	Cultivo	1.853,00	64.844.100,00	34.994,12	283.980,80	1.539.120,00	830,61	1,44	0,09	1,38
1987	Floresta	705,00	285.413.400,00	404.841,70	7.782.853,65	2.572.620,00	3.649,11	1,50	0,08	1,38
1987	Eucalipto	1.273,00	18.299.700,00	14.375,26	69.696,08	610.380,00	479,48	1,36	0,08	1,38
1987	Área Habitada	426,00	9.431.100,00	22.138,73	256.674,08	252.060,00	591,69	1,37	0,08	1,38
1987	Água	60,00	2.128.500,00	35.475,00	143.290,56	48.600,00	810,00	1,40	0,10	1,39
1994	Mineração e Indústria	421,00	2.373.300,00	5.637,29	38.103,91	113.940,00	270,64	1,26	0,11	1,39
1994	Área Habitada	601,00	13.461.300,00	22.398,17	329.218,15	340.860,00	567,15	1,35	0,08	1,38
1994	Campo	1.701,00	78.708.600,00	46.271,96	1.109.544,04	1.221.120,00	717,88	1,39	0,09	1,39
1994	Floresta	809,00	261.881.100,00	323.709,64	6.745.904,13	2.176.800,00	2.690,73	1,47	0,08	1,38
1994	Eucalipto	993,00	22.325.400,00	22.482,78	104.432,84	585.840,00	589,97	1,39	0,08	1,38
1994	Cultivo	1.255,00	77.206.500,00	61.519,12	465.254,95	1.415.580,00	1.127,95	1,47	0,08	1,38
1994	Água	71,00	2.200.500,00	30.992,96	126.280,89	52.500,00	739,44	1,37	0,10	1,39
2003	Mineração e Indústria	499,00	4.113.000,00	8.242,48	85.155,48	140.520,00	281,60	1,24	0,11	1,40
003	Área Habitada	822,00	17.009.100,00	20.692,34	327.643,38	432.900,00	526,64	1,35	0,09	1,38
2003	Campo	1.706,00	73.546.200,00	43.110,32	1.109.283,62	1.080.600,00	633,41	1,34	0,10	1,39
2003	Floresta	775,00	261.251.100,00	337.098,19	6.651.685,02	2.238.900,00	2.888,90	1,51	0,08	1,38
2003	Cultivo	1.428,00	76.253.400,00	53.398,74	466.966,39	1.527.120,00	1.069,41	1,48	0,08	1,38

ANALYSIS - CLASS LEVEL

Ano	Classe	NP	CA	MPS	PSSD	TE	MPE	MSI	MPAR	MFRAC
2003	Eucalipto	1.044,00	23.705.100,00	22.706,03	131.048,07	596.280,00	571,15	1,39	0,08	1,38
2003	Água	72,00	2.275.200,00	31.600,00	103.144,01	56.100,00	779,17	1,42	0,10	1,39
2010	Água	709,00	4.241.700,00	5.982,65	46.736,36	176.580,00	249,06	1,23	0,11	1,40
2010	Campo	1.525,00	75.911.400,00	49.777,97	1.245.399,12	1.045.440,00	685,53	1,35	0,10	1,39
2010	Área Habitada	1.104,00	21.970.800,00	19.901,09	331.315,75	574.080,00	520,00	1,36	0,09	1,38
2010	Mineração e Indústria	340,00	12.553.200,00	36.921,18	362.144,14	215.880,00	634,94	1,35	0,10	1,39
2010	Cultivo	1.451,00	82.474.200,00	56.839,56	557.485,76	1.639.980,00	1.130,24	1,48	0,08	1,38
2010	Floresta	851,00	241.879.500,00	284.229,73	5.529.422,55	2.057.100,00	2.417,27	1,49	0,08	1,38
2010	Eucalipto	341,00	19.125.900,00	56.087,68	158.558,61	371.040,00	1.088,09	1,51	0,06	1,36