UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Departamento de Cartografia

Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Marcos de Paulo Ramos

Geotecnologia em Perícias Ambientais e na Análise da Qualidade da Água:
Estudos nos Reservatórios de Abastecimento Público da Região Metropolitana de
Belo Horizonte/MG

Marcos de Paulo Ramos

Geotecnologia em Perícias Ambientais e na Análise da Qualidade da Água: Estudos nos Reservatórios de Abastecimento Público da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG

Versão Final

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega

Belo Horizonte Instituto de Geociências da UFMG 2020

R175 2020 Ramos, Marcos de Paulo.

Geotecnologia em perícias ambientais e na análise da qualidade da água [manuscrito] : estudos nos reservatórios de abastecimento público da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG / Marcos de Paulo Ramos. – 2020.

77 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2020.

Inclui bibliografias.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Perícia ambiental – Teses. 3. Monitoramento ambiental – Belo Horizonte, Região Metropolitana de (MG) – Teses. 4. Geotecnologia ambiental – Belo Horizonte, Região Metropolitana de (MG) – Teses. 5. Belo Horizonte, Região Metropolitana de (MG) – Abastecimento de água – Teses. I. Nóbrega, Rodrigo Affonso de Albuquerque. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS





FOLHA DE APROVAÇÃO

GEOTECNOLOGIAS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS: APLICABILIDADE PARA ESTUDOS EM REPRESAS DE ABASTECIMENTO E ÁREAS PROTEGIDAS

MARCOS DE PAULO RAMOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 09 de abril de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega - Orientador UFMG

> andré Name Prof. André Luiz Fonseca Naime

IBAMA

LYSSANDRO **NORTON**

Assinado de forma digital por LYSSANDRO NORTON

SIQUEIRA:988 SIQUEIRA:98860674620 60674620 AGE-M&:27-03'00'

Belo Horizonte, 09 de abril de 2020.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por esta e muitas outras graças alcançadas.

À minha esposa, Dani, por todo amor, carinho, cuidado, paciência, incentivo, cumplicidade e, acima de tudo, compreensão nos momentos de ausência ocasionados pela dedicação a este trabalho.

À minha mãe, Terezinha, pelo amor, pela confiança, pelas orações e pelo apoio total e irrestrito.

Aos meus irmãos e familiares, pelo amor e incentivo contínuo. Em especial, ao Marcony, pela solidariedade, pela ajuda e pelo companheirismo de sempre.

Ao Prof. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega, pelo acolhimento, orientação, apoio, confiança e presteza.

Aos Profs Lyssandro Norton Siqueira, André Luiz Fonseca Naime e Marcelo Antônio Nero, que muito contribuíram na avaliação e melhoria deste trabalho.

Aos colegas da "Modelagem", particularmente ao William, Marina, Dedé, Miluska, Sande, Natália, Castigo, Max e Débora, pela troca de conhecimento e convivência.

À Secretaria Municipal de Planejamento, Orçamento e Gestão – SEPLAN e a Diretoria de Geoprocessamento da Prefeitura de Contagem/MG, por disponibilizarem as fotografias aéreas ortorretificadas da área de estudo.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, pelo apoio financeiro do último ano através do Programa Institucional de Apoio Financeiro para Deslocamento para Programas de Pós-Graduação Stricto Sensu.

À Universidade Federal de Minas Gerais, por todos os conhecimentos adquiridos e por toda a infraestrutura disponibilizada.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para esta caminhada.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a eficiência do emprego de geotecnologias para o aprimoramento dos processos de perícias ambientais e para a análise dos impactos do uso e ocupação do solo na qualidade da água em reservatórios destinado ao abastecimento público. A investigação foi desenvolvida no entorno dos reservatórios de abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG. As geotecnologias analisadas foram o emprego de imagens orbitais de Sensoriamento Remoto e o emprego de análise espacial por métricas de Ecologia da Paisagem. Em um primeiro momento, o trabalho apresenta uma proposta metodológica baseada em uma sequência de análises exploratórias de diferentes soluções de geotecnologias aplicadas a perícias ambientais. Foram avaliados critérios como a facilidade de uso, a disponibilidade geográfica e multitemporal dos dados e a qualidade posicionalgeométrica dos dados para assegurar medições precisas. Os resultados foram promissores e orientados à criação de um protocolo para recomendação em perícias ambientais. Além disso, levantaram-se os prós e os contras de cada solução de geotecnologia no escopo da perícia ambiental quanto à identificação de maneira simples, direta e persuasiva dos danos ambientais. Em um segundo momento, o trabalho introduziu técnicas avançadas de geoprocessamento baseadas em análise de métricas da paisagem e de mapas de transição para investigar as transformações ocorridas na cobertura e uso do solo na região ambientalmente sensível do estudo. Para desenvolver e demonstrar o uso dessas geotecnologias foi proposta a avaliação dos impactos do uso e ocupação do solo na variação do Índice de Qualidade da Água em diferentes épocas. Os resultados demonstraram a correlação direta entre o padrão de cobertura do solo e a qualidade da água. As métricas de paisagem permitiram analisar características específicas das classes de cobertura do solo, como fragmentação, proximidadeisolamento e parâmetros derivados da geometria espacial dessas classes, como área e perímetro de contato com classes adjacentes. A análise multitemporal permitiu conhecer a dinâmica das mudanças e a qualificação das transições entre as classes. Tais indicadores são de vital importância para o entendimento do histórico e das tendências dos impactos ambientais, e o reflexo dessas mudanças na qualidade da água. De um modo geral, mediante realização desta pesquisa foi possível obter resultados significativos quanto às vantagens e os desafios da utilização das geotecnologias na gestão dos recursos hídricos e quanto ao desenvolvimento de protocolos e recomendações de uso de dados geográficos e métodos de análise para aprimoramento das perícias ambientais, visto que foram utilizados somente softwares e dados geográficos disponíveis gratuitamente. São poucos os estudos nessa área no Brasil, sendo este o pioneiro no contexto do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. O trabalho trata de formas de contribuir com a preservação do meio ambiente, assunto pautado na Constituição Federal, pois o texto constitucional, além de assegurar a todos o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, impõe ao poder público e à coletividade o dever de defendê-la e preservá-la para as presentes e futuras gerações.

Palavras-chave: Perícia ambiental, Fiscalização ambiental, Geotecnologias, Abastecimento de água, Paisagem.

ABSTRACT

This research addresses the analysis of the efficient use of technologies on behalf of improving the analytical capabilities of the environmental legal experts, as well as a temporal evaluation of the impacts of different land uses to the water quality. The testbed of the investigation was the water supply reservoirs in the Metropolitan Region of Belo Horizonte/MG. The geotechnologies investigated were the use of orbital images from Remote Sensing and the use of spatial analysis by metrics of Landscape Ecology. At first, the dissertation brings a methodological approach was based on a sequence of exploratory analyzes of different solutions of geotechnologies applied from environmental experts. The easiness of use of geographic and multitemporal data availability, positional accuracy, and quality of data were the criteria evaluated. The pros and cons of each solution were reported regarding the identification of environmental damage in a simple, direct and persuasive manner. The results are promising and enable to orient the creation of a protocol towards the recommendation for environmental inspection and expertise. Then, in the following chapter, the research put together advanced geoprocessing techniques based on landscape analysis and transition maps to investigate the changes in land cover and land use in the environmentally sensitive region of the study and their potential impact to the variation of the Water Quality Index at different times. Findings indicate a correlation between the pattern of soil cover and water quality. Such indicators are vitally important for understanding the history and trends of environmental impacts, and the reflection of these changes in water quality. The landscape metrics allowed to analyze specific characteristics of the land cover types, such as fragmentation, proximity-isolation, and parameters derived from the spatial geometry of these classes like the area and perimeter of contact with adjacent classes. The multitemporal analysis allowed to know the dynamics of the changes and the qualification of the transitions between classes. In short, this research made it possible to obtain significant results regarding the advantages and challenges of using geotechnologies in the management of water resources as well as regarding the development of protocols and recommendations for the use of geographic data and methods of analysis to improve the environmental expertise. It is important to highlight only free software and publicly available geographic data were used in this research. This investigation was the pioneer in the context of the Post-Graduate Program in Analysis and Modeling of Environmental Systems. The theme focuses on legal environmental preservation based on the Federal Constitution that, in addition to ensuring everyone the right to an ecologically balanced environment, imposes on the public authority and on the society a duty to defend it and preserve it for present and future generations.

Keywords: Environmental expertise, Environmental inspection, Geotechnologies, Water supply, Landscape.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10				
1.1 HIPÓTESES	12				
1.2 OBJETIVOS					
•	13				
1.4 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS OBJETOS DO					
	14				
	14				
6	15				
	16				
	18				
<u>.</u>	19				
^	20				
2 GEOTECNOLOGIAS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS	23				
2.1 ESTUDOS EM RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO E ÁREAS					
	23				
2.2 ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DE VARGEM DAS					
	26				
2.3 RECURSOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	27				
	28				
2.3.2 MapBiomas	29				
	29				
	30				
	30				
	31				
	32				
2.4.2 Seleção da área de estudo	32				
2.4.3 Definição dos estudos de caso	33				
2.4.4 Abordagem qualitativa (análise visual)	33				
	34				
	34				
2.4.5.2 Análise das métricas da paisagem	34				
	35				
2.5 RESULTADOS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS	35				
2.5.1 Levantamento das informações da ação pericial e dos dados geográficos	35				
2.5.2 Análise qualitativa e quantitativa do emprego de geotecnologia em perícia					
	37				
2.5.2.1 Análise multitemporal	37				
2.5.2.2 Mensuração de irregularidades	38				
	39				
\mathcal{C}	39				
	40				
2.6 DISCUSSÕES EM PERÍCIAS AMBIENTAIS	43				
	46				
2 & REFERÊNCIAS	47				

3 GEOTECNOLOGIAS E QUALIDADE DA ÁGUA	49
3.1 ESTUDOS EM RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO	49
3.2_RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO DA REGIÃO	
METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE/MG	52
3.3 RECURSOS MATERIAIS	46
3.4 PROPOSTA METODOLÓGICA	57
3.4.1 Identificação das métricas para estudo da expansão urbana e da	
fragmentação florestal	58
3.4.1.1 Técnicas de geoprocessamento e preparação das informações	58
3.4.1.2 Cálculo das Métricas da Paisagem	59
3.4.2 Análise dos índices de qualidade da água	59
3.4.3 Análise dos índices de coleta e tratamento de esgoto	60
3.4.4 Análise do impacto da expansão urbana e da fragmentação florestal na	
qualidade da água	60
3.4.5 Análise de efetividade das ferramentas de geoprocessamento e dos dados	
geográficos	60
3.5 RESULTADOS NA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA	91
3.5.1 Análise e validação das imagens de uso e cobertura do solo da Plataforma	
MapBiomas	61
3.5.2 Métricas da Paisagem	63
3.5.2.1 Reservatório Serra Azul	63
3.5.2.2 Reservatório Vargem das Flores	65
3.5.2.3 Reservatório Rio Manso	67
3.6 DISCUSSÕES NA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA	70
3.7 CONCLUSÕES NA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA	72
3.8 REFERÊNCIAS	74
4. CONCLUSÕES	77

LISTA DE FIGURAS

1 INTRODUÇAO	
Figura 1.1 - Estrutura e elementos da paisagem	17
2 GEOTECNOLOGIAS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS	
Figura 2.1 - Área de estudo	26
Figura 2.2 - Metodologia proposta	31
Figura 2.3 - Sequência histórica de imagens de área fiscalizada (loteamento em	
área rural)	38
Figura 2.4 - Áreas examinadas com ortofoto	40
Figura 2.5 - Uso e cobertura do solo para a área de estudo em 1996 e 2016	41
3 GEOTECNOLOGIAS E QUALIDADE DA ÁGUA	
Figura 3.1 - Área de estudo	53
Figura 3.2 - Fluxograma síntese da metodologia proposta	57
Figura 3.3 – Bacia de contribuição Represa Serra Azul	64
Figura 3.4 – Bacia de contribuição da Represa Vargem das Flores	66
Figura 3.5 – Bacia de contribuição da Represa Rio Manso	68

LISTA DE QUADROS

2 GEOTECNOLOGIAS EM PERICIAS AMBIENTAIS	
Quadro 2.1 - Informações gerais sobre a fonte de dados utilizada	28
Quadro 2.2 - Informações gerais sobre a fonte de dados utilizada	30
Quadro 2.3 - Irregularidades apontadas para os estudos de caso escolhidos	36

LISTA DE TABELAS

2 GEOTECNOLOGIAS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS	
Tabela 2.1 - Área das classes em hectare e percentual para os anos 1996 e 2016	42
Tabela 2.2 - Matriz de transição (software Dinamica EGO). Perda e ganho de	
área entre classes em hectares (ha)	43
3 GEOTECNOLOGIAS E QUALIDADE DA ÁGUA	
Tabela 3.1 – Índice de Qualidade da Água (IQA) para as estações BP069,	
BP088 e BP096	55
Tabela 3.2 - Índice de coleta e tratamento de esgoto para o município que	
compõem a bacia hidrográfica dos reservatórios	55
Tabela 3.3 - Informações gerais sobre a fonte de dados utilizada	56
Tabela 3.4 - Classificação de qualidade da água	60
Tabela 3.5 - Irregularidades apontadas para os estudos de caso escolhidos	61
Tabela 3.6 – Matriz de confusão e Índice Kappa – Reservatório Serra Azul -	
2007 (a) e 2017 (b)	62
Tabela 3.7 – Matriz de confusão e Índice Kappa – Reservatório Serra Azul -	
2007 (a) e 2017 (b)	62
Tabela 3.8 - Matriz de confusão e Índice Kappa - Reservatório Rio Manso -	
2007 (a) e 2017 (b)	62
Tabela 3.9 – Área das classes em hectare e percentual – Reservatório Serra Azul	
para os anos 2007 e 2017	64
Tabela 3.10 – Métricas da paisagem do Reservatório Serra Azul para os anos	
2007 (a) e 2017 (b)	65
Tabela 3.11 – Área das classes em hectare e percentual – Reservatório Vargem	
das Flores para os anos 2007 e 2017	66
Tabela 3.12 – Métricas da paisagem do Reservatório Vargem das Flores para os	
anos 2007 (a) e 2017 (b)	67
Tabela 3.13 – Área das classes em hectare e percentual – Reservatório Rio	
Manso para os anos 2007 e 2017	68
Tabela 3.14 – Métricas da paisagem do Reservatório Rio Manso para os anos	
2007 (a) e 2017 (b)	69
Tabela 3.15 – Resumo dos resultados para os três reservatórios (Serra Azul,	
Vargem das Flores e Rio Manso)	70

1 INTRODUÇÃO

A expansão dos centros urbanos tem modificado a paisagem das cidades e dos seus arredores, e de maneira agressiva tem convertido espaços reservados à proteção ambiental e espaços inadequados à moradia em áreas residenciais. A intensificação da pressão sobre áreas com vegetação natural, áreas de recarga hídrica e áreas próximas a cursos d'água e reservatórios tem causando a fragmentação da paisagem e a intensa degradação do meio ambiente (BARBOSA; NASCIMENTO JR., 2009).

Sabe-se que no planejamento urbano e nos planos diretores das cidades existem diretrizes para o uso e ocupação do solo, porém, esses instrumentos e legislações de planejamento e gestão territorial não têm cumprido seus respectivos papéis frente à expansão urbana contínua, desordenada e irregular. Essa prática fere os princípios básicos de uma sociedade ambientalmente sustentável, sendo imprescindível que o poder público tome iniciativas para viabilizar o planejamento ambiental em consonância com a ecologia urbana. A preservação das matas, dos cursos e espelhos d'água é vital e urgente, posto que são fontes de serviços ecossistêmicos importantes para garantir a sustentabilidade ambiental das cidades (FRANCO, 2001).

Em todo o mundo, lagos e reservatórios situados nos centros urbanos - e em seus entornos - exercem funções muito importantes para o funcionamento das cidades, como água para abastecimento humano e armazenamento de águas pluviais para auxiliar no controle de inundações. Também podem configurar-se espaços de lazer e de prática de esportes e, muitas vezes, representam verdadeiros valores patrimoniais (STOIANOV *et al.*, 2000). Além disso, a grande concentração de pessoas em cidades de todo o mundo ameaça mananciais como lagos, rios e lençóis freáticos, bem como coloca em risco possíveis fontes hídricas, já que grandes quantidades de água doce são utilizadas para o saneamento urbano. Nesse sentido, cumpre lembrar que a maior parte das águas residuais é devolvida para o ambiente sem tratamento, gerando danos para as pessoas e os ecossistemas.

Diante dessas questões e outras, em várias regiões do mundo a preocupação com o meio ambiente torna-se cada vez mais presente devido à pressão do desenvolvimento econômico e ao crescimento demográfico sobre o mesmo. Assim, é importante que se dê atenção especial sobre a questão dos conflitos de uso do solo, pois estes têm causado a degradação social e ambiental do espaço urbano (BARBOSA; NASCIMENTO JR.,

2009).

Essa crescente conscientização sobre a necessidade de repensar nossa relação com o planeta tem se refletido em mudanças de comportamento e na elaboração de ordenamentos jurídicos cada vez mais complexos, que visam reparar erros passados e prevenir futuros (LIMA, 2013). Como exemplo, no Brasil, pode-se destacar o Novo Código Florestal (Lei 12.651/2012), o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (Lei 9.985 - 2000), a Lei dos Crimes Ambientais (Lei Federal nº 9605/1998) e a própria Constituição Federal.

A Constituição Federal, em seu art. 225, assegura a todos o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, impondo, por consequência, restrições e obrigações a todos aqueles que exerçam atividades potencialmente causadoras de significativa degradação desse, e impõem ao poder público e à coletividade o dever de defender e preservar o meio ambiente ecologicamente equilibrado para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988).

As legislações ambientais vigentes e a Constituição Federal nos permitem afirmar que cabe ao poder público prevenir e controlar a poluição, a erosão, o assoreamento, o desmatamento, e outras formas de degradação ambiental, e que condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, às sanções administrativas, sem prejuízo das obrigações de reparar o dano e das cominações penais cabíveis.

A fiscalização ambiental, um importante instrumento de gestão territorial, é utilizada pelo poder público para garantir a integridade do meio ambiente, assegurar o uso racional dos recursos ambientais e restringir as ações prejudiciais ao mesmo. A fiscalização ambiental é o exercício do poder de polícia previsto na legislação ambiental. Ela consiste no dever que o Poder Público tem de fiscalizar as condutas daqueles que se apresentem como potenciais ou efetivos poluidores e utilizadores dos recursos naturais, com o objetivo de garantir a preservação do meio ambiente para a coletividade. Nesse sentido, para reprimir e prevenir a ocorrência de condutas lesivas ao meio ambiente, e, consequentemente, para vir a punir aqueles que causam os danos ambientais, é necessária a fiscalização ambiental, que poderá promover a dissuasão dessas condutas. Também a aplicação de multas, apreensões, embargos, interdições, entre outras medidas, têm o objetivo de impedir o dano ambiental, punir infratores e evitar futuras infrações ambientais (IBAMA, 2016).

Considerando-se as peculiaridades dos tipos de danos ambientais previstos pela legislação, a comprovação de sua materialidade requer utilização de técnicas específicas, dentre as quais se destacam o uso das geotecnologias, objeto central da presente dissertação. Diante desse contexto, torna-se necessário: [1] demonstrar a viabilidade do emprego de geotecnologias para aprimoramento do processo de perícia ambiental; e [2] analisar os impactos das alterações no uso e ocupação do solo na qualidade da água em reservatórios de abastecimento público de Região Metropolitana. Ambas as proposições são objetos de estudo da presente dissertação de mestrado.

1.1 HIPÓTESES

Diante do exposto, definem-se como hipóteses deste trabalho:

- i. É possível desenvolver uma metodologia para a produção de provas periciais ambientais a partir da utilização das geotecnologias com uso apenas de imagens, dados e *softwares* disponíveis gratuitamente.
- ii. É possível analisar os impactos das alterações do uso e cobertura do solo na qualidade da água em reservatório destinado a abastecimento público utilizando-se as geotecnologias.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva, de forma geral, desenvolver estudos na área de Sistemas de Informações Geográficas — SIG; Sensoriamento Remoto; Sistemas de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS); Ecologia da Paisagem, entre outras geotecnologias, que possam ser aplicados no aprimoramento dos processos de perícias ambientais e na análise dos impactos do uso e ocupação do solo na qualidade da água no entorno dos reservatórios destinados ao abastecimento público da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG.

São objetivos específicos desta pesquisa:

- i. Revelar as lacunas e as principais demandas por soluções de geotecnologia no apoio às atividades de perícia ambiental;
- ii. Desenvolver um estudo de caso, aplicando e analisando diferentes soluções de geoprocessamento no apoio à perícia ambiental;

- iii. Analisar, de forma qualitativa e quantitativa, os resultados do emprego das diferentes soluções de geotecnologia dentro do escopo do processo pericial;
- iv. Analisar o potencial de uso de *softwares* e dados geográficos gratuitos no apoio à perícia ambiental e na gestão dos recursos hídricos.
- v. Elencar as vantagens, as desvantagens, as mudanças de paradigma e os desafios de sua utilização.
- vi. Analisar o controle de qualidade temática dos mapas da Plataforma MapBiomas;
- vii. Analisar a expansão urbana e a fragmentação florestal da área de estudo;
- viii. Analisar os impactos das alterações do uso e ocupação do solo e da expansão urbana e fragmentação florestal na qualidade da água;
- ix. Elencar os desafios da utilização das geotecnologias na gestão dos recursos hídricos.

1.3 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA

O principal objetivo de se estudar a aplicação das geotecnologias na análise dos impactos do uso e ocupação do solo na qualidade da água e no aprimoramento dos processos de perícias ambientais é produzir informações que corroboram e deem suporte ao judiciário e ao poder público em maneira geral na preservação do meio ambiente. Nesse sentido, revelar as lacunas e as principais demandas por soluções de geotecnologias no apoio às atividades de perícia ambiental e na gestão dos recursos hídricos torna-se cada vez mais importante. Avaliar a qualidade, o potencial de uso, bem como conhecer o limite de utilização dos dados geográficos utilizados tornaram-se tarefas indispensáveis.

Embora popular, o uso das geotecnologias em diferentes áreas da ciência, principalmente em análises ambientais, ainda carece da especificação de protocolos, regulamentos e diretrizes específicas para essa atividade. Diante disso, o desenvolvimento de metodologias que detalham alguns procedimentos e que esclareçam a importância da utilização das geotecnologias e eventuais limites de sua utilização é altamente necessário, pois o uso ou tratamento inadequado dos dados pode gerar distorções e comprometer a qualidade do produto cartográfico final, bem como colocar em dúvida as conclusões alcançadas.

O trabalho entra também em um tema vital relacionado ao emprego de geotecnologias em análises de recursos hídricos. A pesquisa investiga o potencial de análises baseadas em mudanças de classes de uso e ecologia da paisagem para subsidiar informações que possam diagnosticar e prognosticar a influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em reservatórios de abastecimento.

Assim, é nítida a necessidade de discutir e apresentar métodos que analisam os dados geoespaciais, que detalham alguns procedimentos e que esclarecem eventuais limites de sua utilização em análises ambientais. A pesquisa trata de formas de contribuir com a preservação do meio ambiente, assunto pautado no art. 255 da Constituição Federal, pois o texto constitucional, além de assegurar a todos o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, impõe ao poder público e à coletividade o dever de defendê-la e preservá-la para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988).

1.4 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS OBJETOS DO ESTUDO

1.4.1 Geotecnologias

Geotecnologia pode ser entendida como o conjunto de tecnologias associadas à coleta, processamento, análise e disponibilização de informações espaciais ou geográficas (MOREIRA *et al.*, 2007). Estas, por meio de técnicas matemáticas e computacionais, constituem poderosas ferramentas analíticas para tomada de decisão, também chamadas de "Geoprocessamento", que vêm influenciando, de maneira crescente, as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional (CÂMARA *et al.*, 2001; CHOI *et al.*, 2020). Dentre estas geotecnologias estão o Sensoriamento Remoto; Sistemas de Informações Geográficas – SIG; Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS); Ecologia da Paisagem; e outros.

O sensoriamento remoto (SR) é classicamente definido como um conjunto de técnicas desenvolvidas com a finalidade de obter informações acerca de objetos sem que haja o contato direto com o mesmo. Para que seja possível o SR, são necessários: um sensor para captação de algum estímulo, um objeto de onde provém o estímulo para o sensor e uma fonte geradora do estímulo. Segundo Moreira (2005), os sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação. Os

níveis de aquisição dos dados de sensoriamento remoto podem ser orbital (satélites artificiais), aéreo (aeronaves tripuladas e não tripuladas) ou terrestre (manual ou a bordo de automóveis), conforme a localização dos sensores. Dados produzidos com técnicas de Sensoriamento Remoto e outras técnicas podem ser armazenados e manipulados em Sistemas de Informações Geográficas.

Já os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) incluem dados, métodos e ferramentas (hardware, software e operação) computacionais que permitem o armazenamento e a associação de diversos dados georreferenciados, tornando possível a análise dos mesmos. Os SIGs integram pessoas, dados, programas computacionais e equipamentos para a captura, manejo, análise e disponibilidade de informações geograficamente referenciadas. Além disso, fornecem informações em forma gráfica (mapas) e estruturada (tabelas, relatórios, páginas eletrônicas), contendo dados a elas associadas, podendo ser utilizados em qualquer campo em que seja necessária a espacialização da informação. Dessa forma, podem ser observados trabalhos que utilizam SIGs nas áreas de hidrologia, recursos hídricos, agricultura, pecuária, meio ambiente, eletricidade, transportes, turismo e saúde pública, somente para citar alguns exemplos.

1.4.2 Geotecnologias em Perícia Ambiental

Acerca do uso das geotecnologias em perícia ambiental, diversos trabalhos nacionais e internacionais têm evidenciado a importância do uso dessas ferramentas nesse campo. Entre os trabalhos internacionais relativos ao tema pode-se citar: Brilis *et al.* (2000a) e Brilis *et al.* (2000b), que forneceram uma visão geral sobre o uso de imagens aérea, Sistemas de Informações Geográficas, Sistema Global de Navegação por Satélite, mapeamento topográfico e fotogrametria em ações de fiscalização ambiental. E entre os nacionais temos: Boeira *et al.* (2015), que identificaram e quantificaram os danos ambientais e materiais ocorridos após uma cheia histórica no reservatório periciado; Gasparini *et al.* (2013), que demonstraram ser eficiente o uso dessas tecnologias no que tange ao cumprimento das leis ambientais, em especial aos conflitos do uso da terras e ocupação indevida de Áreas de Preservação Permanente – APP; Silva e Barbosa (2013), que destacaram a importância do Sensoriamento Remoto no diagnóstico de impactos ambientais; Caldas *et al.* (2009), que descreveram três exemplos do uso de sensoriamento remoto na perícia criminal federal; Alves e Russo

(2011), que relataram uma análise multitemporal de imagens LANDSAT 5 como ferramenta para a elaboração de laudo pericial; e Lima (2013), que destacou os pontos positivos e os cuidados na utilização das geotecnologias em perícia ambiental criminal. Esta pesquisa se diferencia das demais devido ao fato de propor metodologias que utilizam somente *softwares* e dados disponíveis gratuitamente e, para tanto, preocupouse em detalhar procedimentos e eventuais limites de utilização de cada produto cartográfico analisado e em enfatizar o caráter explicativo-exploratório da pesquisa.

Vale destacar que a decisão sobre o produto cartográfico mais adequado a se utilizar em perícias ambientais envolve muitas variáveis, entre as quais se destacam o custo, a qualidade posicional, a disponibilidade para o local e época desejados e a capacidade de extração das informações essenciais. Em algumas vezes, a melhor escolha em potencial pode não ser capaz de fornecer os elementos necessários para provar um dano (ou impacto) ambiental num local específico. No entanto, o uso prático destes recursos demanda certos cuidados, tanto pelas suas limitações inerentes, como pela possibilidade de aplicação de tratamento inadequado aos dados, que pode gerar distorções e comprometer a qualidade do produto cartográfico final.

1.4.3 Ecologia da Paisagem

A Ecologia da Paisagem também deve ser considerada uma geotecnologia por recorrer a métodos analíticos de geoprocessamento. Trata-se de uma área de conhecimento dentro da ecologia marcada pela existência de duas principais abordagens: uma ecológica, que enfatiza a importância do contexto espacial sobre os processos ecológicos, e a importância destas relações em termos de conservação biológica; e a outra geográfica, que privilegia o estudo da influência do homem sobre a paisagem e a gestão do território – abordagem adotada neste trabalho (METZGER, 2001).

Dizemos que paisagem é o lugar onde não estamos. Sempre precisamos nos distanciar para observá-la, pois ela nunca está no primeiro plano. Há, portanto, sempre uma noção de amplitude, de distanciamento, pois a paisagem é o que se vê de longe. Neste contexto, uma paisagem pode se apresentar sob a forma de mosaico, contendo três elementos básicos distintos: mancha (patch), matriz (fundo predominante) e corredor (conexões entre as manchas). Na Figura 1.1 é apresentado um exemplo desses três elementos e as relações espaciais entre eles. Esses são elementos que permitem a

comparação entre paisagens distintas.

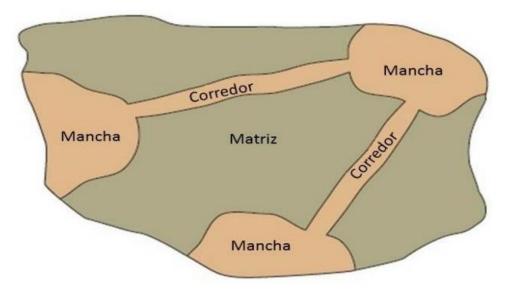


Figura 1.1 - Estrutura e elementos da paisagem. **Fonte**: adaptado Barnes (2000).

Metzger (2001) destaca alguns termos utilizados na ecologia da paisagem:

- Corredores: Áreas homogêneas (numa determinada escala) de uma unidade da paisagem, que se distinguem das unidades vizinhas e que apresentam disposição espacial linear. Em estudos de fragmentação, considera-se corredor apenas os elementos lineares que ligam dois fragmentos anteriormente conectados.
- Fragmento: Uma mancha originada por fragmentação, isto é, por subdivisão, promovida pelo homem, de uma unidade que inicialmente apresentava-se sob a forma contínua, como uma matriz.
- Manchas: Áreas homogêneas (numa determinada escala) de uma unidade da paisagem, que se distinguem das unidades vizinhas e têm extensões espaciais reduzidas e não-lineares.
- Matriz: Em geral, essa unidade pode ser reconhecida por recobrir a maior parte da paisagem (ou seja, sendo a unidade dominante em termos de recobrimento espacial), ou por ter um maior grau de conexão de sua área (isto é, um menor grau de fragmentação).

Segundo Botequilha-Leitão e Ahern (2002), a estrutura de uma paisagem e as relações espaciais resultantes entre seus elementos individuais podem ser descritos e quantificados por meio de métricas que fornecem informações sobre o conteúdo de um

mosaico, como, por exemplo, a proporção de cada tipo ou categoria da paisagem presente na área de estudo, o tamanho dos fragmentos ou a forma dos elementos dessa paisagem. O termo "métricas da paisagem" refere-se, exclusivamente, a índices desenvolvidos para padrões de mapas categóricos e são algoritmos que quantificam características espaciais de fragmentos (COUTO, 2004).

A ecologia da paisagem envolve o estudo de padrões desta, das interações entre os fragmentos dentro de um mosaico da paisagem, e de como esses padrões e interações se modificam com o tempo. Ela não se preocupa apenas com o quanto há de um componente particular, mas também com a forma como ele é organizado (TURNER *et al.*, 2001).

Diversos trabalhos se valeram do conceito de ecologia da paisagem para analisar, quantificar e avaliar a estrutura e as mudanças na paisagem. Dentre eles, podese destacar os que estudaram a expansão urbana (SILVA et al., 2012 e BARBOSA; NASCIMENTO JR., 2009) e os que analisaram a fragmentação florestal (SAITO et al., 2016 e BEZERRA et al., 2011). Considerando que as mudanças na paisagem estão correlacionadas à qualidade das águas, temos também estudos que demonstraram a importância do gerenciamento do uso e ocupação do solo na qualidade da água (CAREY et al., 2011; URIARTE et al., 2011; e WILSON; WENG, 2011). Temos, ainda, que uma forma de acompanhar o estado geral de qualidade da água é através da utilização de Índices de Qualidade da Água (IQA), que representam em um único número a influência de diferentes parâmetros de qualidade da água e trazem informações da referida qualidade para os tomadores de decisão (LUMB et al., 2011, TYAGI et al., 2013, GAO et al., 2016).

1.4.4 Cobertura e Uso do Solo e Mapas de Transição

O uso e ocupação da terra podem ser sintetizados através de mapas. Esses mapas podem identificar a distribuição espacial da tipologia da ação antrópica e essa identificação é de grande importância para o planejamento, pois orienta a ocupação da paisagem, respeitando sua capacidade de suporte e sua vulnerabilidade (LEITE; ROSA, 2012). Nesse sentido, por esse e outros motivos, sempre foi uma necessidade dos seres humanos conhecer a dinâmica de uso e ocupação da terra (IBGE, 2013). Além disso, a avaliação das mudanças na paisagem é fundamental para a eficiência na gestão

territorial, pois pode subsidiar tomadas de decisões relacionadas ao uso e conservação de recursos naturais e ambientais.

Alterações de uso e cobertura da terra constituem mudanças nas suas dimensões e, ao mensurar essas transformações no tempo e espaço, é possível obter indicadores relevantes que podem auxiliar nos trabalhos de gestão territorial.

Logo, obter um mapa de transição ou calcular a matriz de transição entre dois mapas nos ajudaria a conhecer a dinâmica de uso e ocupação do solo. A matriz de transição define a quantidade líquida de mudanças, ou seja, determina o percentual de cada classe que mudou para outra. Essa matriz pode ser calculada no *software* Dinamica EGO (SOARES *et al.*, 2009).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa visa, de modo geral, ao estudo sobre o uso das geotecnologias aplicado a perícias ambientais e na análise da qualidade da água, especificadamente, em reservatórios destinados ao abastecimento público em Região Metropolitana. São poucos os estudos nessa área no Brasil, sendo este o pioneiro no contexto do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Durante o percurso da pesquisa, foram desenvolvidos dois estudos independentes, apesar de complementares no escopo da dissertação. O presente documento está dividido em quatro tópicos, conforme segue:

INTRODUÇÃO – apresenta uma introdução sobre geotecnologias e suas aplicações em perícias ambientais e análise da qualidade da água, os objetivos gerais e específicos da pesquisa, justificativas e a importância do presente estudo.

GEOTECNOLOGIAS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS – tem como objetivo demonstrar a viabilidade do emprego de geotecnologias para aprimoramento do processo de perícia ambiental através da utilização de *softwares* e dados geográficos gratuitos. Neste capítulo analisou-se, de forma qualitativa e quantitativa, o emprego das diferentes soluções de geotecnologia dentro do escopo do processo pericial. O conteúdo deste capítulo corresponde a um artigo aprovado para publicação, em 08 de março de 2020, na Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais – RICA.

GEOTECNOLOGIAS E QUALIDADE DA ÁGUA – tem como objetivo demonstrar como as geotecnologias podem contribuir na análise dos impactos das alterações no uso e ocupação do solo na qualidade da água em reservatórios de

abastecimento público de região metropolitana. Neste capítulo foram analisados os impactos das alterações do uso e ocupação do solo, especificadamente, a expansão urbana e a fragmentação florestal na qualidade da água.

CONCLUSÕES – seção que reporta à conclusão e à convergência dos pontos investigados no trabalho. São também expostas as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

1.6 REFERÊNCIAS

ALVES, R. A. L.; RUSSO, D. Análise multitemporal de imagens LANDSAT 5 no apoio a confecção de laudo pericial da Polícia Federal sobre desmatamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 30 abril a 5 de maio de 2011. **Anais... INPE**, p. 2959-2966, 2011.

BARBOSA, V. L.; NASCIMENTO JÚNIOR, A. F. Paisagem, ecologia urbana e planejamento ambiental. **Revista Geografia**, Londrina, v. 18, n. 2, 2009.

BARNES, T. G. Landscape Ecology and Ecosystems Management. **Cooperative Extension Service**, Lexington, n. 76, p.1-8, 2000.

BEZERRA, C. G.; SANTOS, A. R.; PIROVANI, D. B.; PIMENTEL; L. B.; EUGENIO, F. C. Estudo da fragmentação florestal e ecologia da paisagem na sub-bacia hidrográfica do Córrego Horizonte, Alegre, ES. **Revista Espaço & Geografia**, v.14, n. 2, p. 257-277, 2011.

BOEIRA, A. S.; BERNINI, H.; CARNEIRO, A. S.; SILVA, D. T. Uso de geoprocessamento como ferramenta para perícia ambiental de uma área atingida pelo reservatório da Usina Santo Antônio - Rio Madeira. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm. Acesso em: 06 out. 2017.

BRILIS, G.M., GERLACH, C.L., v. WAASBERGEN, R.J. Remote sensing tools assist in environmental forensics: Part I. Digital tools - traditional methods. **Environmental Forensics** v. 1, p. 63-67, 2000a.

BRILIS, G.M., VANWAASBERGEN, R.J., STOKELY, P.M., GERLACH, C.L. Remote sensing tools assist in environmental forensics: Part II. Digital tools. **Environmental Forensics**, v. 1, p. 1-7, 2000b

BOTEQUILHA-LEITÃO, A.; AHERN, J. F. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 52, n.2, p. 65-93, 2002.

- CALDAS, A. J. F. S.; ROTTA, G. V.; GÓES, E. K.; SCHAMNE, J.A. Sensoriamento remoto na perícia ambiental da polícia federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, 25-30 abril 2009. **Anais... INPE**, p. 3621-3628, 2009.
- CÂMARA, G. (Org.); DAVIS, C. (Org.); MONTEIRO, A. M. V. (Org.); PAIVA, J. A. (Org.); D'AGE, J. C. L. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. INPE Edição On-line, 2001. v. 1. Disponível em http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/. Acesso em: 16 fev. 2019.
- CAREY, R. O.; MIGLIACCIO, K. W.; LI, Y. C.; SCHAFFER, B.; KIKER, G. A.; BROWN, M. T. Land use disturbance indicators and water quality variability in the Biscayne Bay Watershed, Florida. **Ecolog. Indic.** v. 11, p. 1093-1104, 2011.
- CHOI Y., BAEK J., PARK S. Review of GIS-Based Applications for Mining: Planning, Operation, and Environmental Management. **Applied Sciences**, v.10, n.7, p. 1-25, 2020.
- COUTO, P. 2004. Análise factorial aplicada a métricas da paisagem definidas em FRAGSTATS. Associação Portuguesa de Investigação Operacional, p.109-137.
- FRANCO, M. A. de R. **Planejamento ambiental para a cidade sustentável**. São Paulo: Annablume: Fapesp, 2001.
- GAO, Q.; LI,Y.; CHENG, Q.; YU, M.; HU, B.; WANG, Z.; YU, Z. (2016) Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the three gorges reservoir, China, from 2008 to 2013. **Water Res,** v. 92, p. 262.274. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.watres. 2015.12.055. Acesso em 21 nov. 2019.
- GASPARINI, K. A. C.; LYRA, G. B.; FRANCELINO, M. R.; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA JUNIOR, J. F.; FACCO, A. G. Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aplicadas na Identificação de Conflitos do Uso da Terra em Seropédica-RJ. **Revista Floresta e Ambiente FLORAM**, v. 20. n. 3, p. 296-306, 2013.
- IBAMA. **O que é fiscalização ambiental**. Disponível em: < http://www.ibama.gov.br/fiscalizacao-ambiental/o-que-e-fiscalizacao>. Acesso em: 06 fev. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra.** Manuais técnicos em geociências, 2013.
- LEITE, F. E., ROSA, R. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. **OBSERVATORIUM: Revista Eletrônica de Geografia**, v.4, n.12, p. 90-106, dez. 2012.
- LIMA, C. A. F. Correções Geométricas para a Utilização de Imagens em Perícias Criminais Ambientais. 2013. 152f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Perícias Criminais Ambientais, Florianópolis, 2013.

- LUMB, A.; SHARMA, T.; BIBEAULT, J A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions. **Water Qual Expo Health**, v. 3, p. 11–24, 2011.
- MOREIRA, M.A.; RAFAELLI, R.D.; BARROS, M.A.; FARIA, V.G.C. de; AULICINO, T.L.I.N.; CARVALHO, M.A. de. **Uso da Geotecnologia para avaliar e monitorar a cafeicultura brasileira:** Fase I Estado de Minas Gerais. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. 88 p.
- METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotrópica**, v. 1, n. 1/2, p. 1-9, 2001.
- SAITO, N. S.; MOREIRA, M. A.; SANTOS, A. R.; EUGENIO, F. C.; FIGUEIREDO, A. C. Geotecnologia e Ecologia da Paisagem no Monitoramento da Fragmentação Florestal. **Revista Floresta e Ambiente.** v. 23, n. 2, p. 201-210, 2016.
- SILVA, C C. O. A.; BARBOSA, J. B. M. Utilização da ferramenta sensoriamento remoto para diagnóstico de impactos ambientais. **Revista Tecnologia & Informação**, v. 1, p. 21-32, 2013.
- SILVA, F. B.; MARQUE, T. S.; DELGADO, C. Processos de expansão urbana e mudanças na paisagem: ensaio metodológico (1950-2000). **Revista da Faculdade de Letras Geografia Universidade do Porto**. III série, v. I, p. 161 183, 2012.
- SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.O.; COSTA, W.L. **Guidebook** Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. 2009. Disponível em: < https://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:start> Acesso em: 09 mar. 2020.
- STOIANOV I., CHAPRA S., MAKSIMOVIC C., A framework linking urban park land use with pond water quality, **Urban Water**, v. 2, n. 1, p.47-62, 2000.
- TURNER, M. G; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process. New York: Springer, 2001. 417 p.
- TYAGI, S.; DOBHAL, R.; PRASHANT, L. K. A.; UNIYAL, Singh D. P. Studies of River Water Quality Using River Bank Filtration in Uttarakhand, India. **Water Qual Expo Health**, v. 5, p. 139–140, 2013.
- URIARTE, M.; YACKULIC, C.B.; LIM, Y.; ARCE-NAZARIO, J. Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis. **Landscape Ecol.** v. 26, p.1151-116, 2011.
- WILSON, C.O.; WENG, Q. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois. **Sci. Total Env.** v. 409, p. 4387-4405, 2011.

2 GEOTECNOLOGIAS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS

Este capítulo sistematiza uma metodologia para a produção de provas periciais a partir da utilização das geotecnologias - tais como Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informações Geográficas, Sistema de Navegação Global por Satélite, Métricas da Paisagem, dentre outras - em perícias ambientais de identificação e quantificação de danos. A investigação ocorreu na Área de Proteção Ambiental da Vargem das Flores, onde está situado o reservatório denominado Várzea das Flores, que é um importante reservatório de abastecimento de água para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. Foram utilizados dados oficiais e informações espaciais obtidos gratuitamente em plataformas online, como o Geo Catálogo do Ministério do Meio Ambiente, o IDE Sisema, do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais, e o MapBiomas. O processamento e a análise dos dados se realizaram por meio dos softwares gratuitos QGIS 3.8, Google Earth e Dinamica EGO 4.2. Os resultados da metodologia proposta foram apresentados e discutidos de forma qualitativa e quantitativa no que se refere ao emprego das diferentes soluções de geotecnologia dentro do escopo do processo pericial. Essa metodologia se valeu de técnicas de inspeção visual para abordar os aspectos qualitativos da identificação de possíveis danos ou impactos ambientais, e de técnicas quantitativas de sensoriamento remoto que possibilitaram a mensuração de métricas para comprovação da infração ambiental, bem como a mensuração das transformações ocorridas na paisagem durante um período anterior e após a infração. Os danos ou impactos ambientais observados foram identificados de maneira simples, direta e persuasiva. Esses resultados não só ratificam o alto poder elucidativo das informações espaciais em perícias ambientais, demonstrando que as geotecnologias propiciam melhores condições para entender a problemática, como também auxiliam em importantes decisões no que concerne a esse tipo de perícia.

2.1 ESTUDOS EM REPRESAS DE ABASTECIMENTO E ÁREAS PROTEGIDAS

A crescente conscientização sobre a necessidade de repensar nossa relação com o planeta tem se refletido em mudanças de comportamento e na elaboração de ordenamentos jurídicos cada vez mais complexos, que visam reparar erros passados e prevenir futuros (LIMA, 2013). Nesse sentido, condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, às sanções administrativas, sem prejuízo das obrigações de reparar o dano e das cominações penais cabíveis.

Tendo identificado o dano ambiental e as condutas e/ou atividades lesivas ao meio ambiente, a legislação vigente prevê sanções administrativas e penais no que refere à questão cível (reparação do dano), para tanto, a tipificação da atividade e da conduta lesiva pela legislação exige que a comprovação de sua materialidade seja realizada pela perícia ambiental, que é o instrumento jurídico para identificar e mensurar os danos, os autores e embasar as medidas mitigadoras que vierem a ser determinadas aos infratores (BENEDET *et al.*, 2016).

A qualificação dos danos ambientais depende do seu perfeito enquadramento aos estritos termos da legislação ambiental vigente, assim como a comprovação de sua materialidade é indispensável para a responsabilização dos autores. A comprovação da materialidade dos danos, em alguns casos, pode ser uma atividade bastante complexa, posto que demanda análises rápidas, abrangentes, transparentes e precisas. Porém, em muitos casos, a perícia ambiental se restringe a coletar coordenadas dos pontos examinados e a produzir relatórios fotográficos. Como consequência, não são produzidos e anexados aos autos processuais materiais cartográficos complementares, que poderiam melhor caracterizar os impactos ambientais. Assim, quando não há provas periciais contundentes, o autor do dano pode ser absolvido.

Considerando-se as peculiaridades dos tipos de danos ambientais previstos pela legislação, a comprovação de sua materialidade, no que diz respeito à sua existência, requer utilização de técnicas específicas, dentre as quais se destacam as geotecnologias, tais como o Sensoriamento Remoto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), o Sistema de Navegação Global por Satélite (Global Navigation Satellite System - GNSS) e as Métricas da Paisagem, dentre outros recursos (BRILIS et al., 2000a; BRILIS et al., 2000b; CALDAS et al., 2009; ALVES; RUSSO, 2011; GASPARINI et al., 2013; LIMA, 2013; SILVA; BARBOSA, 2013; ARAGÃO; SANTOS, 2014; BOEIRA et al., 2015; NICOLETTI; FERREIRA, 2015; SILVA et al., 2015). O uso das geotecnologias aliado à utilização de produtos cartográficos existentes (ortofotos, imagens de satélites, cartas, mapas etc.) permite que se realizem levantamentos prévios de informações relativas à área a ser periciada, tornando os trabalhos de campo mais objetivos e eficientes (CALDAS et al., 2009).

Além disso, durante os trabalhos periciais, o perito pode se valer das geotecnologias com a finalidade de comprovar a materialidade do dano ou impacto ambiental e, como consequência, proporcionar a perfeita elucidação do caso, uma vez que apresentar a documentação espacial pode ser uma maneira simples, direta, persuasiva e contundente de identificar ou eliminar partes potencialmente responsáveis em ações de fiscalizações e perícias (BRILIS *et al.*, 2000a).

Contudo, o emprego prático de imagens oriundas do sensoriamento remoto para fins cartográficos requer a utilização de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), que podem ser entendidas como um conjunto de estratégias para a manipulação de imagens digitais, as quais facilitam a extração de informações e corrigem eventuais erros e distorções (IBGE, 2001). Cabe ressaltar, porém, que se deve evitar o manuseio dessas tecnologias sem o devido cuidado, pois imagens não tratadas adequadamente apresentam distorções que podem inviabilizar sua utilização cartográfica e/ou pericial (LIMA, 2013).

Nesse sentido, esta pesquisa demonstrou a viabilidade do emprego de geotecnologias para aprimoramento do processo de perícia ambiental. Para tanto, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Revelar as lacunas e as principais demandas por soluções de geotecnologia no apoio às atividades de perícia ambiental;
- Desenvolver um estudo de caso, aplicando diferentes soluções de geoprocessamento no apoio à perícia ambiental;
- Analisar, de forma qualitativa e quantitativa, os resultados do emprego das diferentes soluções de geotecnologia dentro do escopo do processo pericial;
- Elencar as vantagens, as desvantagens, as mudanças de paradigma e os desafios de sua utilização.

Visando ao melhor desempenho no desenvolvimento da pesquisa, tornou-se necessário eleger duas importantes estratégias: [1] selecionar uma área de estudo que contemplasse casos complexos reais de possíveis danos ou impactos ambientais, com ações e perícias judiciais em curso, para avaliações *in loco* do potencial e da viabilidade do emprego de geotecnologia; e [2] considerar a existência e a disponibilidade de dados geográficos, referentes à área de estudo, passíveis de serem empregados para o propósito da pesquisa.

2.2 ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DE VARGEM DAS FLORES

Com base nas estratégias supracitadas, a Área de Proteção Ambiental (APA) de Vargem das Flores foi selecionada como área de estudo. Esta corresponde a uma unidade de conservação de uso sustentável, com 12.268,00 ha, onde está situada a represa denominada Várzea das Flores, a qual configura um importante reservatório de abastecimento de água para os municípios de Betim, Contagem e Belo Horizonte, e faz parte da sub-bacia do Rio Paraopeba, afluente do Rio São Francisco. A APA Vargem das Flores, criada pela Lei Estadual nº 16.197/2006, está localizada nos municípios de Betim/MG e Contagem/MG, fazendo divisa com os municípios de Esmeraldas/MG e Ribeirão das Neves/MG. Pela sua beleza natural e proximidade com a capital do Estado e região metropolitana, tem sido utilizada pela população do entorno como área de lazer para pesca e banhos. No entanto, também tem sido utilizada para especulação imobiliária, pois algumas áreas estão sendo adquiridas no entorno para a construção de residências, o que provoca o aumento de parcelamento de áreas de antigas fazendas (FIGURA 2.1).

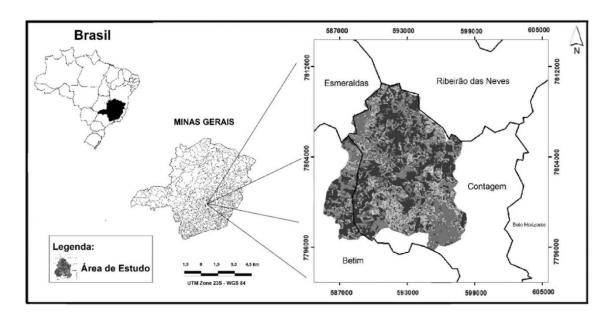


Figura 2.1 - Área de estudo. Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

No entorno do reservatório é notório observar o conflito de uso do solo, que vem se configurando não só pela supressão da cobertura vegetal mais densa como também pela introdução acelerada de edificações e de infraestrutura viária. Em junho de 2015, por causa da pressão antrópica na paisagem, a Subsecretaria de Controle e Fiscalização Ambiental Integrada da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) instaurou uma fiscalização na região de Vargem das Flores, ou seja, na área que compreende o reservatório de Várzea das Flores e o seu entorno. A operação denominada "OPERAÇÃO ESPECIAL DE FISCALIZAÇÃO AMBIENTAL VARGEM DAS FLORES" foi realizada com intuito de coibir ações predatórias ao meio ambiente e verificar a regularidade dos empreendimentos localizados nessa região. Com base nos resultados da fiscalização, o Estado de Minas Gerais propôs, em desfavor dos fiscalizados, uma Ação Civil Pública – ACP (5022233-64.2016.8.13.0079) que tramita na comarca de Contagem/MG. Atualmente, o processo encontra-se em andamento, e ainda não houve perícia para comprovar a materialidade dos danos ou impactos ambientais (e outras informações) relatadas na petição inicial.

O exame proposto utilizou geotecnologias para apoiarem a operacionalização do processo de fiscalização, mesmo ciente de que a metodologia e os produtos por ela gerados carecem de protocolos de uso para essa finalidade, como, por exemplo, a especificação dos dados, dos equipamentos e das ferramentas para perícia ambiental.

2.3 RECURSOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Assim como a seleção da área de estudo, a seleção dos recursos materiais foi de fundamental importância para a proposta metodológica desta pesquisa. Não apenas a existência e a disponibilidade dos dados foram levadas em consideração, mas também a adequação desses dados para o escopo da investigação proposta, tais como a demanda da resolução espacial e temporal das imagens disponíveis.

Os recursos materiais, computacionais e equipamentos utilizados durante a realização dos estudos foram um receptor GPS de navegação (Garmin 62S), uma trena digital *laser* (Bosch DLE 70 Professional), uma trena de fibra de vidro 50 m, *softwares* gratuitos QGIS 3.8 e Dinâmica EGO 4.2, um *tablet*, um computador pessoal e a base cartográfica digital da área de estudo, conforme descrito a seguir (QUADRO 2.1):

Quadro 2.1 - Informações gerais sobre a fonte de dados utilizada.

Abreviação	Nome	Informações gerais	Dados utilizados
IDE-Sisema	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	 Plataforma criada pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (Sisema); Permite o download gratuito nos formatos kml e shapefile; Abrangência: estado de Minas Gerais; Acesso: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/ 	 Limites municipais; Limites do reservatório; Perímetro da APA; Hidrografia e outros.
MapBiomas	Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil	 Processamento em nuvem; Classificadores automatizados desenvolvidos e operados na plataforma <i>Google Earth Engine</i>; Mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil; Rede colaborativa com especialistas de diversas áreas; Acesso: http://plataforma.mapbiomas.org/. 	Mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 1996 e 2016, com resolução de 30 m.
Geo Catálogo MMA	Catálogo de Imagens de Satélite Rapideye do Ministério do Meio Ambiente (MMA)	 Imagens utilizadas e disponibilizadas para apoiar o Programa de Regularização Ambiental; Acessíveis a todos os órgãos públicos federais, estaduais, municipais e universidades públicas; Resoluções: 5 m (espacial); 12 bits (radiométrica),5 faixas (espectral) e 24 horas off-nadir (temporal); Acesso: http://geocatalogo.mma.gov.br/. 	• Duas cenas identificadoras: 2329918 e 2329919 (2014-09 12_ RE3_3A_312511).
Fotografias Ortofoto Aéreas adquirida pela Ortorretifica Prefeitura de Contagem/MG		 Levantamento aerofotogramétrico realizado sob demanda; Voo realizado em 2017; Resolução Espacial: 0,10 m; Acesso: Disponibilizado em mídia física pela secretaria municipal de Planejamento (SEPLAN). 	Recorte da área da APA localizada em Contagem/MG.
Google Earth	Aplicativo de mapas mantido pelo <i>Google</i>	 Permite visualizar gratuitamente, de forma virtual, de qualquer lugar do planeta; Imagens orbitais e aéreas obtidas por diferentes sensores; Imagens disponíveis na composição colorida RGB comum; Acesso: Software Google Earth. 	Cinco imagens de diferentes datas.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

2.3.1 Plataforma IDE-Sisema

Sob responsabilidade do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais – Sisema/MG, a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema) é uma plataforma criada com o objetivo de promover a adequada organização dos processos de geração, armazenamento, acesso, compartilhamento, disseminação e uso dos dados geoespaciais oriundos das atividades, programas e projetos ambientais e de recursos hídricos desenvolvidos pelo Sisema (SISEMA, 2019).

A plataforma permite o *download* de seus dados de maneira gratuita e em dois formatos (kml e shapefile). Entre os diversos dados espaciais disponíveis pode-se destacar hidrografia, relevo, vegetação, sistema de transporte, mapa de solos, limites

municipais e área de restrições ambientais (ex: unidades de conservações) do Estado de Minas Gerais.

2.3.2 MapBiomas

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomas) utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil. É uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação. O propósito do projeto é contribuir para o entendimento da dinâmica do uso do solo no Brasil com a característica de ser um trabalho orientado para gerar uma plataforma aberta, multiplicável e com possibilidade de aplicação em outros países e contexto (MAPBIOMAS, 2019).

2.3.3 Imagem orbital Rapideye

O Ministério do Meio Ambiente utiliza e disponibiliza um conjunto de imagens orbitais, adquiridas pelos satélites RapidEye para apoiar a obtenção das informações geoespaciais temáticas relacionadas ao Programa de Regularização Ambiental. As imagens são acessíveis para todos os órgãos públicos Federais, Estaduais, Municipais e Universidades Públicas e estão dispostas no Catálogo de Imagens de Satélite Rapideye do Ministério do Meio Ambiente – Geo Catálogo MMA. Os satélites RapidEye não estão mais em operação, no entanto, optou-se pelo uso destas imagens pelo fato de serem imagens gratuitas e porque a área de estudo foi objeto de fiscalização na época que o sensor estava em operação. As especificações técnicas das imagens estão relacionadas no QUADRO 2.2:

Quadro 2.2 - Informações gerais sobre a fonte de dados utilizada.

Metadados RapidEye			
Instrumento/Sensor	REIS - RapidEye Earth Imaging System		
Operadora/Instituição Responsável	RapidEye AG		
País	Alemanha		
Situação Atual	Inativo		
Lançamento	29/08/2008		
Altitude	630 km		
Inclinação	97.8°		
Órbita	Heliossíncrona		
Faixa Imageada	77,25 Km		
Tempo de Duração da Órbita	96,7 min		
Horário da Passagem	11h		
Período de Revisita	1 dia		
Resolução Espacial	6,5 m (nadir) e 5 m para ortoimagens		
Resolução Radiométrica	12 bits		
	Azul (440 - 510 nm)		
	Verde (520 - 590 nm)		
Resolução Espectral	Vermelho (630 - 690 nm)		
-	Vermelho limítrofe - "Red-Edge" (690 - 730 nm)		
	Infravermelho próximo (760 - 880 nm)		
Data de aquisição	2014-09-12 10:58:36 -03:00		
Identificador:	2329918 2014-09-12_RE3_3A_312511 e		
Informações do produto (Projeção)	WGS 84 / UTM zone 23S		

Fonte: German Aerospace Center, 2008.

2.3.4 Fotografias Aéreas Ortorretificadas

Um levantamento aerofotogramétrico foi realizado sob a demanda do município de Contagem/MG a partir de levantamento executado em 2017 pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S/A e cedido pela Secretaria Municipal de Planejamento, Orçamento e Gestão - SEPLAN (responsabilidade técnica: Diretoria de Geoprocessamento).

As fotografias aéreas ortorretificadas utilizadas neste estudo tratam-se de ortofotos coloridas, com 03 faixas espectrais e elemento de resolução no terreno (*Ground Sample Distance – GSD*) de 0,10 metros em formato ECW (Enhanced Compression Wavelet), compatível com escala cartográfica 1:1.000.

2.3.5 Software Google Earth

É um aplicativo de mapas mantido pela empresa Google, que permite visualizar gratuitamente, de forma virtual e de qualquer lugar do planeta, as imagens orbitais e aéreas obtidas por diferentes sensores. Essas imagens são disponibilizadas na composição colorida RGB comum ou pancromática.

2.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo é uma sequência de análises exploratórias de diferentes soluções de geotecnologias aplicadas a perícias ambientais e teve como base o que foi proposto em investigações semelhantes por diversos autores (BRILIS *et al.*, 2000a; BRILIS *et al.*, 2000b; CALDAS *et al.*, 2009; ALVES; RUSSO, 2011; GASPARINI *et al.*, 2013; LIMA, 2013; SILVA; BARBOSA, 2013; ARAGÃO; SANTOS, 2014; BOEIRA *et al.*, 2015; NICOLETTI; FERREIRA, 2015; SILVA *et al.*, 2015), no intuito de encontrarmos formas de criar protocolos de emprego dessas técnicas e instrumentos. O esquema a seguir (FIGURA 2.2) ilustra o roteiro metodológico e as etapas da pesquisa:

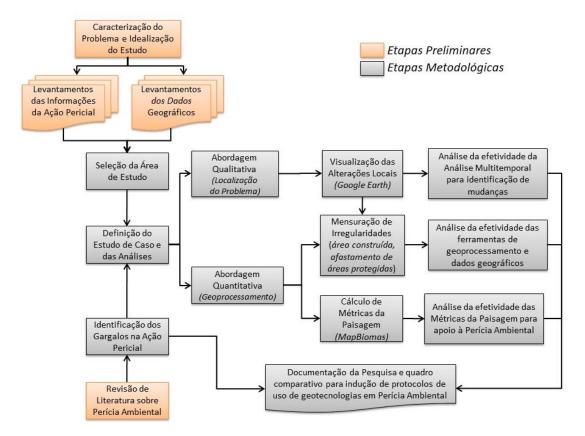


Figura 2.2 Metodologia proposta. **Fonte**: elaborada pelo autor desta dissertação.

Nas etapas preliminares, houve a caracterização do problema e idealização do estudo. Nesse momento, foi elaborada a revisão de literatura e o levantamento de dados e informações. Posteriormente, dando início às etapas metodológicas, foram identificados os gargalos da pesquisa e foi selecionada a área de estudo e os estudos de

caso. Em seguida, foi realizada uma sequência de análises exploratórias (qualitativas e quantitativas) de diferentes soluções de geotecnologias aplicadas a perícias ambiental e à documentação da pesquisa.

2.4.1 Identificação dos gargalos da ação pericial

Não é difícil encontrar perícias judiciais ambientais que se utilizaram das geotecnologias, porém, na maioria das vezes, os laudos periciais não documentam de forma adequada os dados e os métodos adotados, nem tampouco exploram as diversas possibilidades de emprego de *softwares*, imagens de satélites, e dados espaciais disponíveis para a finalidade. Outro problema recorrente se encontra no uso indiscriminado de geotecnologias e dados sem adoção de procedimentos metodológicos adequados para a extração de informações e sem conhecer seu real limite de utilização. Cabe aqui, como exemplo, a extração de informações geométricas (distâncias, áreas, perímetros e volumes) de objetos de análise pericial a partir de imagens orbitais e de aerolevantamentos cujas características não são adequadas à atividade fim, como o emprego da plataforma *Google Earth* ou dados oriundos de drones sem tratamento fotogramétrico.

Considerando esses problemas, a manipulação desses recursos demanda certos cuidados, tanto pelas suas limitações inerentes, quanto pela possibilidade de aplicação de tratamento inadequado aos dados, o que pode gerar distorções e comprometer a qualidade do produto cartográfico final. Em razão disso, torna-se imprescindível apresentar e discutir alguns protocolos de utilização das geotecnologias em perícia ambiental.

2.4.2 Seleção da área de estudo

A seleção da área de estudo traduz uma etapa vital para o objetivo proposto na pesquisa e sua importância se justifica pela natureza da investigação, a qual se propôs a avaliar a aplicabilidade de geotecnologias em prol da melhoria da eficiência, da qualidade e do alcance das ações de perícia ambiental. O entorno de um reservatório de abastecimento de água na periferia urbana de uma região metropolitana concentra uma ampla diversidade de problemas legais, frutos da pressão pelo crescimento urbano não planejado sobre áreas de proteção ambiental e estratégicas. Os exemplos analisados

revelam situações cotidianas para a perícia ambiental, em função das quais a avaliação do emprego de geotecnologias se faz necessária. A realidade legal e ambiental da área de estudo é similar à de outras áreas no entorno de reservatórios de abastecimento de água, o que permite a replicabilidade deste trabalho.

A escolha da área de estudo ocorreu com base nas seguintes premissas: (1) existência de base cartográfica de qualidade e confiável; (2) existência de possíveis danos ou impactos ambientais observáveis remotamente, para avaliar o uso de imagens orbitais e aéreas na caracterização e na qualificação de danos ambientais ou de intervenção antrópica em áreas protegidas; (3) representatividade no que se refere à complexidade da perícia; e (4) importância ambiental da área de estudo.

2.4.3 Definição dos estudos de caso

Os casos estudados tratam de intervenções antrópicas observáveis *in loco* ou de forma remota por imagens aéreas, sendo que as intervenções qualificam possíveis danos ao meio ambiente segundo a legislação ambiental vigente. A definição dos locais examinados se deu a partir das informações relativas à área de estudo (imagens de satélites, dados cartográficos, restrições impostas pela legislação ambiental, dentre outras), por meio das quais foram escolhidas intervenções representativas no que tange à complexidade pericial e o impacto dessas intervenções sobre essa área.

2.4.4 Abordagem qualitativa (análise visual)

A abordagem qualitativa da pesquisa se deu por meio de análise visual de imagens de satélite disponibilizadas no *software Google Earth Pro*. Foram considerados fatores como a disponibilidade de cenas cobrindo a região de interesse nas datas compatíveis com a necessidade da análise pericial; a qualidade visual do objeto/feição geográfica observado na cena; e a usabilidade dos dados.

A disponibilidade e a qualidade visual da sequência histórica de imagens do referido *software* permitem a análise multitemporal das imagens, processo que permite ao perito detectar remotamente a época em que ocorreu o dano ambiental observado. Essa estratégia, embora caracterize uma análise preliminar, deve ser isenta de métricas quantitativas. Todavia, esse ferramental capaz encontrar a data aproximada das mudanças indicativas de danos ambientais é de vital importância para o planejamento

das ações periciais *in loco* e remotas. Ele pode, por exemplo, parametrizar no espaço e no tempo a aquisição de imagens geometricamente aptas a fornecer medidas para quantificar a irregularidade causadora do dano.

2.4.5 Abordagem quantitativa (geoprocessamento)

A abordagem quantitativa recorre ao emprego de técnicas de geoprocessamento de forma a analisar e mensurar os possíveis danos ou impactos ambientais das áreas examinadas como estudo de caso. O processo utiliza fotografias aéreas e ferramentas de Processamento Digital de Imagens (PDI) para determinar e medir remotamente as irregularidades que caracterizam as intervenções ambientais. O geoprocessamento foi também empregado para a classificação da cobertura e uso da terra e na avaliação das métricas da paisagem.

2.4.5.1 Mensuração de irregularidades por Sensoriamento Remoto

A mensuração das irregularidades foi desenvolvida tomando como base uma ortofoto cedida pela Prefeitura de Contagem/MG, correspondente à escala 1:1.000 e processada a partir de um imagens aéreas tomadas em 2017. O processo utilizou como ferramenta o *software* QGIS 3.8, a partir da qual foram realizadas mensurações remotas de possíveis danos ambientais utilizando-se técnicas de PDI. As irregularidades que se caracterizavam como danos foram devidamente localizadas e mensuradas a partir da referida ortofoto, que possui resolução espacial de 10 cm e rigor cartográfico atestado por relatório de voo.

2.4.5.2 Análise das métricas da paisagem

Outra etapa do estudo consistiu em analisar quantitativamente as mudanças da paisagem no que diz em respeito à transição, ao aumento e à diminuição das áreas de cada classe, para as quais foram utilizadas imagens de cobertura e de uso do solo da plataforma MapBiomas. O processamento dos dados ocorreu por meio do *software* Dinamica EGO. O processo é caracterizado pela análise do padrão das classes de cobertura e uso do solo quanto à fragmentação, conurbação, área e parâmetros de

geometria dessas classes. O processo revela, através de índices, a situação de ocupação da superfície e, se repetido para outras datas, subsidia o entendimento da dinâmica das mudanças como padrão das transformações, tendências espaciais das transformações e velocidade com a qual estas ocorrem.

2.4.6 Documentação da pesquisa

A documentação da pesquisa ordena e sintetiza a comparação dos dados e dos métodos de emprego para criação do protocolo de geotecnologia em perícias ambientais, encampando os objetivos da presente investigação.

2.5 RESULTADOS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS

2.5.1 Levantamento das informações da ação pericial e dos dados geográficos

Escolhida a área de estudo, estabeleceu-se uma base de dados georreferenciados com informações indicativas de sua caracterização (imagens de satélites, ortofotos, dados cartográficos em geral, dados de uso e cobertura do solo, restrições impostas pela legislação ambiental, dentre outras), extraídas das plataformas IDE-Sisema, MapBiomas, Geo Catálogo MMA, Google Earth e de dados oficiais cedidos pela prefeitura do Município Contagem/MG. De posse dessas informações, foi efetuada uma análise preliminar da área para identificação de potenciais irregularidades e seleção dos casos a serem analisados.

O passo seguinte foi escolher os pontos que foram revisitados. Conforme mencionado anteriormente, a área de estudo escolhida foi objeto de fiscalização ("OPERAÇÃO ESPECIAL DE FISCALIZAÇÃO AMBIENTAL VARGEM DAS FLORES"). No total, foram fiscalizados 29 empreendimentos e propriedades, sendo lavrados 29 autos de fiscalização, 45 autos de infração, e coletadas as coordenadas geográficas, com receptores GNSS de navegação de todos os pontos fiscalizados. Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizadas as informações de localização e de irregularidade apontadas nos autos de fiscalização e de infração visando, com base no processo judicial, à escolha dos casos a serem estudados.

No QUADRO 2.3 são apresentadas as possíveis irregularidades dos estudos de caso escolhidos, bem como o seu detalhamento. Cabe mencionar, no entanto, que

optamos pela supressão das coordenadas geográficas dos pontos, de modo a preservarmos a localização dos empreendimentos fiscalizados.

Quadro 2.3 - Irregularidades apontadas para os estudos de caso escolhidos.

Estudo de Caso	Irregularidade Constatada	Detalhamento
01	Parcelamento de solo em área rural	Supressão de vegetação.
02		Em curso d'água natural.
03	Intervenção em área de preservação permanente (APP)	Em reservatório artificial (destinado ao abastecimento público).
04	permanence (1111)	Em reservatório artificial (destinado ao abastecimento público).

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Cabe aqui ressaltarmos que, independente da fiscalização, os casos abordados neste estudo tratam-se de fatos reais. As informações referentes ao imóvel, passíveis de identificação do mesmo ou do proprietário, não fizeram parte do presente estudo, que tem como intuito exemplificar o uso da metodologia. Também, é importante frisarmos que não foram realizadas análises de eventuais licenças ambientais ou do histórico de ocupação dessas áreas, o que poderia legitimar as situações encontradas perante a legislação vigente. Inclusive, cumpre observar que, em alguns casos, seria necessária a elaboração de Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório Artificial (PACUERA) para a utilização adequada e efetiva da área em questão.

Após a escolha dos estudos de caso, foram levantadas, pontualmente, informações relativas às áreas, no intuito de tornar os trabalhos de campo mais objetivos e eficientes. Por meio do o *software* QGIS 3.8, os dados foram preparados e as informações extraídas. Os produtos cartográficos deram suporte à vistoria *in loco* (diligência pericial), com o auxílio de receptores GPS, trena digital, câmera fotográfica e *tablet*, para registro dos dados e anotações.

2.5.2 Análise qualitativa e quantitativa do emprego de geotecnologia em perícia ambiental

É importante mencionar que, para esta pesquisa, três diferentes análises foram realizadas em sequência: [1] análise qualitativa preliminar e multitemporal, resultante da inspeção visual remota; [2] análise quantitativa, resultante da mensuração de irregularidades; e [3] análise quantitativa, resultante de métricas da paisagem. Os resultados obtidos em cada exemplo de utilização das geotecnologias em perícias encontram-se apresentados e discutidos a seguir, a começar pela análise de sequência histórica de imagens do *Google Earth*, passando pelas imagens orbitais *Rapideye*, pela ortofoto e concluindo com a análise quantitativa de perda e ganho de área dos mapas classificados da plataforma Mapbiomas.

2.5.2.1 Análise multitemporal

Na avaliação da qualidade e da usabilidade das imagens do Google Earth foi utilizada uma sequência histórica de imagens, a partir das quais foi analisada a disponibilidade e a qualidade visual das mesmas. A análise empírica observou que, para área de estudo, a plataforma do Google Earth disponibilizou cerca de 100 imagens referentes ao período de 2012 a 2019.

Como se observa na FIGURA 2.3, as imagens da plataforma Google Earth permitiram identificar a ocorrência de um parcelamento de solo - com supressão de vegetação -, cuja data provável de início foi o ano de 2011. A sequência cronológica de imagens permitiu inferir que o maior acréscimo de área desmatada ocorreu entre os anos de 2014 e 2015. Percebe-se, ainda, que a sequência histórica de imagens nos permite acompanhar a evolução do impacto ambiental nos diferentes anos, comprovando que o desmatamento está aumentado com o passar do tempo. Essa análise visual, embora qualitativa, reforça a compreensão espaço-temporal do fenômeno causa ou consequência do impacto ambiental a ser investigado.

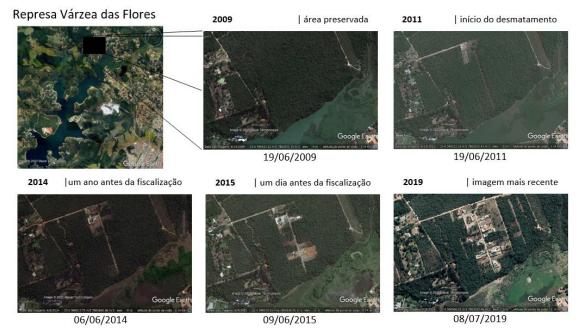


Figura 2.3 - Sequência histórica de imagens de área fiscalizada (loteamento em área rural). **Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

Observou-se que, embora as imagens apresentassem diferenças no padrão de cor, brilho e contraste, fruto de aquisições em épocas distintas, sob condições atmosféricas e de luminosidade distintas e por sensores igualmente distintos, a qualidade visual no geral foi satisfatória para a identificação visual de ocorrência do possível dano ou impacto ambiental. Isso significa que, como estão disponíveis diversas imagens de boa qualidade visual, existe uma maior probabilidade de se encontrar imagens próximas à data de ocorrência do evento em exame. É importante ressaltar, contudo, que essas imagens trazem consigo distorções que inviabilizam sua utilização para fins cartográficos.

2.5.2.2 Mensuração de irregularidades

O processo de mensuração das irregularidades foi aplicado pontualmente para as feições, objetos ou fenômenos elencados no terreno como irregulares ou sujeitos à irregularidade ambiental. O processo emprega dados e técnicas específicas de sensoriamento remoto que normalmente exigem considerável memória e capacidade computacional. Neste estudo foram avaliadas duas fontes que traduzem na prática duas

alternativas comuns e relativamente acessíveis para trabalhos em perícia ambiental: imagens orbitais multiespectrais e fotografias aéreas ortorretificadas.

2.5.2.1.1 Imagens Orbitais Multispectrais

Foram utilizadas imagens do *Rapideye*, que é um sistema alemão que opera 5 satélites lançados conjuntamente, que geram imagens multispectrais coloridas com resolução espacial de 5 metros. Na avaliação de sua qualidade e usabilidade à perícia ambiental, foi utilizado um mosaico com duas cenas. As imagens possuem cinco faixas espectrais: azul, verde, vermelho, vermelho limítrofe (*red-edge*) e infravermelho próximo, o que permitiu diferentes composições coloridas. Optou-se pelo uso dessas imagens pelo fato de serem imagens gratuitas e porque a área de estudo foi objeto de fiscalização em 2015, época na qual o satélite ainda estava em operação.

Observando as informações dispostas nos metadados da imagem e analisando a aderência geométrica da imagem à base cartográfica, percebeu-se que as imagems Rapideye são compatíveis a escala cartográfica 1:50.000. Em síntese, mesmo a imagem sendo de média resolução espacial, sua escala de utilização recomendada não é adequada para mensurar pequenas áreas e/ou objetos. Esse cuidado foi necessário posto que nesta etapa da análise o objetivo é a realização de medidas que possam ser usadas como elementos de prova da perícia ambiental. Cabe ressaltar que a área de estudo possui grande variedade de feições e que os principais danos ambientais observados se referem a intervenções construtivas de pequeno porte. Logo, a identificação imprecisa das medidas compromete substancialmente o exame remoto, e esse foi um fator decisivo para descaracterizar o emprego de imagens de média resolução como a *Rapideye* para a medição da área desmatada apontada na etapa de identificação e análise qualitativa. Contudo, essas imagens são indicadas para mensurar grandes áreas. Caso sejam utilizadas imagens orbitais de outros sensores, pode-se chegar às mesmas conclusões, com as mesmas características.

2.5.2.2 Fotografias Aéreas Ortorretificadas

Nesta etapa foram empregadas ortofotos digitais cedidas pela prefeitura municipal de Contagem/MG. Para a avaliação da qualidade e da usabilidade dessas ortofotos, a pesquisa se valeu de um recorte de parte da APA de Vargem das Flores. As

ortofotos foram carregadas na plataforma QGIS e sobrepostas às demais camadas de informação do banco de dados, o que permitiu analisar três casos de intervenção indevida em Áreas de Preservação Permanente (APP) de proteção e de conservação dos recursos hídricos e dos ecossistemas aquáticos, um de curso d'água natural e dois de reservatório artificial destinado ao abastecimento público.

Como pode ser visto na FIGURA 2.4, as edificações examinadas estão parcialmente ou totalmente inseridas na faixa marginal de 30 metros de afastamento do curso d'água ou da linha de cota máxima da represa, área considerada como APP. A referida representação é suficiente para comprovar eventuais danos ou impactos ambientais pois, conforme informações técnicas do aerolevantamento e da ortofoto, a imagem apresenta elemento de resolução espacial de 10 cm no terreno e alto rigor cartográfico atestado *a priori* que garante a qualidade posicional da análise.

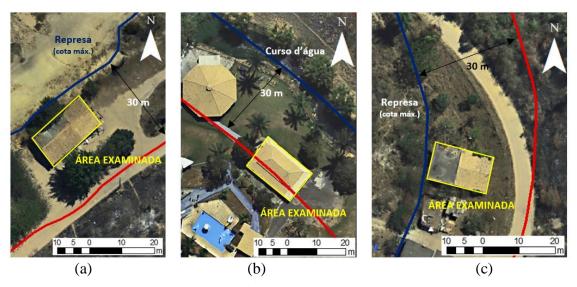


Figura 2.4 - Áreas examinadas com ortofoto. **Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

2.5.2.3 Análise das Métricas da Paisagem

A análise de métricas da paisagem não é realizada de forma pontual, ou seja, não tem como alvo um objeto/feição supostamente irregular, mas sim aplicada à região para retratar de forma quantitativa o padrão da distribuição das diversas tipologias de cobertura e uso do solo na área. Na avaliação de sua usabilidade foram utilizados mapas temáticos produzidos pelo Projeto MapBiomas. Os mapas, em formato matricial,

corresponderam a dois anos diferentes, o que possibilitou não somente o cálculo e a análise das métricas por ano, mas também a quantificação das mudanças da paisagem. Para o estudo, foi adotado um período de 20 anos, sendo que os mapas temáticos utilizados foram produzidos a partir de imagens datadas de 1996 a 2016.

Nesse processo foram calculadas as transições de tipologias de cobertura e uso do solo no período estudado e o aumento e diminuição das áreas de cada classe. Todo o cálculo, incluindo a construção da matriz de transição, foi realizado no *software* Dinamica EGO (SOARES *et al.*, 2009), que, assim como os demais sistemas utilizados nesta pesquisa, é também uma ferramenta gratuita. Ao avaliar o produto, observa-se que, ao longo dos 20 anos analisados, de 1996 (10 anos antes da criação da APA) a 2016 (10 anos depois da criação da APA), a paisagem da APA de Vargem das Flores encontra-se significativamente alterada. A FIGURA 2.5 ilustra lado a lado os mapas de cobertura do solo para as duas datas.

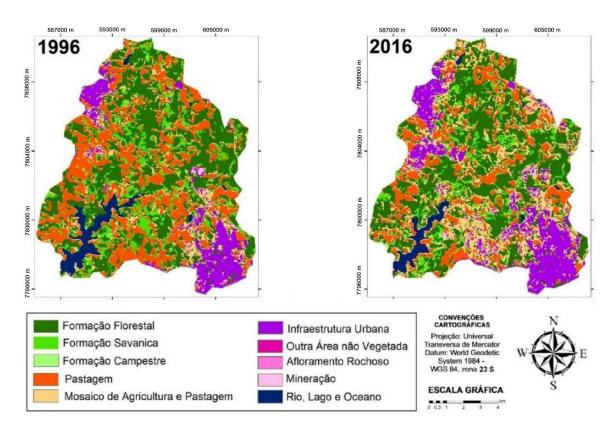


Figura 2.5 - Uso e cobertura do solo para a área de estudo em 1996 e 2016.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Observa-se que a classe "Formação Florestal" predomina e que sua área permanece estável. No entanto, conforme se verifica na TABELA. 2.1 e TABELA 2.2, houve forte transição dessa classe nos dois anos analisados, indicando que cerca de

1.000 ha (25%) da classe "Formação Florestal" foram realocadas (mudaram de lugar), ou seja, não houve preservação e sim desmatamento de algumas áreas e regeneração de floresta em outras.

Tabela 2.1 - Área das classes em hectare e percentual para os anos 1996 e 2016.

Classe/Ano	199	1996		2016		Transição da Classe (ha)		Transição Líquida (ha)	
Classe/Ano	Área (ha)	Em %	Área (ha)	Em %	Perda	Ganho	Perda	Ganho	
Formação Florestal	4.336,11	35,34%	4.281,59	34,90%	1096,15	1041,63	-54,51	•	
Formação Savânica	1.417,19	11,55%	945,45	7,71%	985,16	513,42	-471,74		
Formação Campestre	32,06	0,26%	34,78	0,28%	26,36	29,09		2,72	
Pastagem	3.454,11	28,15%	2.092,02	17,05%	1.836,97	474,89	-1.362,08		
Mosaico de Agricultura e Pastagem	1.376,62	11,22%	2.811,93	22,92%	687,16	2122,47		1.435,31	
Infraestrutura Urbana	1.086,03	8,85%	1.751,84	14,28%	105,97	771,78		665,82	
Afloramento Rochoso	33,93	0,28%	2,81	0,02%	33,85	2,72	-31,13		
Mineração	15,65	0,13%	12,76	0,10%	10,63	7,74	-2,89		
Rio, Lago e Oceano	517,07	4,21%	335,59	2,74%	190,84	9,35	-181,49		
TOTAL	12.268,77	100,00%	12.268,77	100,00%	4973,09	4973,09	-2.103,84	2.103,84	

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Tabela 2.2 - Matriz de transição (*software* Dinamica EGO). Perda e ganho de área entre classes em hectares (ha).

					PERDA(na) —				
	Formação Florestal	Formação Savânica	Formação Campestre	Pastagem	Mosaico Agri. e Past.	Infraestrut. Urbana	Afloram. Rochoso	Mineração	Rio, Lago e Oceano	SOMA (Perda)
Formação Florestal	-	248,33	3,23	164,99	547,35	129,61	-	0,60	2,04	1096,15
Formação Savânica	406,94	-	6,46	138,45	372,41	55,11	-	1,79	4,00	985,16
Formação Campestre	0,26	4,76	-	1,87	14,80	2,47	-	2,21	-	26,36
Pastagem	349,28	151,89	7,91	-	999,87	327,42	-	0,26	0,34	1836,97
Mosaico Agri. e Past.	231,92	82,07	4,59	124,93	-	241,87	-	0,51	1,28	687,16
Infraestrut. Urbana	5,95	3,06	5,95	11,23	77,31	-	-	2,38	0,09	105,97
Afloram. Rochoso	10,80	-	-	3,32	11,82	7,91	-	-	-	33,85
Mineração	-	-	0,94	-	6,04	2,04	-	-	1,62	10,63
Rio, Lago e Oceano	36,48	23,30	-	30,11	92,87	5,36	2,72	-	-	190,84
SOMA (Ganho)	1041,63	513,42	29,09	474,89	2122,47	771,78	2,72	7,74	9,35	

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

A manutenção da taxa de área florestal ao longo do período como uma métrica de conservação pode não ser sensível ao entendimento do fenômeno. Uma simples analogia entre as áreas totais de cobertura florestal para as duas datas revelaria que a área florestal no entorno da APA está sendo preservada, o que de fato não reflete o ocorrido. O exemplo aqui tomado, considerando a área de cobertura florestal no entorno do reservatório de abastecimento de água, é discutido na pesquisa de Scanavaca Jr,

(2011). De acordo com seu estudo, as florestas são importantes devido a vários fatores, sobretudo, em relação aos recursos hídricos, pois interceptam a água das chuvas, reduzindo o risco de erosão; aumentam a capacidade de infiltração da água no solo, tornando-o mais poroso; e contribuem para a estabilidade do sistema ou microssistema.

Em uma análise quantitativa de perda e ganho de área (TAB 1.2), as classes "Mosaico de Agriculta e Pastagem" e "Infraestrutura Urbana" foram as que tiveram maior ganho. As que mais perderam área para "Infraestrutura Urbana" foram "Pastagem" e "Mosaico Agricultura e Pastagem". Em síntese, as áreas mais antropizadas deram lugar à expansão urbana e as classes "Formação Florestal", "Formação Savânica" e "Pastagem" deram lugar à classe "Mosaico Agricultura e Pastagem", indicando um processo intenso de antropização devido a essa expansão.

De forma análoga, a análise das transições revelou que as classes "Formação Savânica" e "Pastagem" tiveram maior perda no período. Houve uma forte transição da "Formação Savânica" para "Mosaico de Agricultura e Pastagem" e de "Pastagem" para "Mosaico de Agricultura e Pastagem".

Considerando que a atual urbanização mundial se caracteriza pelo rápido e desordenado crescimento dos grandes centros, em que as consequências são inúmeros problemas de ordem ambiental e socioespacial (MARCHIORI, 2018), após a análise quantitativa do espaço geográfico em estudo, foi possível observar que a área em exame, hoje bastante modificada, talvez não suporte o mesmo ritmo de degradação observado entre os anos 1996 e 2016. Essa constatação seguramente permite afirmar que a APA de Vargem das Flores necessita de cuidados emergenciais quanto à preservação ambiental.

Embora complexa, se comparada às análises anteriores (qualitativa por inspeção visual e quantitativa por mensuração de distância, área e volume), a análise de métricas da paisagem fornece ao processo judicial base para a caraterização do ambiente em que o objeto da ação judicial está inserido. O entendimento espaço-temporal do fenômeno e das possíveis causa e efeito pode fornecer ao Juízo argumentos para a tomada de decisão mais assertiva.

2.6 DISCUSSÕES EM PERÍCIAS AMBIENTAIS

Com relação à área escolhida para o estudo, a fiscalização ambiental de 2015 foi motivada por recorrentes conflitos de uso e ocupação do solo. Nesse contexto, torna-se

relevante advertir sobre a importância do reservatório de água como estratégia para o abastecimento da região. Assim, em virtude do rompimento da barragem de rejeitos de mineração da empresa Vale, em 2019, no município de Brumadinho/MG, e que afetou diretamente os pontos de captação de água do Rio Paraopeba (contaminação do curso d'água por rejeitos de minério), o reservatório de Várzea das Flores e apenas outros dois - Serra Azul e Rio Manso - passaram a ser as únicas fontes de água para o abastecimento de grande parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Com isso, o nível dos três reservatórios começou a declinar e, em uma medida emergencial, para resguardar o abastecimento da população, um novo sistema de captação está sendo construído acima do ponto em que a captação existente teve de ser interrompida. É importante ressaltar que as chuvas dos meses iniciais de 2020 superaram a média histórica, sendo que, atualmente, os reservatórios operam próximos dos seus limites máximos.

Quanto ao uso de imagens do Google Earth, cumpre observar que, apesar de a qualidade visual das imagens ser satisfatória, extrair informações geográficas (coordenadas de pontos) e/ou geométricas (distâncias, áreas e perímetros), é temerário e pode comprometer ou colocar em dúvida as conclusões alcançadas. Essas imagens possuem excelente potencial elucidativo em ações de fiscalizações e perícias, se usadas de forma adequada. Ou seja, nos moldes em que foram utilizadas - sem a extração de informações geográficas e geométricas -, mostraram-se de grande valia na identificação aproximada da época em que ocorreu determinado dano ambiental. A aplicação dessa metodologia se restringe à disponibilidade de imagens da área examinada, cumprindo salientar que, em algumas regiões, não há disponibilidade de muitas imagens.

No que se refere às imagens *Rapideye*, ou outras imagens orbitais com as mesmas características, essas são de excelente qualidade para mapeamento de áreas rurais de grande extensão e, por se tratarem de imagens ortorretificadas, sua utilização cartográfica e pericial pode ser altamente viável, pois eventuais distorções geométricas foram corrigidas, o que as torna eficientes e precisas na delimitação do reservatório, do desmatamento e dos incêndios florestais de grandes proporções em áreas extensas, com limites bem definidos. Entretanto, em relação aos itens analisados neste estudo, sua aplicação não se justifica, já que a resolução espacial de 5 m não é suficiente para individualizar edificações de pequeno porte.

Quanto à ortofoto, os resultados dos testes demonstram que seu uso pericial é altamente satisfatório e confiável, uma vez que não foram observadas diferenças

significativas entre as medições *in loco* e as realizadas remotamente, motivo pelo qual é possível ressaltar seu alto poder para extração de informações. Porém, um ponto negativo a ser mencionado é a escassez desse tipo de dado para a grande maioria das cidades devido ao elevado custo de recobrimento aerofotogramétrico, o que dificulta sua atualização periódica (LOCH, 1988).

No que concerne ao uso dos mapas de cobertura e uso do solo do MapBiomas, aliados ao cálculo da matriz de transição do *software* Dinamica EGO, ponderamos que estudos como estes permitem entender com maior clareza as nuances da paisagem examinada. Os resultados, somados a outras informações periciais, certamente permitiriam aos órgãos fiscalizadores (ou ao Poder Judiciário) tomar medidas mais enérgicas e imediatas em favor da preservação do meio ambiente, como decisões liminares. Nesse último caso, a mesma técnica poderia ser usada como ferramenta de gestão, por exemplo, na análise de concessão e de renovação de licenciamento ambiental.

A decisão sobre qual produto é mais adequado para a apuração remota dos danos ambientais envolve diversos fatores, tais como o tipo de dano a ser observado, a resolução espacial, a qualidade posicional (NERO *et al.*, 2017), a disponibilidade de imagens para o local e época desejados e os custos. Quanto aos custos, vale lembrar que o Código de Processo Civil (CPC) - Lei nº 13.105/2015, no parágrafo 3º do artigo 473, prevê que, no desempenho de sua função, o perito judicial e os assistentes técnicos podem se valer de todos os meios necessários, inclusive solicitarem documentos que estejam em poder da parte, de terceiros ou em repartições públicas. Ou seja, no que tange aos casos examinados neste estudo, o perito não teria nenhum custo adicional para acessar dados ou *softwares*, isto é, esta pesquisa é perfeitamente replicável quanto a dados, *softwares* e procedimentos.

Outro ponto importante é que o art. 472 do novo Código de Processo Civil – CPC (Lei nº 13.105, de 16 de março de 2015) prevê que o Juízo poder dispensar a prova pericial quando as partes, na etapa inicial e na etapa de contestações, apresentarem pareceres técnicos ou documentos elucidativos sobre as questões que, de fato, podem ser consideradas suficientes. Desta forma, o emprego de geotecnologias nas fiscalizações ambientais pode prover material de qualidade (claro e seguro) que permita dispensar a perícia judicial e o deslinde da ação, fazendo com que o processo eventualmente ocorra com maior agilidade, além de, principalmente, trazer segurança jurídica.

2.7 CONCLUSÕES EM PERÍCIAS AMBIENTAIS

A partir dos estudos realizados e dos resultados encontrados, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- 1) Os indícios de danos ou impactos ambientais observados foram identificados de maneira simples, direta e persuasiva, demonstrando a viabilidade do emprego de geotecnologias no aprimoramento do processo de perícia ambiental.
- 2) O presente trabalho revelou as lacunas e as principais demandas por soluções de geotecnologia no apoio às atividades de perícia ambiental, contornando, de forma alternativa, os altos custos com o uso imagens privadas e *softwares* licenciados.
- 3) Foi desenvolvido um estudo de caso aplicando diferentes soluções de geoprocessamento, sendo analisados e apresentados resultados qualitativos e quantitativos do uso de soluções de geotecnologia no escopo da perícia ambiental. A metodologia procurou reproduzir de forma analítica as soluções adotadas pela perícia ambiental e que ainda não estão apoiadas em protocolos seguros destinados à fiscalização ambiental.
- 4) Esta pesquisa demonstra os prós e contras das soluções de geotecnologia no escopo da perícia ambiental, detalhando alguns procedimentos, bem como esclarece sua importância e eventuais limites de utilização. Os resultados pavimentam caminhos rumo à criação e protocolos e recomendações de uso de dados geográficos e métodos de análise para aprimoramento das ações de perícia ambiental.
- 5) Quanto às mudanças de paradigma e desafios, cumpre destacar que essa metodologia que se valeu apenas de imagens, dados e *softwares* disponíveis gratuitamente supriu com eficiência as demandas periciais de identificação remota de danos ou impactos ambientais.

2.8 REFERÊNCIAS

- ALVES, R. A. L.; RUSSO, D. Análise multitemporal de imagens LANDSAT 5 no apoio a confecção de laudo pericial da Polícia Federal sobre desmatamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 30 abril a 5 de maio de 2011. **Anais... INPE**, p. 2959-2966, 2011.
- ARAGÃO, F. M.; SANTOS, F. A. S. Sensoriamento remoto na perícia ambiental do Ministério Público do Estado do Piauí: estudo de caso. **Engineering Sciences**, Aquidabã-SE, v. 2, n.1, p.17-28, 2014.
- BENEDET, J. S.; JATAHY, D. C.; LOCH, C. Perícia Ambiental e Cadastro Técnico Multifinalitário. In: **Anais Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC)**, Florianópolis-SC, Brasil, 16 a 20 de outubro de 2016.
- BOEIRA, A. S.; BERNINI, H.; CARNEIRO, A. S.; SILVA, D. T. Uso de geoprocessamento como ferramenta para perícia ambiental de uma área atingida pelo reservatório da Usina Santo Antônio Rio Madeira. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.
- BRILIS, G.M., GERLACH, C.L., v. WAASBERGEN, R.J. Remote sensing tools assist in environmental forensics: Part I. Digital tools traditional methods. **Environmental Forensics** v. 1, p. 63-67, 2000a.
- BRILIS, G.M., VANWAASBERGEN, R.J., STOKELY, P.M., GERLACH, C.L. Remote sensing tools assist in environmental forensics: Part II. Digital tools. **Environmental Forensics**, v. 1, p. 1-7, 2000b
- CALDAS, A. J. F. S.; ROTTA, G. V.; GÓES, E. K.; SCHAMNE, J.A. Sensoriamento remoto na perícia ambiental da polícia federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, 25-30 abril 2009. **Anais... INPE**, p. 3621-3628, 2009.
- GASPARINI, K. A. C.; LYRA, G. B.; FRANCELINO, M. R.; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA JUNIOR, J. F.; FACCO, A. G. Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aplicadas na Identificação de Conflitos do Uso da Terra em Seropédica-RJ. **Revista Floresta e Ambiente FLORAM**, v. 20. n. 3, p. 296-306, 2013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. Manuais Técnicos em Geociências, 2001.
- LIMA, C. A. F. Correções Geométricas para a Utilização de Imagens em Perícias Criminais Ambientais. 2013. 152f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Perícias Criminais Ambientais, Florianópolis, 2013.

- LOCH, C. Monitoramento global integrado de propriedades rurais a nível municipal, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. 1988. 142 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.
- MARCHIORI, L. M.; SARTORI, A. A. C.; OLMEDO, J. P.; GUERREIRO, S. F.. Dinâmica espaço-temporal da expansão urbana de Bauru/SP. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v.9, n.3, p.354-364, 2018.
- NERO, M., CINTRA, J., FERREIRA, G., PEREIRA, T. e FARIA, T. A computational tool to evaluate the sample size in map positional accuracy. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.23, n.3, pp.445–460, 2017
- NICOLETTI, E. A. M.; FERREIRA, R. L. Geotecnologias Aplicadas à Perícia Ambiental. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade**, Curitiba, v.6, n.4, p. 37-58, 2015.
- SCANAVACA JUNIOR, L. A importância da floresta para o meio ambiente. **Embrapa Meio Ambiente, Natureza e Arte**, Brumadinho, v. 5, n. 29, p. 2, 2011.
- SILVA, R. M.; INOCENCIO, L. C.; REIS, B. S.; SOARES, G.; KIRSTEN, E. Fotos digitais obtidas com o uso de VANT para o mapeamento de áreas verdes do Campus da Unisinos em São Leopoldo: análise da exatidão posicional, utilizando o Software GEOPEC. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015.
- SILVA, C C. O. A.; BARBOSA, J. B. M. Utilização da ferramenta sensoriamento remoto para diagnóstico de impactos ambientais. **Revista Tecnologia & Informação**, v. 1, p. 21-32, 2013.
- SOARES FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinamica EGO**. Guia prático do Dinâmica EGO. Belo Horizonte: CSR-UFMG, 2009. 116 p.

3 GEOTECNOLOGIAS E QUALIDADE DA ÁGUA

Considerando a importância do gerenciamento do uso e ocupação do solo na qualidade da água, este capítulo busca demonstrar como as geotecnologias podem contribuir na análise dos impactos das alterações no uso e ocupação do solo na qualidade da água em reservatórios de abastecimento público de Região Metropolitana. O estudo ocorreu nos três reservatórios que compõem o sistema Paraopeba (Vargem das Flores, Serra Azul e Rio Manso). Este é responsável por parte do abastecimento da população da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG. Foram utilizados dados oficiais e informações espaciais obtidos gratuitamente em plataformas online, como o IDE Sisema, do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais, o MapBiomas, o Projeto Águas de Minas, do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, e o SNIS – Série Histórica, do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional. O processamento e a análise dos dados foram realizados nos softwares gratuitos QGIS 3.8 e Fragstats 4.2. Os resultados da metodologia proposta foram apresentados e discutidos no que se refere ao emprego da análise dos impactos das alterações no uso e ocupação do solo na qualidade da água em reservatórios de abastecimento público de região metropolitana. Essa metodologia se valeu apenas de ferramentas gratuitas e dados públicos de órgãos oficiais, sendo que essa medida contribui para a replicabilidade do trabalho. Os mapas classificados da Plataforma MapBiomas são satisfatórios no que diz respeito à qualidade temática (índice Kappa), demonstrando a viabilidade de sua utilização em análises ambientais. Foi produzido um diagnóstico dos impactos das alterações da cobertura e uso do solo na qualidade da água. Esses resultados, somados a outras informações, certamente permitiriam aos órgãos públicos (executivo e o ministério público) tomar decisões mais assertivas no que diz em respeito à gestão e fiscalização dos recursos hídricos.

3.1 ESTUDOS EM RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO

A qualidade das águas superficiais pode ser alterada por diversos fatores, podendo se destacar a explosão demográfica e os conflitos relacionados ao uso do solo, uma vez que causam o maior comprometimento dos recursos naturais. Portanto, torna-

se necessária gestão integrada destes, com foco em recursos hídricos, solo, cobertura vegetal e biodiversidade.

As bacias hidrográficas localizadas em regiões metropolitanas são geralmente são dotadas de reservatórios representam uma importante fonte de água para as regiões onde estão inseridos, podendo ser utilizados para abastecimento público, irrigação, geração de energia, regulação de vazão em períodos de chuva, dessedentação animal, pesca, navegação, lazer, dentre outros (GOMES, 2008). Essas bacias e seus corpos receptores estão submetidos a pressões antrópicas variadas como mudanças climáticas e alterações de uso do solo que agravam os impactos sobre os recursos naturais.

A diminuição do volume de água dos reservatórios, somada aos efeitos da antropização acelerada das bacias hidrográficas, pode resultar em perda da qualidade da água, com consequências para a população local e aumento dos gastos de tratamento para abastecimento público (GOMES, 2008). A deterioração da qualidade dos recursos hídricos de um reservatório pode levar à eutrofização, acarretando florações de algas, diminuição do oxigênio na água, mortandade de peixes, mau cheiro e crescimento acelerado de macrófitas aquáticas (VON SPERLING *et al.*, 2008).

O uso e a ocupação do solo da bacia de contribuição do reservatório também influenciam diretamente na qualidade da água, uma vez que, em períodos de precipitação, os solos mais vulneráveis às erosões, representam um maior carreamento de partículas e impurezas para os corpos hídricos. A lixiviação de nutrientes e poluentes podem contaminar os rios e os lençóis freáticos. Além disso, a impermeabilização excessiva, aumenta a velocidade de escoamento e dificulta a recarga dos aquíferos. Outras atividades antrópicas, como a exploração de minério, podem ocasionar a contaminação dos corpos hídricos com metais pesados. Por fim, o lançamento, sem tratamento, de efluentes domésticos e industriais pode causar enfermidades e o aumento de matéria orgânica na água, podendo resultar em degradação da qualidade da água até alcançar o nível de eutrofização.

Muitos estudos têm mostrado a relação entre diferentes usos do solo e influências na qualidade da água. Fisher *et al.* (2000) descobriram que o uso do solo teve impactos na qualidade das águas superficiais em Xangai, na China. Também na China, Feng *et al.* (2004) caracterizaram a rápida urbanização e a recente recuperação de áreas úmidas costeiras como principais contribuintes para a contaminação por metais pesados do rio Yangtze. Um estudo nos Estados Unidos descobriu que a água das bacias

agrícolas continha concentrações de nitrato e fosfato aproximadamente nove vezes maiores que as das bacias florestais (BINKLEY *et al.*, 1999).

Sendo assim, a relação entre uso do solo e a qualidade da água é bastante complexa, estando intimamente relacionada a variações espaciais e temporais (YE *et al.*, 2014).

A área estudo desta pesquisa é composta por três reservatórios que compõem o sistema Paraopeba. Este é responsável por parte do abastecimento da população da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Os reservatórios de Vargem das Flores, Serra Azul e Rio Manso, apesar de possuir capacidade máxima de aproximadamente 276 milhões de m³ de água, operou em junho de 2017 com apenas 59,2% do seu volume total, o que configura os reflexos da crise hídrica dos anos anteriores (COPASA, 2017).

Considerando-se os impactos causados pelas alterações do uso e cobertura do solo na qualidade da água, conhecer e analisar a dinâmica de mudanças de uso do solo nas bacias hidrográficas dos reservatórios de abastecimento público de regiões metropolitanas é extremamente importante na gestão dos recursos hídricos.

A integração de geotecnologias, um conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações geográficas, como o sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG), oferece técnicas que vêm se destacando nos procedimentos de levantamentos e mapeamento de áreas (ROCHA, 2002). Nesse contexto, o geoprocessamento e as métricas de paisagem surgem como instrumentos para auxiliar na quantificação e análise da dinâmica de uso solo e avaliar eventuais impactos sobre a qualidade da água.

Segundo Couto (2004), o termo "métricas da paisagem" refere-se exclusivamente a índices desenvolvidos para padrões de mapas categóricos e são algoritmos que quantificam características espaciais de fragmentos. A análise das métricas de paisagem dá maior clareza sobre a situação ambiental da área de estudo. Metzger (2001) destaca alguns termos utilizados na ecologia da paisagem: [1] Corredores: Áreas homogêneas (numa determinada escala) de uma unidade da paisagem, que se distinguem das unidades vizinhas e que apresentam disposição espacial linear. Em estudos de fragmentação, considera-se corredor apenas os elementos lineares que ligam dois fragmentos anteriormente conectados; [2] Fragmento: Uma mancha originada por fragmentação, isto é, por subdivisão, promovida pelo homem, de uma unidade que inicialmente apresentava-se sob forma contínua, como uma matriz; [3] Manchas: Áreas homogêneas (numa determinada escala) de uma unidade da paisagem,

que se distinguem das unidades vizinhas e têm extensões espaciais reduzidas e nãolineares; [4] Matriz: Em geral essa unidade pode ser reconhecida por recobrir a maior parte da paisagem (ou seja, sendo a unidade dominante em termos de recobrimento espacial), ou por ter um maior grau de conexão de sua área (isto é, um menor grau de fragmentação).

Uma vez que alterações do uso e cobertura do solo podem interferir na qualidade da água, uma das formas de acompanhar o estado geral de qualidade da água é através da utilização de Índices de Qualidade da água (IQA), que representam em um único número a influência de diferentes parâmetros de qualidade da água e trazem informações sobre sua qualidade para os tomadores de decisão (LUMB *et al.*, 2011a, TYAGI *et al.*, 2013, GAO *et al.*, 2016, LKR *et al.*, 2020).

Nesse sentido, esta pesquisa visou demonstrar como as geotecnologias podem contribuir na análise dos impactos das alterações no uso e ocupação do solo na qualidade da água em reservatórios de abastecimento público de Região Metropolitana. Foram utilizados dados referentes aos anos de 2007 e 2017 para o levantamento das informações necessárias à análise. Esse período foi escolhido porque, em 2017, a Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH foi acometida por uma forte crise hídrica, sendo escolhido o referido ano como referência e 10 anos antes para comparação. Para tanto, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o potencial de uso de softwares e dados gratuitos na gestão dos recursos hídricos;
- Analisar a expansão urbana e a fragmentação florestal da área de estudo;
- Analisar os impactos das alterações do uso e ocupação do solo e da expansão urbana e fragmentação florestal na qualidade da água;
- Elencar os desafios da utilização das geotecnologias na gestão dos recursos hídricos.

3.2 RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE/MG

O abastecimento de água potável da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH é realizado basicamente através de um sistema integrado, que é gerido pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA. A captação de água é realizada diretamente no Rio das Velhas, no Rio Paraopeba, e em três reservatórios artificiais: o

Serra Azul, o Rio Manso e o Vargem das Flores (todos localizados na bacia do Rio Paraopeba). Com o rompimento da barragem de rejeitos de mineração da empresa Vale, no município de Brumadinho/MG, os pontos de captação de água diretamente no Rio Paraopeba foram contaminados, sendo que os três reservatórios passaram a ser as principais fontes de água para o abastecimento de grande parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte durante o período crítico do desastre.

Com base na importância dos três reservatórios para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, e nas substanciais diferenças no padrão de uso e ocupação do solo nas áreas de entorno dos reservatórios, as sub-bacias hidrográficas dos três reservatórios foram escolhidas como área de estudo (FIGURA 3.1).

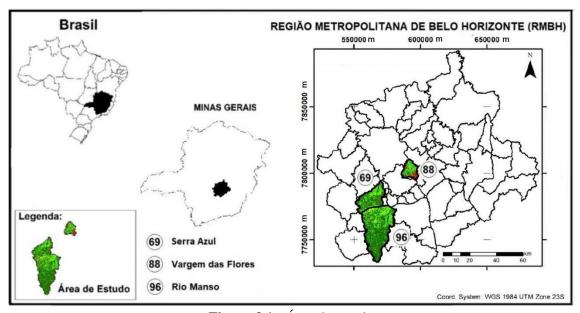


Figura 3.1 - Área de estudo.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

O reservatório Serra Azul está localizado na porção oeste da RMBH. A região da bacia hidrográfica contribuinte abrange parcialmente os municípios de Mateus Leme, Igarapé e Juatuba, sendo que a área da bacia de hidrográfica de contribuição até a Estação de Monitoramento BP069 é de aproximadamente 274,45 km². A bacia do reservatório caracteriza-se principalmente pela ocorrência de pastos, pastos sujos e áreas cultivadas. A atividade da região que envolve maiores recursos financeiros, e é responsável pelos maiores prejuízos ambientais, é a exploração mineral (CARVALHO, 2002).

O reservatório de Vargem das Flores se insere na porção centro-oeste da RMBH, em área de manancial e proteção ambiental de alcance metropolitano. Sua área está

totalmente inserida na RMBH e apresenta atividades associadas ao turismo, ocupação residencial de renda alta (condomínios), bem como sofre pressões de expansão urbana. O reservatório de Vargem das Flores está localizado entre os municípios de Betim e Contagem e a área da bacia de hidrográfica de contribuição até a Estação de Monitoramento BP088 é de aproximadamente 124,14 km².

O reservatório Rio Manso é o terceiro que compõe o Sistema Paraopeba. A região da bacia hidrográfica contribuinte abrange parcialmente os municípios de Brumadinho, Rio Manso, Itatiaiuçu, Crucilândia e Bonfim, sendo que a área da bacia de hidrográfica de contribuição até a Estação de Monitoramento BP096 de aproximadamente 672,66 km². Na bacia do reservatório são observadas atividades ligadas à exploração minerária e a região tem expressiva representatividade na produção agrícola de alimentos, abastecendo a RMBH (PDDI-RMBH, 2017).

Embora estejam inseridas em contextos geográficos distintos, cabe ressaltar que conflitos de uso do solo são observados no entorno dos três reservatórios. É nesse sentido que a pesquisa recorre às análises multitemporal e métrica da paisagem para caracterizar as mudanças no padrão das classes de uso e cobertura do solo, bem como identificar como essas mudanças podem influenciar na qualidade da água.

Após escolher a área de estudo e estabelecer uma base de dados georreferenciada, foram selecionadas as Estações de Monitoramento do Projeto de Águas de Minas do IGAM. As primeiras estações de monitoramento à jusante de cada reservatório foram escolhidas sendo: **BP069** - Reservatório Serra Azul; **BP088** - Reservatório Vargem das Flores; e **BP096** - Reservatório Rio Manso (BP - Bacia Paraopeba). No software QGIS delimitou-se a área da bacia de contribuição para cada uma das estações escolhidas e calculou-se a distância entre o reservatório e a estação de monitoramento. O Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, a partir dos resultados dos parâmetros físicos, químicos e biológicos obtidos nas estações de monitoramento, apresentou nos relatórios de avaliação da qualidade das águas os seguintes valores de IQA para os anos de 2007 e 2017 (TABELA 3.1).

Tabela 3.1 – Índice de Qualidade da Água (IQA) para as estações BP069, BP088 e BP096.

Estação de Monitoramento	IQA (2007)	IQA (2017)
BP069	37	54
BP088	90	83
BP096	54	40

Fonte: IGAM, 2008 e 2018.

Em complementação ao estudo, foram utilizados na análise os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS referentes aos índices de coleta e tratamento de esgoto dos municípios que compõem as bacias hidrográficas de contribuição dos três reservatórios referentes aos anos de 2007 e 2017 (TABELA 3.2). O Índice de coleta de esgoto (IN015) é a razão entre o volume de esgoto tratado pelo volume de água consumido multiplicada por cem e o Índice de tratamento de esgoto (IN016) é a razão entre o volume de esgoto tratado. O volume coletado também é multiplicado por cem.

Tabela 3.2 – Índice de coleta e tratamento de esgoto para o município que compõem a bacia hidrográfica dos reservatórios.

Reservatórios	Município (% da área ocupada pelo		leta de esgoto 015)	Índice de tratamento de esgoto (IN016)		
	reservatório)	2007	2017	2007	2017	
	Igarapé (64%)	21,33 %	42,57 %	0 %	0 %	
Serra Azul	Juatuba (5%)	32,23 %	26,87 %	5,91 %	58,6 %	
	Mateus Leme (50%)	-	42,66 %	-	76,17 %	
Vargem das	Betim (38%)	66,49 %	56,07 %	3,99 %	91,99 %	
Flores	Contagem (55%)	61,56 %	71,91 %	44,1 %	95,74 %	
	Bonfim (11,5%)	54,06 %	60,21 %	0 %	0%	
	Brumadinho (14,5)	7,14 %	61,95 %	100 %	18,56 %	
Rio Manso	Crucilândia (88,6%)	-	100 %	-	50 %	
	Itatiaiuçu (51,33%)	-	79,27 %	-	0 %	
	Rio Manso (99,9%)	-	-	-	-	

Fonte: SNIS, 2020.

3.3 RECURSOS MATERIAIS

A seleção dos recursos materiais foi de fundamental importância para o bom desenvolvimento da metodologia. Foram levadas em consideração a existência e a disponibilidade de dados e *softwares* gratuitos e a adequação desses para a finalidade da análise proposta.

Os recursos materiais e computacionais utilizados durante a realização dos estudos foram as ferramentas QGIS 3.8 para as operações de geoprocessamento e Fragstats 4.2.1 para a análise de métricas da paisagem, um computador pessoal e a base cartográfica digital da área de estudo, conforme descrito a seguir (TABELA 3.3).

Para a caracterização e avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica de contribuição dos reservatórios foi utilizado o Índice de Qualidade da Água (IQA) calculado para os anos de 2007 e 2017 pelo IGAM através do Programa Águas de Minas.

Tabela 3.3 - Informações gerais sobre a fonte de dados utilizada.

Dados	Fonte	Informações gerais
Limites municipais e regionais, modelo digital de elevação e outros	IDE-Sisema Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	 Plataforma criada pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (Sisema); Permite o download gratuito nos formatos kml e shapefile; Abrangência: estado de Minas Gerais; Acesso: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/
Mapas de uso e cobertura do solo de 2007 e 2017	MapBiomas Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil	 Processamento em nuvem; Classificadores automatizados desenvolvidos e operados na plataforma <i>Google Earth Engine</i>; Mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil; Rede colaborativa com especialistas de diversas áreas; Acesso: http://plataforma.mapbiomas.org/.
Informações gerais sobre os reservatórios e índices de qualidade da água	Projeto Águas de Minas do IGAM e COPASA	 Projeto responsável pelo monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas de Minas Gerais. Acesso:_http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/monitoramento-dequalidade-das-aguas Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA
Informações gerais sobre índices de coleta e tratamento de esgoto	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS	• É um sistema do Ministério do Desenvolvimento Regional que reúne informações e indicadores sobre a prestação dos serviços de Água, Esgotos, manejo de Resíduos Sólidos e manejo de Águas Pluviais, provenientes dos prestadores que operam no Brasil. Acesso: www.snis.gov.br

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Em virtude da natureza da proposta, utilizamos nesta pesquisa apenas ferramentas gratuitas e dados públicos de órgãos oficiais. Acreditamos que essa medida pode contribuir para facilitar a replicabilidade do trabalho.

3.4 PROPOSTA METODOLÓGICA

Considerando a importância do gerenciamento do uso e ocupação do solo na qualidade da água (CAREY *et al.*, 2011; URIARTE *et al.*, 2011; WILSON; WENG, 2011), a metodologia proposta é uma sequência de análises comparativas de indicadores relativos à qualidade da água. Por seu turno, as propriedades geográficas das classes de cobertura do solo na área de estudo em dois momentos distintos são referentes aos anos de 2007 e 2017 (FIGURA 3.2).

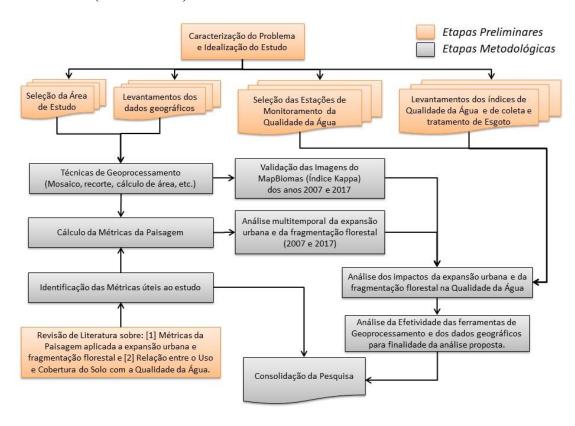


Figura 3.2 - Fluxograma síntese da metodologia proposta. **Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

Nas etapas preliminares, houve a caracterização do problema, a idealização do estudo e foi o momento em que também foram efetuadas a revisão de literatura e o levantamento de dados e informações. Posteriormente, foi selecionada a área de estudo e as estações de monitoramento. Nas etapas metodológicas, foram utilizadas técnicas de geoprocessamento na preparação dos dados e na sequência, em que houve a identificação e cálculo das métricas úteis ao estudo. Em seguida, foi analisada a expansão urbana e da fragmentação florestal na área de estudo e, paralelamente, foi verificada a qualidade temática dos mapas. Por fim, foi analisado o impacto da

fragmentação e da expansão urbana na qualidade da água, momento em que também analisou-se a efetividade das ferramentas de geoprocessamento.

3.4.1 Identificação das métricas para estudo da expansão urbana e da fragmentação florestal

Diversos trabalhos se valeram da Ecologia da Paisagem para analisar, quantificar e avaliar a estrutura e as mudanças na paisagem. Dentre eles, pode-se destacar os que estudaram a expansão urbana (SILVA *et al.*, 2012; e BARBOSA; NASCIMENTO JR., 2009) e os que analisaram a fragmentação Florestal (SAITO *et al.*, 2016; e BEZERRA *et al.*, 2011). As métricas determinantes no estudo da expansão urbana e da fragmentação florestal foram: área total da classe, percentagem de área, número de polígonos, relação perímetro/área e índice de forma. Maiores informações sobre esses indicadores podem ser acessadas no estudo de Couto (2004), constante das referências deste texto.

3.4.1.1 Técnicas de geoprocessamento e preparação das informações

Para a manipulação, integração e análises dos dados geográficos foram utilizadas técnicas tradicionais de geoprocessamento como a conversão de sistemas de coordenadas e de referências, conversão dos dados em diferentes formatos, mosaico, recorte geográfico, delimitação das bacias hidrográficas, reclassificação de mapas, cálculos de área etc.

Os limites municipais e regionais, bem como o modelo digital de elevação utilizado para delimitação das bacias, foram obtidos na Plataforma IDE-Sisema (SISEMA, 2019). Os mapas de cobertura e uso do solo disponíveis na plataforma MapBiomas possuem várias classes referentes a esses elementos (Pastagem; Formação Florestal; Formação Campestre; Mosaico de Agricultura e Pastagem; Floresta Plantada; Rio, Lago e Oceano; Infraestrutura Urbana; Mineração; e Afloramento Rochoso), no entanto, para tornar a análise viável, essas classes foram reagrupadas em cinco novos grupos (Infraestrutura Urbana; Pastagem/Cultura; Mata; Água; e Mineração/Solo Exposto), seguindo critérios semelhantes aos definidos pelo Manual Técnico de Uso da Terra (MAPBIOMAS, 2019; IBGE, 2013).

A análise e validação dos mapas classificados oriundos da Plataforma MapBiomas, ou seja, o controle de qualidade da classificação das referidas imagens foi feito utilizado a estatística Kappa, método utilizado para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático, de forma global, utilizando todas as classes por meio de uma matriz de confusão (MOREIRA, 2003).

3.4.1.2 Cálculo das Métricas da Paisagem

Após a verificação da qualidade temática dos mapas de uso e ocupação do solo, as métricas foram calculadas no *software* Fragstats 4.2. Os arquivos de dados utilizados para análise da expansão urbana e a da fragmentação florestal foram os mapas classificados dos três reservatórios para os anos de 2007 e 2017, reclassificadas das originais obtidas do projeto MapBiomas. Esse processo foi realizado a partir do exame das métricas supracitadas na seção 4.1.

Os resultados foram posteriormente organizados e tabulados, de forma a facilitar a análise comparativa para os dois períodos estudados. As mudanças na estrutura da paisagem, analisada através da quantificação dos valores das métricas para as classes de uso e ocupação do solo, permitem inferir sobre a expansão urbana e sobre a fragmentação florestal das bacias hidrográficas dos reservatórios analisados.

3.4.2 Análise dos índices de qualidade da água

Dos dados de monitoramento de qualidade do Programa Águas de Minas para os anos-base 2007 e 2017, disponíveis para o estudo, foi adotado o IQA, que é um índice criado pela National Sanitation Foundation, dos Estados Unidos, através de pesquisas de opinião junto a vários especialistas da área. O IQA reúne nove parâmetros, considerados mais representativos para a caracterização da qualidade das águas: coliformes fecais (termotolerantes), pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitrato, fosfato total, temperatura da água, turbidez, sólidos totais e oxigênio dissolvido (COSTA; FERREIRA, 2015). Esse índice indica uma classificação dos cursos d'água segundo fornecida pelo IGAM (TABELA 3.4).

Tabela 3.4 - Classificação de qualidade da água.

Categoria	Ponderação
Excelente	$90 < IQA \le 100$
Bom	$70 < IQA \le 90$
Médio	$50 < IQA \le 70$
Ruim	$25 < IQA \le 50$
Muito Ruim	$0 < IQA \le 25$

Fonte: Adaptado IGAM (2012)

3.4.3 Análise dos índices de coleta e tratamento de esgoto

Nesta etapa, foram analisadas as variações dos índices de coleta de esgoto (IN015) e o índice de tratamento de esgoto (IN016) para os municípios que compõem as bacias hidrográficas de contribuição dos três reservatórios referentes aos anos de 2007 e 2017. Os dados foram extraídos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, um sistema do Ministério do Desenvolvimento Regional.

3.4.4 Análise do impacto da expansão urbana e da fragmentação florestal na qualidade da água

Para esta etapa foram analisadas quantitativamente as variações dos índices de qualidade da água, os índices de coleta e tratamento de esgoto e as métricas de paisagem nos anos de 2007 e 2017, nos três reservatórios da RMBH, correlacionando a expansão urbana e a fragmentação florestal com as variações do índice de qualidade da água para o mesmo período. Foram calculadas as principais métricas para cada um dos três reservatórios e avaliados os impactos das mudanças dessas métricas na qualidade da água para os anos em análise.

3.4.5 Análise de efetividade das ferramentas de geoprocessamento e dos dados geográficos

Nesta etapa, foram elencadas as vantagens, as desvantagens e os desafios da utilização das ferramentas de geoprocessamento e de dados geográficos gratuitos na metodologia proposta. Essa análise se deu através da avaliação da qualidade temática das imagens utilizadas e da análise da eficiência dos dados utilizados para a finalidade proposta.

3.5 RESULTADOS NA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

3.5.1 Análise e validação das imagens de uso e cobertura do solo da Plataforma MapBiomas

Antes de realizar o controle de qualidade da classificação das imagens com as classes de uso e cobertura do solo do MapBiomas, estas tiveram suas classes reagrupadas em cinco novas categorias, conforme apresentado na TABELA 3.5.

Tabela 3.5 - Irregularidades apontadas para os estudos de caso escolhidos.

Classes	Reagrupamento	Classes originais (MapBiomas)
1	Infraestrutura Urbana	Infraestrutura Urbana
2	Postogom/Culturo	Pastagem
	Pastagem/Cultura	Mosaico de Agricultura e Pastagem
		Formação Florestal
3	Mata	Floresta Plantada
		Formação Campestre
4	Água	Rio. Lago e Oceano
5	Minaração/Sala Evnasta	Mineração
3	Mineração/Solo Exposto	Afloramento Rochoso

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Em seguida, foi analisado o controle de qualidade dos mapas classificados do MapBiomas utilizando-se a estatística Kappa para os reservatórios Serra Azul/Estação BP069, Vargem das Flores/Estação BP088 e Rio Manso/Estação BP096, para os anos de 2007 e 2017. No *software* QGIS foram distribuídos aleatoriamente, de acordo com a extensão de cada bacia, 622 pontos de controles para validar o mapa temático, 200 pontos de controle para a bacia hidrográfica do Reservatório Serra Azul (TABELA 3.6), 98 pontos para o Reservatório Vargem das Flores (TABELA 3.7) e 324 pontos para o Reservatório Rio Manso (TABELA 3.8). Em seguida, foram criadas as matrizes de transição e o cálculo dos índices Kappa para os anos analisados.

Tabela 3.6 – Matriz de confusão e Índice Kappa – Reservatório Serra Azul - 2007 (a) e 2017 (b).

Ano: 2007						
CLASSES	1	2	3	4	5	Total
1 - Infraestrutura Urbana	1	2	0	0	0	3
2 - Pastagem/Cultura	2	102	7	0	0	111
3 - Mata	0	17	57	0	2	76
4 - Água	0	0	0	6	0	6
5 - Mineração/Solo Exposto	0	1	0	0	3	4
Total	3	122	64	6	5	200
2			_			

Índice Kappa = 0,712 (Muito boa)

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Ano: 2017									
CLASSES	1	2	3	4	5	Total			
1	0	7	1	0	0	8			
2	1	96	9	0	0	106			
3	0	13	61	0	1	75			
4	0	0	0	5	0	5			
5	0	1	0	1	4	6			
Total	1	117	71	6	5	200			
Índice Kappa = 0,694 (Muito boa)									

(b)

Tabela 3.7 – Matriz de confusão e Índice Kappa – Reservatório Serra Azul - 2007 (a) e 2017 (b).

Ano: 2007						
CLASSES	1	2	3	4	5	Total
1 - Infraestrutura Urbana	10	5	0	0	0	15
2 - Pastagem/Cultura	0	24	3	0	0	27
3 - Mata	1	7	38	0	0	46
4 - Água	0	0	0	8	0	8
5 - Mineração/Solo Exposto	0	2	0	0	0	2
Total	11	38	41	8	0	98

Índice Kappa = 0,727 (Muito boa)

(a)

Ano: 2017						
CLASSES	1	2	3	4	5	Total
1	12	10	1	0	0	23
2	0	18	6	0	0	24
3	1	7	36	0	0	44
4	0	0	0	6	0	6
5	0	1	0	0	0	1
Total	13	36	43	6	0	98

Índice Kappa = 0,609 (Muito boa) (b)

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Tabela 3.8 – Matriz de confusão e Índice Kappa – Reservatório Rio Manso - 2007 (a) e 2017 (b).

Ano: 2007						
CLASSES	1	2	3	4	5	Total
1 - Infraestrutura Urbana	2	5	0	0	1	8
2 - Pastagem/Cultura	2	162	4	0	9	177
3 - Mata	0	49	68	0	4	121
4 - Água	0	1	0	10	0	11
5 - Mineração/Solo Exposto	0	1	0	0	6	7
Total	4	218	72	10	20	324
Ý 1' TZ	_	571	D	`		

Índice Kappa = 0,571 (Boa)

(a)

0 9 2 0 169 5 0 6 180 3 0 3 115 10 10 Total 72

4

Total

Ano: 2017 CLASSES

> Índice Kappa = 0,617 (Muito boa) (b)

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Observa-se que os três reservatórios possuem índices Kappa satisfatórios, ou seja, a qualidade do mapa oscilou entre Bom e Muito Bom, demonstrando a boa qualidade dos Mapas de Uso e Cobertura do Solo da Plataforma MapBiomas para a área de estudo.

3.5.2 Métricas da Paisagem

Neste trabalho, para avaliar a estrutura da paisagem, foram analisadas as métricas: número de polígonos (NP) e área das manchas para averiguar se houve ou não fragmentação da paisagem. De igual modo, foram observadas as métricas de relação perímetro/área e índice de forma, somada com as demais, para compreender a evolução, o tipo e a forma da fragmentação da paisagem.

Quanto às métricas, cumpre lembrar que a métrica NP quantifica as manchas de uma paisagem. Já a métrica relação perímetro/área está relacionada à forma do fragmento. Dessa forma, quanto menor essa relação, menor também será a borda e viceversa. Vale ressaltarmos também que fragmentos de formatos mais regulares têm a relação perímetro/área minimizada e, portanto, o centro da área está mais distante das bordas. Assim, a área central encontra-se isolada dos fatores externos, enquanto fragmentos de formatos mais irregulares têm maior proporção de bordas, fazendo que ocorra maior interação com a matriz circundante (PIROVANI *et al.*, 2014). A métrica índice de forma indica o quanto irregular é uma forma. Assim, valores mais próximos de 1 são ligados a formatos mais regulares – lembrando que ações humanas tendem a provocar fragmentos mais retilíneos.

Os resultados das métricas para os três reservatórios: [1] Serra Azul; [2] Vargem das Flores; e [3] Rio Manso são apresentados de forma gráfica e tabular na sequência.

3.5.2.1 Reservatório Serra Azul

A matriz da paisagem do Reservatório Serra Azul revela que a classe Pastagem/Cultura entre os anos analisados (FIGURA 3.3) detém cerca de 58% da área da microbacia. Em uma análise quantitativa de perda e ganho de área real, a classe Infraestrutura Urbana foi a que teve maior ganho, pois sua área quase que dobrou entre 2007 e 2017, passando de 435,64 ha para 849,98 ha (TABELA 3.9), demonstrando uma expressiva expansão urbana no período.

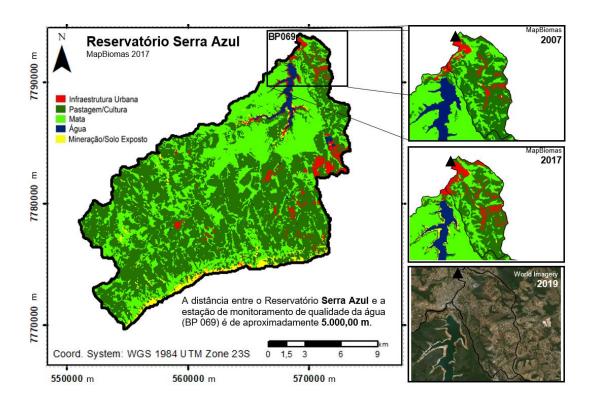


Figura 3.3 – Bacia de contribuição do Reservatório Serra Azul. **Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

Tabela 3.9 – Área das classes em hectare e percentual – Reservatório Serra Azul para os anos 2007 e 2017.

Classe/Ano	2007	7	2017		
	Área (ha)	Em %	Área (ha)	Em %	
1 - Infraestrutura Urbana	435,64	1,59	849,98	3,10	
2 - Pastagem/Cultura	15995,78	58,28	15646,53	57,01	
3 - Mata	9689,45	35,30	9805,57	35,73	
4 - Água	709,05	2,58	386,64	1,41	
5 - Mineração/Solo Exposto	615,45	2,24	756,64	2,76	
Total	27445,37	100,00	27445,37	100,00	

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Houve um aumento significativo da métrica NP da classe Infraestrutura Urbana, de 184, em 2007, para 260, em 2017, e aumento da sua área total (TABELA 3.10). Esse resultado aponta um possível processo de expansão urbana com leve fragmentação entre 2007 e 2017. Ao analisar as métricas para a classe Mata, é possível dizer que ela não sofreu grandes alterações ao longo dos anos 2007 e 2017, pois não houve mudança significativa das métricas NP, relação perímetro/área e índice de forma (TABELA 3.10). Ressaltamos que houve um aumento de área, porém, não houve fragmentação considerável dessa classe ao longo dos anos analisados.

Tabela 3.10 – Métricas da paisagem do Reservatório Serra Azul para os anos 2007 (a) e 2017 (b).

Classe (2007)	NP	Área (km²)	Perímetro/área	Índice de forma
1 - Infraestrutura Urbana	184	4,36	731,1163	1,6375
2 - Pastagem/Cultura	272	159,96	645,0818	1,6647
3 - Mata	605	96,89	565,6034	1,7099
4 - Água	26	7,09	609,4761	1,4877
5 - Mineração/Solo Exposto	169	6,15	746,4805	1,6155
Total	1256,00	274,45		
		(a)	-	
Classe (2017)	NP	Área (km²)	Perímetro/área	Índice de forma
1 - Infraestrutura Urbana	260	8,50	723,4797	1,7218
2 - Pastagem/Cultura	350	156,46	669,2647	1,6799
3 - Mata	615	98,06	591,3365	1,6711
4 - Água	34	3,87	628,2459	1,3746
5 - Mineração/Solo Exposto	169	7,57	687,0682	1,6458
Total	1428,00	274,45		
		(b)		

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Uma análise isolada da métrica NP de uma paisagem como um todo é insuficiente para inferir sobre a existência de fragmentação da área. A fragmentação fica evidente ao se analisar as métricas de relação perímetro/área e índice de forma. Essas métricas auxiliam na compreensão da forma dos fragmentos, sendo que quanto mais regulares, menor a pressão de borda, estando menos susceptíveis a novas fragmentações.

Sobre a relação perímetro/área, quanto menor for o seu valor, mais regular é o fragmento, sendo que essa regularidade é alcançada para valores próximos de 1 para índice de forma. Com isso, observou-se que a classe Pastagem/Cultura sofreu uma intensa fragmentação entre os anos de 2007 a 2017, pois houve diminuição de área e aumento das métricas NP, relação perímetro/área e índice de forma (TABELA 3.10).

3.5.2.2 Reservatório Vargem das Flores

Ao longo dos 10 anos em análise (2007 a 2017), a matriz da paisagem do Reservatório Vargem das Flores foi a classe Mata (FIGURA 3.4), já que cerca de 45% da área é composta pela referida classe (TABELA 3.11). A classe Infraestrutura Urbana teve o maior ganho de área, pois, quando analisamos quantitativamente a perda e o

ganho real de área, ela passou de 1706,30 ha em 2007 para 2087,83 ha em 2017 (TABELA 3.11), demonstrando que houve expansão urbana no período. Observa-se, ainda, que quase 17% da área total da bacia de contribuição são constituídos pela classe Infraestrutura Urbana, item prejudicial à qualidade da água do reservatório.

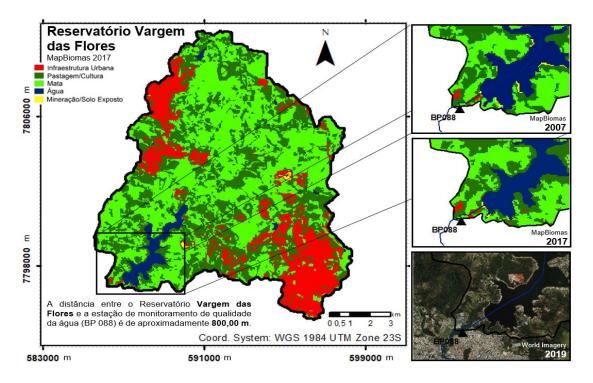


Figura 3.4 – Bacia de contribuição do Reservatório Vargem das Flores.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Tabela 3.11 – Área das classes em hectare e percentual – Reservatório Vargem das Flores para os anos 2007 e 2017.

Classe/Ano	200′	7	2017		
Classe/Ano	Área (ha)	Em %	Área (ha)	Em %	
1 – Infraestrutura Urbana	1706,30	13,74	2087,83	16,82	
2 – Pastagem/Cultura	4361,10	35,13	4411,77	35,54	
3 - Mata	5813,34	46,83	5531,92	44,56	
$4 - \acute{ m A}$ gua	507,86	4,09	364,55	2,94	
5 – Mineração/Solo Exposto	25,78	0,21	18,30	0,15	
Total	12414,37	100,00	12414,37	100,00	

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Analisando a métrica NP, observa-se que a houve uma leve diminuição do NP total entre 2007 e 2017 (TABELA 3.12), demonstrando que ocorreu processo contrário à fragmentação na área do Reservatório Vargem das Flores para o período analisado.

Observa-se que a classe Mata teve uma expressiva diminuição de área, perdendo 2,81 km² de área, ou seja, cerca de 2.800.000,00 m² (TABELA 3.12). Em uma análise geral das métricas para os dois anos, observa-se que as métricas relação perímetro/área e índice de forma aumentaram, indicando que as formas dos fragmentos se tornaram menos regulares e, consequentemente, estão mais susceptíveis a novas fragmentações.

Tabela 3.12 – Métricas da paisagem do Reservatório Vargem das Flores para os anos 2007 (a) e 2017 (b).

Classe (2007)	NP	Área (km²)	Perímetro/área	Índice de forma
1 - Infraestrutura Urbana	178	17,06	726,8685	1,6751
2 - Pastagem/Cultura	394	43,61	609,7148	1,7318
3 - Mata	281	58,13	662,7097	1,5541
4 - Água	22	5,08	471,2184	1,4212
5 - Mineração/Solo Exposto	5	0,26	379,3967	1,5064
Total	880,00	124,14		
	•	(a)		

Classe (2017)	NP	Área (km²)	Perímetro/área	Índice de forma
1 - Infraestrutura Urbana	186	20,88	718,0513	1,7119
2 - Pastagem/Cultura	395	44,12	668,7536	1,7353
3 - Mata	240	55,32	610,5753	1,6033
4 - Água	23	3,64	513,8158	1,4019
5 - Mineração/Solo Exposto	8	0,18	762,8223	1,5107
Total	852,00	124,14		
		(b)		

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

3.5.2.3 Reservatório Rio Manso

A matriz da paisagem do reservatório é a classe Pastagem/Cultura (FIGURA 3.5), pois cerca de 65% da área é composta pela referida classe (TABELA 3.13). Observa-se que a área da classe Infraestrutura Urbana permaneceu estável no período analisado (TABELA 3.13), demonstrando que não houve expansão urbana significativa entre 2007 e 2017. Outro ponto observado é que somente 1% da área de contribuição do reservatório é constituído pela classe Infraestrutura Urbana, ou seja, esse reservatório recebeu baixa carga de poluição difusa proveniente da urbanização.

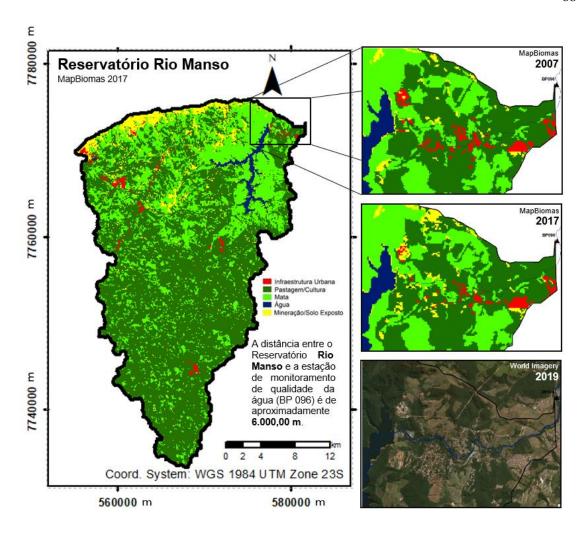


Figura 3.5 – Bacia de contribuição do Reservatório Rio Manso. **Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

Tabela 3.13 – Área das classes em hectare e percentual – Reservatório Rio Manso para os anos 2007 e 2017.

Classe/Ano	200′	7	2017		
Classe/Allo	Área (ha)	Em %	Área (ha)	Em %	
1 - Infraestrutura Urbana	572,78	0,85	652,40	0,97	
2 - Pastagem/Cultura	45094,75	67,04	43652,90	64,90	
3 - Mata	16508,22	24,54	18328,35	27,25	
4 - Água	1010,27	1,50	911,65	1,36	
5 - Mineração/Solo Exposto	4080,30	6,07	3721,02	5,53	
Total	67266,31	100,00	67266,31	100,00	

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

A métrica Número de Polígono – NP total permaneceu quase estável no período analisado. Observou-se, ainda, um aumento de área da classe Mata e uma diminuição de área da classe Pastagem/Cultura (TABELA 3.14). Esses resultados sugerem que não

ocorreu fragmentação da área e que houve uma eventual regeneração na paisagem com leve expansão urbana entre 2007 e 2017. A analisar a classe Mineração/Solo Exposto, observa-se que houve um decréscimo de área com redução significativa da métrica NP entre os anos 2007 e 2017, ratificando a ideia de regeneração, pois, áreas não vegetadas deram origem a outras áreas vegetadas no período analisado.

Tabela 3.14 – Métricas da paisagem do Reservatório Rio Manso para os anos 2007 (a) e 2017 (b).

Classe (2007)	NP	Área (km²)	Perímetro/área	Índice de forma
1 - Infraestrutura Urbana	205	5,73	729,2984	1,6528
2 - Pastagem/Cultura	506	450,95	624,0204	1,6316
3 - Mata	1732	165,08	551,5239	1,56
4 - Água	16	10,10	635,9316	1,6695
5 - Mineração/Solo Exposto	1127	40,80	699,7913	1,5621
Total	3586,00	672,66		

(a)

Classe (2017)	NP	Área (km²)	Perímetro/área	Índice de forma
1 - Infraestrutura Urbana	212	6,52	724,6023	1,642
2 - Pastagem/Cultura	563	436,53	641,4801	1,7305
3 - Mata	1833	183,28	575,4028	1,587
4 - Água	20	9,12	636,0341	1,6756
5 - Mineração/Solo Exposto	976	37,21	719,1351	1,5508
Total	3604,00	672,66		

(b)

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Analisando a classe Água para os três reservatórios, pode-se observar que houve diminuição significativa de área para a referida classe entre 2007 e 2017, o que significa um reflexo da crise hídrica observada naquele período. A menor perda de área foi observada no reservatório Rio Manso.

Um resumo dos principais resultados da pesquisa é apresentado a seguir (TABELA 3.15):

Tabela 3.15 – Resumo dos resultados para os três reservatórios (Serra Azul, Vargem das Flores e Rio Manso).

RESE	ERVATÓRIO	Serra Azu	ıl (BP069)		las Flores 088)		Ianso 096)	
		2007	2017	2007	2017	2007	2017	
10	A (ICAM)	37	54	90	83	54	40	
IQ	A (IGAM)	(Ruim)	(Médio)	(Bom)	(Bom)	(Médio)	(Ruim)	
T /	Coleta (IN015*)	21,33 %	42,57 %					
Igarapé	Tratamento (IN016**)	0 %	0 %					
T 1	Coleta (IN015*)	32,23 %	26,87 %					
Juatuba	Tratamento (IN016**)	5,91 %	58,6 %					
Mateus	Coleta (IN015*)	-	42,66 %					
Leme	Tratamento (IN016**)	-	76,17 %					
D 4	Coleta (IN015*)			66,49 %	56,07 %			
Betim	Tratamento (IN016**)			3,99 %	91,99 %			
Conton	Coleta (IN015*)			61,56 %	71,91 %			
Contagem	Tratamento (IN016**)			44,1 %	95,74 %			
D C	Coleta (IN015*)					54,06 %	60,21 %	
Bonfim	Tratamento (IN016**)					0 %	0 %	
	Coleta (IN015*)					7,14 %	61,95 %	
Brumadinho	Tratamento (IN016**)					100 %	18,56 %	
Crucilândia	Coleta (IN015*)					-	100 %	
Cruchandia	Tratamento (IN016**)					-	50 %	
Itatiaiuçu	Coleta (IN015*)					-	79,27 %	
	Tratamento (IN016**)					-	0 %	
Manso	Coleta (IN015*)					-	-	
Manso	Tratamento (IN016**)					-	-	
	z da Paisagem lia 2007/2017 (%)	_	em/Cultura 58%) Mata (46%)		(46%)	Pastagem/Cultura (66%)		
	strutura Urbana Área (%)	1,59%	3,10 %	13,7 %	16,8 %	0,85 %	0,97 %	
	Mata Área (%)	35,3 %	35,7 %	46,8 %	44,6%	24,5 %	27,3%	
	ngem/Cultura Área (%)	58,3 %	57,0 %	35,1 %	35,5 %	67,0 %	64,9 %	
	reservatório ao ponto onitoramento	51	km	0,8 km		6km		
Área da ba	cia de contribuição	274,4	274,45 km²		124,14 km²		672,66 km²	

*IN015 - Índice de coleta de esgoto e **IN016 - Índice de tratamento de esgoto.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

3.6 DISCUSSÕES NA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

As ações antrópicas, dentre elas, a expansão urbana e a fragmentação florestal, modificaram o uso e a ocupação do solo ao passar dos anos. Esta modificação altera sensivelmente os processos físico-químicos e biológicos dos sistemas naturais. É sabido que os ecossistemas dos reservatórios situados em bacias urbanas e periurbanas são muito frágeis e particularmente vulneráveis às mudanças que ocorrem em sua bacia

hidrográfica. O aumento de áreas impermeáveis, as mudanças no uso do solo e o crescimento populacional sem infraestrutura sanitária adequada resultam no aumento do volume e da carga poluidora do escoamento superficial, cujo destino é o meio aquático receptor (ALBERTI *et al.* 2007; VIEIRA *et al.* 2009). Estes fatores fazem parte da realidade das análises ambientais - objetivo principal do presente estudo - e encontramse em abundância na área de estudo.

Com relação à área escolhida para o estudo, a crise hídrica ocorrida entre os anos de 2014 a 2016 afetou fortemente a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Nesse contexto, torna-se relevante advertir sobre a importância desses reservatórios como estratégia para o abastecimento da região. Logo, dentro do contexto de ameaça aos recursos hídricos, em especial as bacias produtoras de água, é importante demonstrar como a ciência pode contribuir na gestão eficiente dos recursos hídricos de modo a garantir a disponibilidade desses recursos em quantidade e qualidade.

No que concerne ao Índice de Qualidade da Água (IQA) utilizado no estudo, apesar de ser uma simplificação da qualidade da água, ele permite avaliar a qualidade da água bruta visando ao seu uso para abastecimento público (após o tratamento), sendo que os nove parâmetros utilizados no cálculo são, em sua maioria, indicadores de contaminações causadas pelo lançamento indevido de esgoto doméstico.

Quanto aos impactos da expansão urbana e da fragmentação florestal na qualidade da água, ponderamos que o reservatório que apresentou melhores índices IQA (Bom) é o Vargem das Flores, mesmo tendo o maior percentual de área urbana (16% da área) e vários conflitos de uso do solo no entorno do reservatório. No entanto, é o único reservatório cuja matriz da paisagem é a classe Mata (que ocupa 46% da área). Nesse quadro, a cobertura florestal pode servir como uma espécie de sumidouro para alguns poluentes da água, logo a qualidade da água tende a se manter melhorar à medida que a cobertura florestal aumenta. Além disso, os municípios da bacia hidrográfica de contribuição desse reservatório apresentam os melhores índices de coleta e tratamento de esgoto.

A distância da estação de monitoramento e o reservatório Vargem das Flores é de 800m e isso também pode ter contribuído para bons de IQA. Já nos outros reservatórios, essa distância é superior a 5 quilômetros (o barramento funciona como um filtro – barrando os resíduos). Houve uma redução do IQA entre 2007 e 2017 para o reservatório, possivelmente a diminuição da classe Mata e o aumento da Infraestrutura Urbana contribuiu para o ocorrido.

Pondera-se, ainda, que os reservatórios de Serra Azul e Rio Manso apresentam índices de IQA pouco satisfatórios, oscilando entre Ruim e Bom, fato que pode ser justificado devido à matriz da paisagem ser a classe Pastagem/Cultura. A agricultura influencia fortemente na concentração de nitrogênio, fósforo e sólidos suspensos totais, além das cargas de sedimentos nos cursos de água e os solos mais expostos permitem maior carreamento de partículas e impurezas para os corpos hídricos no período de precipitação, influenciando negativamente na qualidade da água. Os baixos índices de coleta e tratamento de esgoto dos municípios também podem estar contribuindo para a má qualidade da água das bacias hidrográficas desses reservatórios.

Contudo, a relação entre o uso do solo e a qualidade da água não é constante, isso porque as bacias hidrográficas possuem características diferentes, constituindo ambientes únicos. Além disso, a escala geográfica e o relevo têm forte influência nesse relacionamento. Para uma análise mais detalhada deve-se, portanto, considerar as particularidades do local do estudo.

Esses resultados, somados a outras informações, certamente permitiriam aos órgãos públicos (executivo e o ministério público) tomar decisões mais assertivas no que diz em respeito à gestão e fiscalização dos recursos hídricos.

Outro ponto importante é o fato de este estudo ter utilizado apenas *softwares* e dados geográficos gratuitos, onde se preocupou com o controle de qualidade temática das imagens. Desta forma, o emprego de geotecnologias pode prover materiais de qualidade e análises que permitam tomar melhores decisões quanto à gestão eficiente dos recursos hídricos, visando garantir a disponibilidade desses recursos em quantidade e qualidade.

3.7 CONCLUSÕES NA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

A partir dos estudos realizados e dos resultados encontrados, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- 1) Os mapas classificados da Plataforma MapBiomas são satisfatórios no que diz respeito à qualidade temática (índice Kappa), demonstrando a viabilidade de sua utilização em análises ambientais;
- 2) As métricas utilizadas neste estudo foram satisfatórias no que diz respeito à análise da expansão urbana e fragmentação florestal, evidenciando sua importância no

processo de reconhecimento e análise da dinâmica de mudanças de uso do solo nas bacias estudadas;

- 3) Esta pesquisa apresenta um diagnóstico dos impactos das alterações do uso e ocupação do solo na qualidade da água, bem como a relação positiva entre a cobertura florestal na qualidade da água. Os resultados serviriam para nortear ações governamentais no sentido de preservação e gestão dos recursos hídricos;
- 4) Para uma avaliação mais aprofundada da relação entre o uso e ocupação do solo na qualidade da água, é necessário também considerar outros fatores, como a caracterização física, biótica e socioeconômica dos municípios que fazem parte da bacia, bem como das atividades existentes na área.
- 5) Quanto aos desafios do uso da geotecnologia na gestão dos recursos hídricos, cumpre destacarmos que essa metodologia supriu com eficiência o objetivo proposto de analisar os impactos do uso e ocupação do solo na qualidade da água, contornando, de forma alternativa, os altos custos com o uso imagens privadas e *softwares* licenciados.

3.8 REFERÊNCIAS

- ALBERTI, M.; BOOTH D.; HILL, K.; COBURN, B.; AVOLIO, C.; COES, S. e SPIRANDELLI, D. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Landscape and Urban Planning*, v.80, n.4, p.345-361, 2007.
- BARBOSA, V. L.; NASCIMENTO JÚNIOR, A. F. Paisagem, ecologia urbana e planejamento ambiental. **Geografia**, Londrina, v. 18, n. 2, 2009.
- BEZERRA, C. G.; SANTOS, A. R.; PIROVANI, D. B.; PIMENTEL; L. B.; EUGENIO, F. C. Estudo da fragmentação florestal e ecologia da paisagem na sub-bacia hidrográfica do Córrego Horizonte, Alegre, ES. **Revista Espaço & Geografia**, v.14, n. 2, p. 257-277, 2011.
- BINKLEY, D.; BURNHAM, H.; ALLEN, H. L. Water quality impacts of forest fertilization with nitrogen and phosphorus. **Forest Ecology and Management**, v. 121, n. 3, p. 191-213, 1999.
- BOTEQUILHA-LEITÃO, A.; AHERN, J. F. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 52, n.2, p. 65-93, 2002.
- CAREY, R. O.; MIGLIACCIO, K. W.; LI, Y.C.; SCHAFFER, B.; KIKER, G. A.; BROWN, M.T. Land use disturbance indicators and water quality variability in the Biscayne Bay Watershed, Florida. **Ecolog. Indic.** v. 11, p. 1093-1104, 2011.
- CARVALHO, R. F. Avaliação do uso e ocupação do solo na bacia do ribeirão Serra Azul e as consequências no reservatório de abastecimento da COPASA MG. 2002. 303 f. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Geografia) Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- COPASA Companhia de Saneamento de Minas Gerais. **Nível dos Reservatórios**. Belo Horizonte, 2017.
- COSTA, F. B.; FERREIRA, V. de O. Análise de Parâmetros que Compõem o Índice de Qualidade das Águas (IQA) na Porção Mineira da Bacia do Rio Paranaíba. **OBSERVATORIUM: Revista Eletrônica de Geografia**, v.7, n.18, p. 22-47, set. 2015.
- COUTO, P. Análise factorial aplicada a métricas da paisagem definidas em Fragstats. **Investigação Operacional**, vol. 24, p. 109-137, 2004.
- FENG, H.; HAN, X.; ZHANG, W.; YU, L. A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze River intertidal zone due to urbanization. **Marine pollution bulletin**, v. 49, n. 11-12, p. 910-915, 2004.
- FISHER, D. S.; STEINER, J. L.; ENDALE, D. M.; STUEDEMANN, J. A.; SCHOMBERG, H. H.; FRANZLUEBBERS, A. J.; WILKINSON, S. R. The relationship of land use practices to surface water quality in the Upper Oconee

Watershed of Georgia. Forest Ecology and Management, v. 128, n. 1-2, p. 39-48, 2000.

GOMES, L. N. L. Estudo da Associação entre Parâmetros Bióticos e Abióticos e a Ocorrência de Florações de Cianobactérias no Reservatório de Vargem das Flores – MG. 2008. 184f. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. (UFMG). Belo Horizonte, MG, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra.** Manuais técnicos em geociências, 2013.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Projeto Águas de Minas:** qualidade das águas superficiais em 2002. Belo Horizonte: Igam, 2003. 230 p.

_____. Qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2007: resumo executivo. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2008.

_____. Qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2017: resumo executivo. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2018.

LKR, A., SINGH, M.R., PURO, N. Assessment of water quality status of Doyang River, Nagaland, India, using Water Quality Index. **Applied Water Science**, v. 10, n. 46, 2020.

MAPBIOMAS 2019. Plataforma de mapas e dados. Cobertura do Solo. Disponivel em: https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage. Acesso em: 10/06/2019

METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotrópica**, v. 1, n. 1/2, p. 1-9, 2001.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologia de aplicação**. INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais, 2ª edição. Viçosa/MG: UFV, 2003.

PLANO DIRETOR DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE (PDDI-RMBH). **Rio Manso/MG: Processo de revisão – Plano Diretor**. Belo Horizonte. 2017. http://www.rmbh.org.br:8081/arquivos_biblioteca/PDRMBH_PRD04_RIO_MANSO_P M.pdf Acesso em: 22 de out. 2019.

PIROVANI, D. B.; SILVA, A. G.; SANTO, A. R.; CECÍLIO, R. A.; GLERIANI, J. M.; MARTINS, S. V. Análise espacial de fragmentos florestais na Bacia do Rio Itapemirim, ES. **Rev. Árvore**, v.38, n. 2, p.271-281, 2014.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora/MG, Ed. do Autor, 2ª Edição, 2002, 220p.

SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2019. Disponível em: idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 10 dez. 2019.

- SAITO, N.S.; MOREIRA, M.A.; SANTOS, A.R.; EUGENIO, F.C.; FIGUEIREDO, A.C. Geotecnologia e Ecologia da Paisagem no Monitoramento. **Floresta e Ambiente**. v. 23, n.2, 2016.
- SCANAVACA JUNIOR, L. A importância da floresta para o meio ambienta. Embrapa Meio Ambiente. **Natureza e Arte,** Brumadinho, v. 5, n. 29, p. 2, 2011.
- SILVA, F. B.; MARQUE, T. S.; DELGADO, C. Processos de expansão urbana e mudanças na paisagem: ensaio metodológico (1950-2000). **Revista da Faculdade de Letras Geografia Universidade do Porto**. III série, v. I, p. 161 183, 2012.
- SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **SNIS Série Histórica**, 2020. Brasil, Brasília, DF, 2020. Disponível em http://www.snis.gov.br. Acesso em 29 de abril de 2020.
- URIARTE, M.; YACKULIC, C.B.; LIM, Y.; ARCE-NAZARIO, J. Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis. **Landscape Ecol**. v. 26, p.1151-1164, 2011.
- VIEIRA, P. C.; SEIDL, M.; NASCIMENTO, N. E SPERLING, M. V. Avaliação de fluxo de poluentes em tempo seco e durante eventos de chuva em uma microbacia urbanizada no município de Belo Horizonte. In: **Manejo de águas pluviais urbanas.** Righetto, A. M. (Org.) Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.346-366.
- VON SPERLING, E.; FERREIRA, A. C.da S.; GOMES, L. N. Lu. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutriente concentrations and bacteria growth. **Desalination**, v. 226, p. 169-174, 2008.
- WILSON, C. O.; WENG, Q. Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois. Sci. Total Env. 409: 4387-4405, 2011.
- YE, Y.; HE, X.; CHEN, W.; YAO, J.; YU, S.; JIA, L. Seasonal water quality upstream of Dahuofang Reservoir, China—the effects of land use type at various spatial scales. **CLEAN—Soil, Air, Water**, v. 42, n. 10, p. 1423-1432, 2014.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, percebe-se que a aplicação das metodologias propostas contribuirá de sobremaneira com processos de produção de prova pericial e análise da qualidade da água - e consequentemente na preservação do meio ambiente -, uma vez que ambas as metodologias se mostraram bastante satisfatórias para os fins a que se propõem.

A metodologia proposta no capítulo GEOTECNOLOGIAS EM PERÍCIAS AMBIENTAIS é uma sequência de análises exploratórias de diferentes soluções de geotecnologias aplicadas a perícias ambientais no intuito de encontrarmos formas de criar protocolos de emprego dessas técnicas e instrumentos. A partir dos resultados alcançados foi possível perceber a importância do uso adequado das geotecnologias no aprimoramento do processo de perícia ambiental.

No capítulo GEOTECNOLOGIAS E QUALIDADE DA ÁGUA foi proposta uma metodologia para demonstrar como as geotecnologias podem contribuir na análise dos impactos das alterações no uso e ocupação do solo na qualidade da água nos reservatórios de abastecimento público da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG. Diversas conclusões foram obtidas a partir dos experimentos realizados neste capítulo. A principal diz respeito ao uso das geotecnologias na gestão da paisagem e seu impacto nos recursos hídrico. Mesmo utilizando dados e *software* disponíveis gratuitamente, os resultados alcançados supriram com eficiência o objetivo proposto de analisar o impacto do uso e cobertura da terra na qualidade da água.

Baseados nas exposições acima apresentadas, conclui-se que o trabalho atingiu os objetivos propostos, gerando resultados bastante significativos para diferentes análises ambientais utilizando dados e *softwares* gratuitos. Em suma, este estudo: [1] revelou as lacunas e as principais demandas por soluções de geotecnologia no apoio às atividades de perícia ambiental e outras análises ambientais, contornando, de forma alternativa, os altos custos com o uso imagens privadas e *softwares* licenciados; [2] esclareceu a importância do uso das geotecnologia no escopo da perícia ambiental e eventuais limites de sua utilização; [3] demonstrou que as métricas da paisagem adotadas foram satisfatórias na análise da expansão urbana e fragmentação florestal; e [4] confirmou o impacto das alterações do uso e cobertura do solo na qualidade da água. Foi apresentado também um estudo que validou o emprego das imagens da Plataforma

MapBiomas em análises ambientais a partir do controle de qualidade temáticas da classificação (utilizando a estatística Kappa).

No futuro, vislumbra-se a utilização de outros índices para avaliar a qualidade temática dos mapas da Plataforma MapBiomas e a criação de protocolos e recomendações de uso dos diferentes dados geoespaciais e métodos de análises para aprimoramento das análises ambientais.