



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

**AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL NA MINERAÇÃO:
ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA – MINAS GERAIS**

FERNANDA MOREIRA AMARAL

BELO HORIZONTE

2018

FERNANDA MOREIRA AMARAL

**AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL NA MINERAÇÃO:
ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA – MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais,
como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheira Ambiental e
Sanitarista.

Orientador: Profº. Dr. Vandeir Robson
da Silva Matias

BELO HORIZONTE

2018

FERNANDA MOREIRA AMARAL

**AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL NA MINERAÇÃO:
ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA – MINAS GERAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 26 / 06 / 10

Banca Examinadora:

Vander Robson da Silva Matias

Vander Robson da Silva Matias – Presidente da Banca Examinadora
Prof. Dr. CEFET/MG – Orientador

Matusalém de Brito Duarte

Matusalém de Brito Duarte
Prof. Dr. CEFET/MG

Lilia Maria de Oliveira

Lilia Maria de Oliveira
Prof. Dr. CEFET/MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial, à minha mãe por sempre apoiar os meus sonhos. Às amigas do CEFET, Marina, Lorena, Fran e Ju, pelo estímulo nas longas horas de estudo. Aos professores do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, por nos indicar sempre os melhores caminhos. Aos colegas de trabalho da Centaurus Brasil Mineração e da AngloGold Ashanti, pelo aprendizado e oportunidade. Aos amigos do intercâmbio, Freed e Thiago, pelos momentos calorosos em um país tão frio. Obrigada a todos que contribuíram com esta jornada. Obrigada Deus!

*isso de querer ser
exatamente aquilo
que a gente é
ainda vai
nos levar além*

Paulo Leminski

RESUMO

FERNANDA MOREIRA AMARAL, **Avaliação de Impacto Ambiental na Mineração:** Estudo de Caso do Município de Nova Lima – Minas Gerais. 2018. 95f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

Este trabalho analisou as transformações que ocorreram nos recursos hídricos do município de Nova Lima, Minas Gerais, devido à expansão da atividade minerária, por meio de análise multitemporal de imagens de satélites *Landsat* e análise estatística de dados de uma série histórica de vazão média. Para isso, as imagens do satélite *Landsat*, dos anos de 1987, 1997, 2007 e 2017, foram processadas e interpretadas com vistas à identificação e delimitação das áreas mineradas, na sequência foram quantificadas. Assim, a partir dos resultados obtidos foi possível identificar e analisar os impactos causados nos recursos hídricos, decorrentes da atividade minerária. Desta forma, concluiu-se que a supressão da vegetação e a impermeabilização do solo causadas pela expansão das áreas de mineração podem causar impactos na vazão média e na distribuição sazonal dos recursos hídricos no município de Nova Lima. Por fim, os impactos foram avaliados como negativos, indiretos, a médio e longo prazo, permanentes, reversíveis e cumulativos.

Palavras-Chave: Imagens *Landsat*, Vazão Média, Recursos Hídricos, Mineração.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Hidrológico.	22
Figura 2 - Relevo de uma bacia hidrográfica e as entradas e saídas de água: p é a precipitação; et é a evapotranspiração e rs é o escoamento.	25
Figura 3 - Efeito da forma da bacia em seu hidrograma.	27
Figura 4 - Bacias urbana e rural.....	27
Figura 5 - Bacia natural e bacia com reservatório para regularização da vazão.	28
Figura 6 - Variação da duração e intensidade da precipitação.	29
Figura 7 - Relação entre os instrumentos da Política de Recursos Hídricos.	34
Figura 8 - Processo de avaliação de impacto ambiental.....	44
Figura 9 - Principais etapas do planejamento e execução de um estudo de impacto ambiental.	47
Figura 10 – Elementos fundamentais no processo de coleta da informação a partir do sensoriamento remoto.....	58
Figura 11 - Espectro eletromagnético.....	59
Figura 12 – Curva espectral da vegetação, da água e do solo.	60
Figura 13 - Transmitância (T) da radiação eletromagnética através da atmosfera. As áreas em azul correspondem às regiões espectrais de transparências da atmosfera e as áreas em cinza correspondem às regiões espectrais onde os gases atmosféricos absorvem a radiação eletromagnética.....	62
Figura 14 - Mapa de Localização de Nova Lima no estado de Minas Gerais.....	71
Figura 15 - Bacia do Rio das Velhas.	73
Figura 16 - Hidrografia do município de Nova Lima e localização da estação fluviométrica - Honório Bicalho Montante.	78
Figura 17 – Resultado das composições coloridas das imagens Landsat.....	80
Figura 19 – Gráfico indicando o crescimento das áreas diretamente afetadas pela mineração em Nova Lima, no período de 1997 a 2017.....	82
Figura 18 – Imagens Landsat na cor natural, com a delimitação das áreas diretamente afetadas pela mineração.....	83

Figura 20 - Gráfico Boxplot de vazão média (m^3/s), período 1987 a 2015..... 85

Figura 21 – Série temporal de vazão média mensal (m^3/s) do trecho do Rio das Velhas que drena o município de Nova Lima, período de 1987 a 2015..... 86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Interações da água em processos de mineração.	37
Quadro 2 - Dados dos satélites e datas de imageamento das cenas utilizadas no trabalho.	74
Quadro 3 - Características espectrais do sensor TM do satélite Landsat 5.	74
Quadro 4 - Características espectrais do sensor OLI do satélite Landsat 8.	75
Quadro 5 - Dados da estação fluviométrica situada em Nova Lima.	77
Quadro 6 – Áreas diretamente afetadas pela mineração no município de Nova Lima no período de 1987 a 2017, em km ²	81
Quadro 7 - Variação das áreas diretamente afetadas pela mineração em Nova Lima, no período de 1987 a 2017.	82
Quadro 8 – Estatísticas das vazões médias do trecho do Rio das Velhas, que drena o município de Nova Lima.	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1. PROCESSOS HIDROLÓGICOS, RECURSOS HÍDRICOS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS.....	22
3.1.1. Descrição Geral do Ciclo Hidrológico	22
3.1.2. Bacia hidrográfica, Balanço hídrico e Escoamento superficial	23
3.1.3. Impactos das mudanças do uso do solo no regime hidrológico de uma bacia	29
3.1.4. Gestão dos Recursos Hídricos e Aspectos da Legislação.....	32
3.1.5. Os Recursos Hídricos na Mineração	35
3.2. AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS	38
3.2.1. Aspectos Legais, Objetivos e Etapas da Avaliação de Impacto Ambiental.....	38
3.2.2. Etapas do planejamento e da elaboração de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA).....	45
3.2.3. Fragilidades da Avaliação de Impactos Ambientais (AIA)	53
4. METODOLOGIA	55
4.1. MÉTODO DE ABORDAGEM	55
4.2 SENSORIAMENTO REMOTO DO AMBIENTE	56
4.2.1. Fundamentos do Sensoriamento Remoto	56
4.2.2. Vantagens e Limitações do Sensoriamento Remoto	66
4.2.3. As Aplicações das Imagens Orbitais em Estudos Ambientais	67
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	71
4.4 SELEÇÃO E PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT	73
4.5 OBTENÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DA SÉRIE HISTÓRICA DAS VAZÕES	76
5. RESULTADOS.....	79
5.1. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT	79
5.2 ÁREAS DIRETAMENTE AFETADAS PELA MINERAÇÃO NAS ÚLTIMAS QUATRO DÉCADAS NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA.....	81

5.3 ANÁLISE DESCRIPTIVA DA SÉRIE HISTÓRICA DA VAZÃO MÉDIA DO RIO DAS VELHAS	84
6. ANÁLISE DOS POSSÍVEIS IMPACTOS CAUSADOS NOS RECURSOS HÍDRICOS DECORRENTES DA ATIVIDADE MINERÁRIA	86
7. CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	91

1. INTRODUÇÃO

A água é essencial para a manutenção da vida, no homem mais de 60% do seu peso são constituídos por água, e em alguns animais aquáticos esta porcentagem sobe para 98%. No planeta há cerca de $1,36 \times 10^8 \text{ m}^3$ de água disponível. Entretanto, todo este volume está distribuído de forma irregular, visto que 97% corresponde à água do mar, 2,2% encontram-se em geleiras e apenas 0,8% são águas doces. Destes 0,8%, 97% constituem-se de água subterrânea e apenas 3% apresentam-se na forma de água superficial, ou seja, mais fácil de ser extraída. Nessa ótica, ressalta-se, a grande importância de se preservar os recursos hídricos do planeta, bem como de se evitar a contaminação da pequena parcela de água ainda disponível (VON SPERLING, 2005).

Ao longo de sua história o ser humano estabeleceu diversos usos para a água, dentre eles, destacam-se o abastecimento humano e industrial, a irrigação, a dessedentação animal, a preservação da flora e da fauna, a recreação e o lazer, a criação de espécies, a geração de energia elétrica, a navegação, a harmonia paisagística, a diluição e transporte de despejos, entre outros (VON SPERLING, 2005). Dentro deste cenário, observa-se a importância dos recursos hídricos para o planejamento, a gestão e o desenvolvimento para os mais diversos setores no Brasil, dentre os quais ressalta-se a geração de energia elétrica, o saneamento, a indústria, a agricultura e o turismo (ANA, 2010).

No tocante à qualidade da água, pode-se dizer que esta é determinada em função das condições naturais e do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica. Neste sentido, mesmo com a bacia hidrográfica preservada nas suas condições naturais, a qualidade das águas é afetada pelo escoamento superficial e pela infiltração no solo, resultantes da precipitação atmosférica. O impacto é dependente do contato da água em escoamento ou infiltração com as partículas, substâncias e impurezas do solo. Deste modo, a incorporação de sólidos em suspensão ou dissolvidos ocorre, mesmo na condição em que a bacia hidrográfica esteja totalmente preservada em suas condições naturais (ex.: ocupação com matas e florestas). Neste caso, tem grande influência a cobertura e a composição do solo. Por outro lado, as atividades humanas também têm grande influência na qualidade das águas de uma bacia, de forma concentrada, a partir da geração de despejos domésticos ou industriais, ou de forma dispersa, devido à aplicação de produtos

agrícolas no solo, contribuindo, assim, para a introdução de compostos na água, afetando a sua qualidade. Portanto, a forma como o homem usa e ocupa o solo tem uma implicação direta na qualidade da água (VON SPERLING, 2005).

Outro aspecto a ser considerado consiste na quantidade de água disponível em uma região. Para tanto, torna-se necessário entender como a água se movimenta de um meio para outro na Terra, isto é, o ciclo da água ou ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico consiste no movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes. Nesse ciclo, distinguem-se os seguintes mecanismos de transferência da água (VON SPERLING, 2005):

- a) Precipitação:** comprehende toda a água que cai da atmosfera na superfície da Terra. As principais formas são: chuva, neve, granizo e orvalho.
- b) Escoamento superficial:** a precipitação que atinge o solo pode escoar na superfície ou infiltrar no solo. O escoamento superficial é responsável pelo deslocamento da água sobre o terreno, formando córregos, lagos e rios e eventualmente atingindo o oceano. A quantidade de água que escoa depende da intensidade da chuva e da capacidade de infiltração do solo.
- c) Infiltração:** corresponde à água que atinge o solo, formando os lençóis d'água. As águas subterrâneas desempenham papel importante na alimentação dos corpos hídricos superficiais, principalmente em épocas de estiagem. Cabe mencionar, ainda, que solos providos de cobertura vegetal, ao contrário de solos impermeabilizados, apresentam menor escoamento superficial, em decorrência há menos chances de ocorrer enchentes em períodos chuvosos; apresentam maior taxa de infiltração, o que contribui para a alimentação dos rios nos períodos secos; além de evitar o carreamento de partículas do solo para os cursos d'água.
- d) Evapotranspiração:** a transferência da água para o meio atmosférico se dá através da evapotranspiração, que caracteriza-se pelos seguintes mecanismos:
 - *Evaporação:* fenômeno caracterizado pela mudança do estado da água superficial de líquido para gasoso, dependente da temperatura e da umidade relativa do ar.

- *Transpiração:* as plantas extraem a água do solo pelas raízes. Posteriormente, a água é transferida para as folhas e evapora-se. Vale destacar, a importância deste mecanismo, considerando-se que em uma área coberta com vegetação a superfície de exposição das folhas para a evaporação é bem elevada.

Merce menção especial a estreita relação da cobertura florestal com o ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica. Uma das principais influências da floresta ocorre na interceptação da água da chuva pelas copas das árvores, quando parte da água precipitada é interceptada, voltando à atmosfera por evaporação logo após o término da chuva, reduzindo assim a quantidade de água que chega ao solo. O restante alcança o solo por meio de gotejamento ou precipitação interna, bem como pelo escoamento através do tronco das árvores. A água da chuva que chega ao piso florestal encontra condições ideais para a infiltração, devido à presença de serapilheira e ao alto nível de matéria orgânica nos primeiros centímetros do solo. A água infiltra de três a dez vezes mais rápido, e em maior quantidade em florestas quando comparada a infiltração em áreas agrícolas e pastagem. Neste sentido, o fluxo hídrico que penetra no dossel da floresta irá irrigar o solo, e também, alimentar os rios. Enquanto a água evaporada das superfícies das folhas e dos ramos das copas, bem como parte da água que é armazenada no solo contribui para a evapotranspiração (ARCOVA, CICCO & ROCHA, 2003; CASSIANO, 2013; BALBINOT et al., 2008).

As mudanças da temperatura da atmosfera e o balanço de radiação também influenciam diretamente no ciclo hidrológico. De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA, 2010), com o aquecimento da atmosfera, esperam-se, entre outras consequências, mudanças nos padrões da precipitação (aumento da intensidade e da variabilidade da precipitação), o que poderá afetar significativamente a disponibilidade e a distribuição temporal da vazão nos rios. Em suma, os eventos hidrológicos críticos, secas e enchentes, poderão tornar-se mais frequentes. A ANA (2010) ainda destaca que o cenário futuro corresponde a uma situação em que a disponibilidade hídrica é menor que a demanda, válida para todas as bacias hidrográficas. Neste sentido, tudo indica, que ao longo do século XXI, a disponibilidade dos recursos hídricos diminuirá. A Agência ressalta, que, embora, a exaustiva divulgação dos impactos das mudanças do clima tem

levado, precipitadamente, à conclusão de que a origem e/ou intensificação desses eventos estão unicamente relacionadas às ditas mudanças. Cabe lembrar que, além do impacto provocado por uma possível modificação do clima, os recursos hídricos se veem afetados por outros fatores de pressão, tais como o aumento da demanda urbana, agrícola e hidrelétrica, a intensificação de certos processos de deterioração da qualidade da água e o incremento da intervenção humana.

Vários são os estudos que buscam compreender a influência das atividades antrópicas sobre o ciclo hidrológico. Almeida et. al. (2009) afirmam que a retirada da vegetação e posterior conversão do uso da terra pelo homem constituem os maiores agentes modificadores da cobertura da terra e desencadeia uma série de alterações significativas no meio físico e no ciclo da água. Os autores ressaltam que o regime hídrico é diretamente afetado pela situação, dinâmica e manejo da vegetação, e que podem contribuir tanto para a sua manutenção e circulação ou para a sua indisponibilidade no planeta. A relação entre a vegetação e o ciclo hidrológico, pode ser estudada pela análise anterior e posterior a um determinado evento florestal, como corte raso, desbaste e reflorestamento, a qual evidencia a influência da vegetação arbórea na produção e na qualidade da água, no processo de erosão e na proteção dos mananciais. Neste sentido, pode-se inferir que a retirada da vegetação acarreta uma série de alterações no meio físico, onde destacam-se a diminuição nas taxas fotossintéticas e de evapotranspiração. Sendo que esta última pode modificar as taxas de precipitação, se ocorridas em larga escala. Em consequência, mudanças nas taxas de precipitação têm reflexo no regime de vazões, alterando a resposta hidrológica de uma bacia, que consiste na produção de água, obtida pela razão entre a vazão e a precipitação.

Em sintonia com esta abordagem, Cassiano (2013) afirma que mudanças nos usos do solo exercem implicações em muitos recursos e processos ecológicos. Bacias hidrográficas totalmente cobertas por floresta atuam efetivamente na provisão e regulação da água, enquanto que a intervenção antrópica pode causar a degradação da qualidade da água, e gerar impactos na vazão média anual e na distribuição sazonal da água. Estes efeitos decorrem do fato do potencial considerável de se aumentar a vazão máxima anual do rio por meio da diminuição dos níveis de interceptação e transpiração na bacia. A maneira mais simples de obter-se essa redução dá-se pela remoção da cobertura florestal,

devido às intervenções antrópicas, que reduzirá de forma significativa a capacidade de absorção de água pelo solo, decorrente da ausência da serapilheira que tornará o solo mais exposto e compactado. Ao lado disso, está a redução das taxas de infiltração do solo e o aumento do escoamento superficial, ocasionando inundações na época de chuva e uma menor disponibilidade de água e umidade no solo na época de seca. As florestas, ainda, contribuem para a manutenção da vazão na época de estiagem, o que reforça a necessidade do bom manejo das bacias para o estabelecimento de uma quantidade de água adequada às demandas locais. As florestas, também, tendem a melhorar a qualidade da água, ao reduzir o volume de sedimentos disponíveis por erosão e movimentos de massa (BACELLAR, 2005).

Dentre as atividades antrópicas que são responsáveis por intensas mudanças no uso do solo, e ao mesmo tempo fazem uso significativo dos recursos hídricos, destaca-se a mineração. A mineração é uma atividade industrial de uso temporário da terra que requer uma alteração das condições ambientais naturais (ex.: modificação da topografia local, supressão da vegetação etc.), de forma a suprir a sociedade moderna com os minerais necessários para a produção de bens materiais. O empreendimento minerário destaca-se pela sua significativa interação com os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, seja pelo uso dos recursos hídricos em seus processos produtivos, seja pelo fato de estar localizado nas regiões de nascentes e recarga hídrica. A água é um fator estratégico para a mineração, absolutamente necessária para muitos processos e operações, tais como a extração, o beneficiamento e o transporte do minério, armazenamento de rejeitos por meio de barragens e o tratamento de efluentes industriais. Para tanto, requer-se manejo e gestão adequados, visto que a escassez e a poluição dos recursos hídricos são fatores limitantes do desenvolvimento da atividade e a eficiência do uso dos recursos hídricos é importante elemento de competitividade (CNI & IBRAM, 2012).

Por outro lado, as atividades minerárias provocam impactos ambientais significativos durante toda a fase de exploração, como também após o encerramento das suas atividades, deixando áreas extremamente degradadas tendo em vista as significativas alterações morfológicas, ecológicas e hidrológicas introduzidas nas áreas onde atuam (MOURA et.al., 2014). Conforme Sánchez (2008), os principais impactos ambientais

decorrentes da mineração consistem em: (i) alteração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas; (ii) alteração do regime de escoamento das águas subterrâneas; (iii) alteração da qualidade do solo; (iii) alteração da qualidade do ar; (iv) alteração ou destruição de habitats terrestres e aquáticos; (v) impacto visual ; (vi) limitações das opções de uso do solo; (vii) perda de espécimes de fauna e flora; (viii) aumento da arrecadação tributária; (ix) qualificação profissional da mão de obra local. No que tange aos recursos hídricos, Moura et. al. (2014) salienta que, as diversas intervenções na área da mina, podem resultar em mudanças na configuração das bacias hidrográficas e perturbação dos processos sedimentológicos, com a movimentação de finos e a posterior acumulação em barragens de rejeito eventualmente implantadas, ou nos cursos de água a jusante, o que pode implicar em alterações na quantidade, qualidade e regime dos recursos hídricos das áreas de influência do empreendimento.

Entretanto, apesar do caráter multidisciplinar e diversificado dos problemas ambientais, o que se observa, é a ausência de abordagem sistêmica em grande parte dos estudos elaborados para a avaliação dos impactos ambientais (MOURA et.al., 2014; SÁNCHEZ, 2008). Em 2004, o Ministério Público Federal (*apud* SÁNCHEZ, 2008) apresentou um estudo abordando as principais deficiências em estudos de impactos ambientais (EIAs) no Brasil, dentre as quais salienta-se a desconsideração da bacia hidrográfica na delimitação das áreas de influência; ausência de dados que considere um ano hidrológico; superficialidade ou ausência de análise de eventos singulares em projetos envolvendo recursos hídricos; ausência ou insuficiência de dados quantitativos sobre a vegetação; a não identificação ou identificação parcial de impactos; subutilização ou desconsideração de dados dos diagnósticos; e a desconsideração da cumulatividade e sinergia dos impactos, entre outros aspectos.

Nessa ótica, ressalta-se a importância da adoção de novas técnicas e procedimentos metodológicos que deem suporte à avaliação de impactos ambientais, baseada em uma abordagem sistêmica. Considerando as diversas inter-relações entre os componentes do meio ambiente, de modo a constituir modelos e previsões próximos da realidade local, preenchendo as lacunas e reduzindo as fragilidades dos estudos ambientais. Deste modo, espera-se que os futuros estudos apresentem um balanço entre diagnóstico, prognóstico e propostas factíveis e eficazes de atenuação dos impactos

adversos e valorização dos impactos positivos (SÁNCHEZ, 2008), além de promover o entendimento e a análise das transformações ocorridas no ambiente, possibilitando identificar o estado de degradação e avaliar alternativas de desenvolvimento sustentável, que diferem da abordagem setorial e fragmentada tradicional.

2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

As sociedades modernas, dependentes dos bens materiais, estão cada vez mais empenhadas nos processos de extração e beneficiamento de minérios (CNI & IBRAM, 2012). O setor mineral é responsável por inúmeros investimentos no Brasil, e em Minas Gerais este setor tem papel fundamental no setor econômico do estado. A mineração representa um dos setores básicos da economia nacional, podendo contribuir com a melhoria do bem-estar e da qualidade de vida da população quando mantêm níveis de proteção ecológica e padrões de qualidade ambiental, além de programas que minimizem os impactos ambientais causados por esta atividade (DINIZ et.al., 2014).

Em Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero (QF) destaca-se pela abundância de recursos minerais, onde localizam-se diversas mineradoras, brasileiras e multinacionais, que extraem, principalmente, ouro e ferro há várias décadas na região (ROESER & ROESER, 2010). O QF é um ambiente único no estado, coberto por campos rupestres hematíticos, conhecidos como cangas, que representam um dos ecossistemas mais ameaçados do Brasil devido à sua distribuição restrita e principalmente à atividade mineradora. Ademais, caracteriza-se como uma região que abriga espécies endêmicas e ameaçadas de extinção, sendo considerado um ambiente prioritário para a conservação ambiental (DINIZ et.al., 2014).

O QF localiza-se na porção central do estado de Minas Gerais, com área de aproximadamente 7000 km², estendendo-se de Ouro Preto a sudeste à Belo Horizonte a noroeste. O QF abrange 38 municípios, dentre eles o município de Nova Lima, área de estudo do presente trabalho.

A escolha do município de Nova Lima justifica-se por este apresentar expressiva expansão de áreas mineradas e de supressão de vegetação nativa nas últimas décadas, conforme evidenciado por Diniz et. al. (2014) em um estudo onde elaborou-se uma análise temporal de todo o QF entre os anos de 1985 e 2011. Os autores destacaram que

em 2011 os municípios que apresentaram a maior área minerada correspondem às cidades históricas de Ouro Preto, com 1.617,90 ha minerados, Nova Lima com 1.499,59 ha minerados e Mariana, com 1.485,34 ha minerados.

Além disso, o território de Nova Lima possui uma reserva hídrica de suma importância, pois aproximadamente 50% da água utilizada pela Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) é captada em Nova Lima, no Rio das Velhas e em seus numerosos afluentes (PREFEITURA DE NOVA LIMA, 2015).

Neste contexto, ressalta-se a importância de uma avaliação dos impactos ambientais nesta região, considerando os impactos cumulativos e sinérgicos, visto que as grandes explorações que ocorreram ao longo dos anos, e que ainda ocorrem, geraram inúmeras modificações relacionadas ao meio físico, biótico e socioeconômico, além dos principais problemas oriundos da mineração, como a poluição do ar, da água e sonora, subsidência do terreno e dispersão de metais pesados para o meio ambiente (DINIZ et.al., 2014).

Diante da importância dos recursos hídricos para a sobrevivência e bem-estar humano, bem como para o planejamento, a gestão e o desenvolvimento dos mais diversos setores no Brasil, dentre os quais ressalta-se a geração de energia elétrica, o saneamento, a agricultura, o turismo e a indústria, onde inclui-se a mineração (ANA, 2010), torna-se necessário a avaliação dos possíveis impactos nos recursos hídricos decorrentes da mineração. Considerando, no entanto, as diversas inter-relações entre os componentes do meio ambiente, de modo a constituir modelos e previsões próximos da realidade local, preenchendo as lacunas e reduzindo as fragilidades dos estudos ambientais. Além de promover o entendimento e a análise das transformações ocorridas no ambiente, possibilitando identificar o estado de degradação e avaliar alternativas de desenvolvimento sustentável, que diferem da abordagem setorial e fragmentada tradicional.

Neste sentido, uma quantidade significativa de pesquisa tem sido feita para desenvolver técnicas de sensoriamento remoto que possam obter informações que auxiliem na detecção e avaliação de impactos ambientais causados pela atividade minerária, a fim de propor ações e medidas para potencializar os impactos benéficos e

minimizar, bem como mitigar os efeitos negativos gerados pela atividade nas áreas onde atuam (ZHANG et. al., 2011; LATIFOVIC et. al., 2004; CARDOZO, PIMENTA & RIBEIRO, 2004; ROUDGARMI, 2008; VOROVENCII, 2011).

O sensoriamento remoto pode ser aplicado em diversas áreas, como análise de imagens médicas (p.ex. raios-x de um braço quebrado), avaliação não-destrutiva de produtos numa linha de montagem e análise de recursos da Terra. Para a análise dos recursos terrestres, o sensoriamento remoto fundamenta-se em informações sobre a energia eletromagnética que emana da vegetação, solos, minerais, rochas, água e infraestrutura urbana terrestres, bem como certas características atmosféricas Atualmente, as informações obtidas por meio de imagens orbitais são fundamentais para a modelagem de diversos processos naturais (p. ex., estimativa do suprimento de água; estudos de eutrofização; poluição por fontes não-pontuais) e culturais (p.ex., conversão do uso da terra nas bordas urbanas; estimativa da demanda por água; estimativas populacionais) (JENSEN, 2009).

A partir de imagens orbitais de múltiplas datas pode-se identificar o tipo e a distribuição de mudanças que ocorrem na paisagem, otimizando a compreensão sobre os processos em ação. Deste modo, o sensoriamento remoto fornece informações de grande utilidade que podem auxiliar na modelagem e compreensão de processos ambientais, tais como o ciclo global do carbono, a biologia e bioquímica dos ecossistemas, aspectos dos ciclos globais da água e da energia, variabilidade e previsão do clima, química atmosférica, estimativas populacionais, modelagem da qualidade da água, detecção de mudanças na vegetação e monitoramento da mudança de uso da terra e desastres naturais (JENSEN, 2009).

Embora o sensoriamento remoto forneça informações espaciais, espectrais e temporais de forma eficiente e econômica as suas técnicas têm limitações, uma vez que elas não fornecem todas as informações necessárias à condução das pesquisas físicas, biológicas ou das ciências sociais. Desta forma, para complementar as suas informações faz-se necessário a associação de dados derivados de técnicas de medidas *in situ*, como dados quantitativos e qualitativos de monitoramento dos recursos hídricos. Assim, cientistas têm verificado que a integração de dados *in situ* e de sensoriamento remoto,

com técnicas GIS pode fornecer informações úteis, principalmente no que concerne aos aspectos qualitativos e quantitativos da água (JENSEN, 2009).

Desta maneira, tendo em vista que a mineração é uma atividade que pode causar impactos locais e regionais, dados de sensoriamento remoto combinados com a modelagem de dados derivados de monitoramentos *in situ* configura-se como uma técnica bastante promissora na avaliação de impactos ambientais, uma vez que o sensoriamento remoto proverá informações regionais, enquanto os dados de coleta *in situ* irão fornecer informações pontuais, permitindo uma avaliação sistêmica dos impactos causados pela mineração nas regiões onde atuam.

Neste contexto o objetivo principal deste trabalho é analisar as transformações que ocorreram nos recursos hídricos do município de Nova Lima, Minas Gerais decorrente da atividade minerária baseado na monitoria de transformações espaciais de diferentes épocas, por meio da interpretação de imagens *Landsat*, e séries históricas de dados de vazão.

Para tanto, estabeleceu-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o estado da arte da dinâmica física, política e socioambiental das atividades de mineração no Brasil
- Interpretar imagens do satélite *Landsat* com vistas à identificação e delimitação das áreas mineradas
- Quantificar as áreas diretamente afetadas pela mineração nas últimas quatro décadas no município de Nova Lima
- Identificar e analisar os possíveis impactos causados nos recursos hídricos, decorrentes da atividade minerária

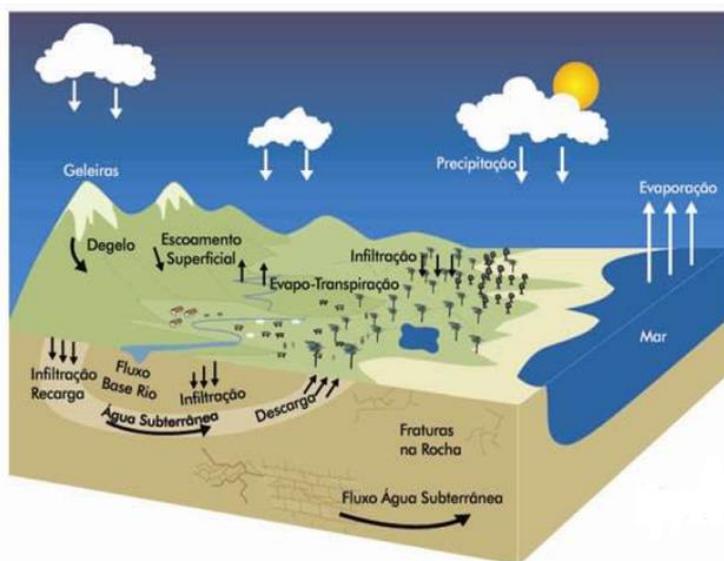
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. PROCESSOS HIDROLÓGICOS, RECURSOS HÍDRICOS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

3.1.1. Descrição Geral do Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico consiste no movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é impulsionado pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes (VON SPERLING, 2005; TUCCI, 2012). Na Figura 1 pode-se visualizar um corte esquemático do continente com as diversas fases do ciclo hidrológico.

Figura 1 - Ciclo Hidrológico.



Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2017).

Segundo Tucci (2012), dentre os aspectos que mais influenciam na variabilidade do ciclo hidrológico, nas diversas partes do planeta, destacam-se: a irregularidade com que a energia atinge os diversos locais, o diferente comportamento térmico dos continentes em relação aos oceanos, a quantidade de vapor d'água, CO₂ e ozônio na atmosfera, a variabilidade espacial de solos e coberturas vegetais, e a influência da rotação e inclinação do eixo terrestre na circulação atmosférica.

3.1.2. Bacia hidrográfica, Balanço hídrico e Escoamento superficial

A bacia hidrográfica é o elemento fundamental de análise do ciclo hidrológico na fase terrestre. Tucci (2012) define bacia hidrográfica como a área de captação natural da água da precipitação que converge os escoamentos para o mesmo ponto de saída, ou seja, seu exutório. A bacia hidrográfica é formada basicamente por um conjunto de superfícies vertentes e uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório.

As principais características de uma bacia são: área, comprimento da drenagem principal e declividade. A área é um dado fundamental para definir a potencialidade hídrica de uma bacia, uma vez que a bacia é a região de captação da água da chuva. Assim, a área da bacia multiplicada pela lâmina precipitada ao longo de um intervalo de tempo define o volume de água recebido ao longo deste intervalo de tempo. A área de uma bacia hidrográfica pode ser estimada a partir da delimitação dos divisores da bacia em um mapa topográfico. O comprimento da drenagem principal é uma característica relevante da bacia hidrográfica visto que está relacionado ao tempo de viagem da água ao longo de todo o sistema. O tempo de viagem da gota de água da chuva que atinge a região mais remota da bacia até o momento em que atinge o exutório é chamado de tempo de concentração da bacia. A declividade média da bacia e do curso d'água principal também é um atributo que afeta diretamente o tempo de viagem da água ao longo do sistema. O tempo de concentração de uma bacia diminui com o aumento da declividade (TUCCI, 2012; COLLISCHONN e TASSI, 2008).

Os tipos de solos, a geologia, a vegetação e o uso do solo também são aspectos relevantes da bacia hidrográfica. O tipo de solo e a geologia determinam em grande parte a quantidade de água precipitada que irá infiltrar no solo e a quantidade escoada superficialmente. A vegetação influencia significativamente sobre a formação do escoamento superficial e sobre a evapotranspiração. O uso do solo pode modificar as características naturais, alterando assim as taxas de infiltração, de evaporação e de escoamento, influenciando diretamente o comportamento hidrológico de uma bacia (COLLISCHONN & TASSI, 2008).

Uma bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias e cada uma das sub-bacias pode ser considerada uma bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema físico cuja a entrada é o volume de água precipitado e a saída consiste no volume escoado pelo exutório e as perdas intermediárias, como a evapotranspiração. O papel hidrológico da bacia hidrográfica é, portanto, transformar uma entrada concentrada no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento) de forma distribuída no tempo (TUCCI, 2012). Para determinar o balanço entre entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica, isto é, para realizar o seu balanço hídrico, torna-se necessário satisfazer a seguinte equação:

$$\Delta S = P - ET - ES$$

onde ΔS é a variação do volume de água armazenado na bacia (m^3); P é a precipitação em ($m^3.s^{-1}$); ET é a evapotranspiração em ($m^3.s^{-1}$); ES é o escoamento superficial ($m^3.s^{-1}$).

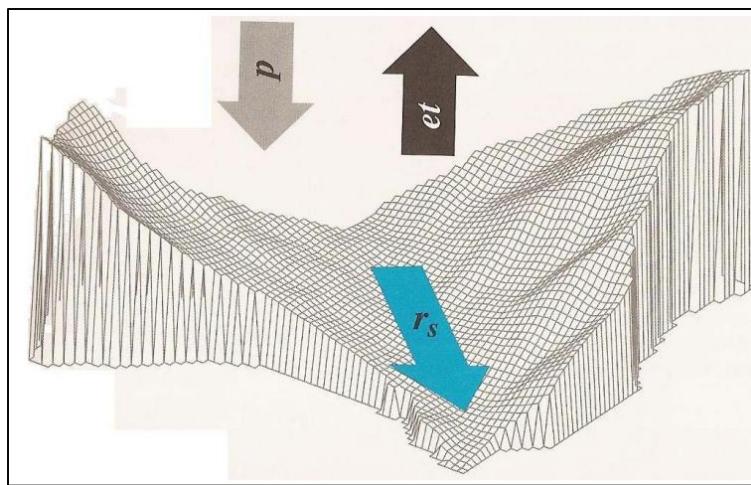
A variação de armazenamento pode ser desprezada na maior parte das bacias em intervalos de tempo longos (como um ano ou mais), e a equação pode ser reescrita em unidades de $mm.ano^{-1}$, o que é feito dividindo os volumes pela área da bacia, assim tem-se a seguinte equação:

$$P = ET + ES$$

onde P é a precipitação em $mm.ano^{-1}$; ET é a evapotranspiração em $mm.ano^{-1}$; ES é o escoamento em $mm.ano^{-1}$.

A Figura 2 apresenta o relevo, as entradas e saídas de água de uma bacia hidrográfica.

Figura 2 - Relevo de uma bacia hidrográfica e as entradas e saídas de água: p é a precipitação; et é a evapotranspiração e rs é o escoamento.



Fonte: Hornberger et al., (1998) *apud* Collischonn e Tassi (2008).

O volume escoado pela superfície da bacia pode ser classificado como escoamento superficial “livre”, que ao percorrer as mais diversas superfícies que formam a bacia hidrográfica passa, portanto, a constituir a micro rede de drenagem, formando pequenos canaletes de água que seguem caminhos preferenciais no solo, conforme a topografia (relevo), a presença de obstáculos, como rochas, raízes, plantas, etc., sob ação da gravidade. Em consequência ocorre, então, a formação de pequenos cursos d’água, os córregos, que convergem até alcançarem os rios.

Nota-se, portanto, que há um longo caminho da água precipitada na bacia até o curso d’água principal, escoando inicialmente sobre o solo nas superfícies vertentes e daí seguindo o direcionamento da rede de drenagem, dos menores filetes de água até os maiores rios. Entretanto, a vazão dos rios não tem como origem apenas o escoamento superficial sobre as superfícies vertentes da bacia. Uma parte desta vazão é proveniente do escoamento sub superficial e subterrâneo. Neste sentido, parcela da água precipitada que infiltra escoa sub superficialmente e outra parte junta-se ao escoamento subterrâneo, alimentando os rios. Há ainda uma fração que precipita diretamente sobre a superfície dos rios. Em suma, a vazão dos rios tem como origem os seguintes elementos: precipitação direta sobre a superfície do corpo d’água; escoamento superficial nas vertentes da bacia; escoamento sub superficial; e escoamento subterrâneo. Neste contexto, conclui-se que a vazão de um rio é o resultado da interação entre a precipitação e a bacia, e depende das

características da bacia que influenciam a infiltração, armazenamento e evapotranspiração (PAZ, 2004; COLLISCHONN e TASSI, 2008).

Para avaliar o escoamento superficial, torna-se necessário o traçado do hidrograma. O hidrograma, por sua vez, trata-se de um gráfico que relaciona a vazão no tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico desde a precipitação até a vazão na bacia hidrográfica.

O hidrograma apresenta três fases fundamentais: a ascensão que correlaciona-se com a intensidade da precipitação; a região do pico, próximo ao valor máximo, quando o hidrograma começa a mudar de inflexão, consequência da diminuição da precipitação e/ou amortecimento da bacia. Esta etapa cessa quando o escoamento superficial finda-se, restando somente o escoamento subterrâneo; por fim, tem-se a fase da recessão, onde apenas o escoamento subterrâneo contribui para a vazão total do rio (TUCCI, 2012).

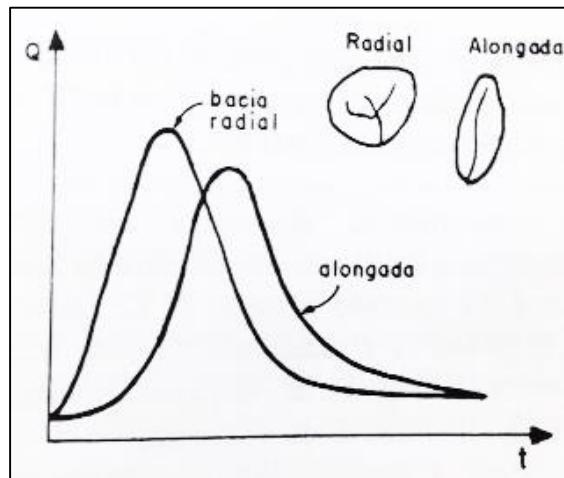
Para um rio, o hidrograma se refere a uma seção transversal específica, já que ao longo do seu curso o rio vai recebendo diversas contribuições, aumentando assim a sua vazão. Deste modo, a partir de uma determinada seção de um rio, o hidrograma correspondente indica o volume de água escoado por unidade de tempo através daquela seção. Vale lembrar que a água precipitada percorre um longo caminho até atingir uma determinada seção do rio principal na bacia, além das influências das demais etapas do ciclo hidrológico, como a evaporação, a transpiração, a infiltração, etc. Portanto, o comportamento da vazão ao longo do tempo é o resultado de todos os processos e etapas do ciclo hidrológico que ocorreram na bacia hidrográfica em questão, desde a ocorrência da precipitação até a composição dessa vazão (PAZ, 2004).

Segundo Tucci (2012) a forma do hidrograma depende de uma série de aspectos, dentre eles destacam-se:

Relevo: uma bacia com boa drenagem e grande declividade apresenta um hidrograma íngreme com pouco escoamento de base, nestas condições ressalta-se as cabeceiras das bacias. As bacias com grande área de inundação tendem a amortecer o escoamento e regularizar o fluxo. A forma da bacia também influencia o comportamento do hidrograma, como observa-se na Figura 3. As bacias do tipo radial concentram o escoamento antecipando e aumentando o pico com relação as bacias alongadas, onde

predominam o escoamento no canal principal e percurso mais longo até a seção principal, amortecendo as vazões.

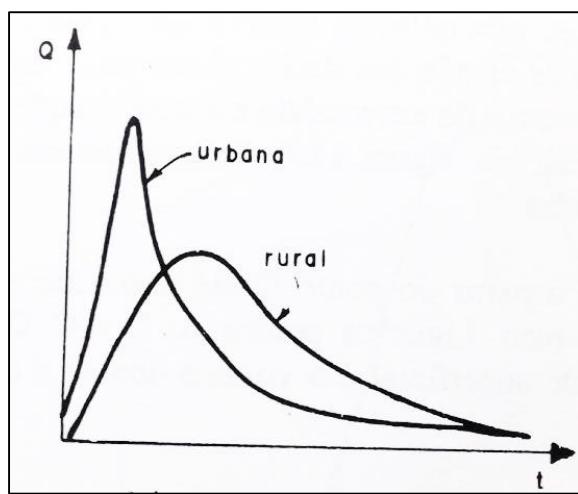
Figura 3 - Efeito da forma da bacia em seu hidrograma.



Fonte: Tucci (2012).

Cobertura da bacia: uma bacia com cobertura vegetal tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração. Por outro lado, nas bacias urbanas, onde a cobertura predominante é impermeável, acrescida de obras de drenagem, o escoamento superficial e o pico tendem a ser maiores (Figura 4).

Figura 4 - Bacias urbana e rural.

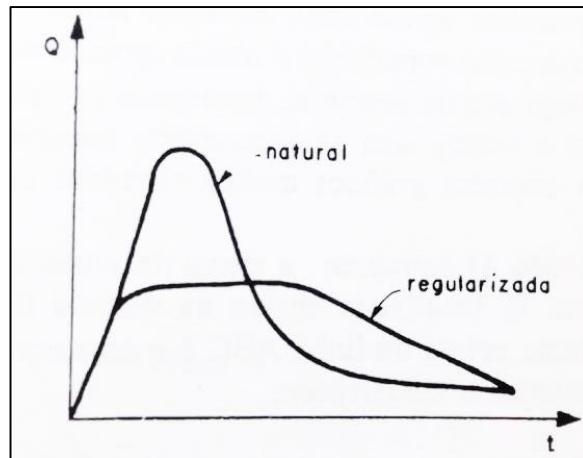


Fonte: Tucci (2012).

Modificações artificiais no rio: as intervenções do homem em um curso d'água para o uso mais racional da água, tal como um reservatório para a regularização da vazão

objetiva diminuir o pico e distribuir o volume. Ao passo que as canalizações aumentam o pico, a exemplo da bacia urbana (Figura 5).

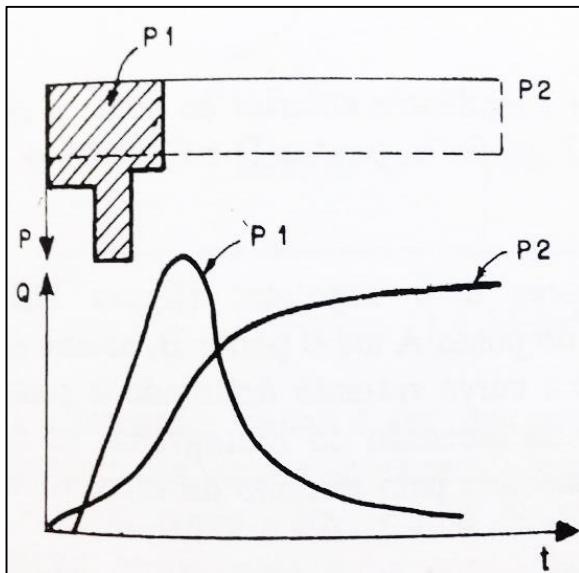
Figura 5 - Bacia natural e bacia com reservatório para regularização da vazão.



Fonte: Tucci (2012).

Distribuição, duração e intensidade da precipitação: estes aspectos são essenciais no comportamento do hidrograma. No caso das precipitações que concentram-se na parte inferior da bacia e deslocam-se posteriormente para montante, o hidrograma pode apresentar até dois picos. Quando a precipitação é constante a capacidade de armazenamento e o tempo de concentração da bacia são atingidos, assim o valor do pico torna-se estável. Após o término da precipitação, o hidrograma entra em recessão. Ressalta-se, ainda, que para bacias pequenas ($<500\text{km}^2$), as precipitações convectivas de alta intensidade, pequena duração e distribuída em uma pequena área, podem resultar em grandes enchentes. Já em bacias maiores as precipitações frontais, as quais atingem grandes áreas e apresentam intensidade média caracterizam-se como as mais importantes (Figura 6).

Figura 6 - Variação da duração e intensidade da precipitação.



Fonte: Tucci (2012).

Solo: as condições iniciais de umidade do solo são aspectos que têm significativa influência no escoamento resultante de precipitações de pequeno volume, alta e média intensidade. Em situações em que a umidade da cobertura vegetal, das depressões, da camada superior do solo e do aquífero forem baixos, parte da precipitação é retida, em consequência o hidrograma é reduzido.

3.1.3. Impactos das mudanças do uso do solo no regime hidrológico de uma bacia

As atividades humanas têm gerado diversas alterações na paisagem local, dentre as quais destaca-se o processo de substituição das vegetações naturais por outros usos. Estas modificações na paisagem podem ter impactos significativos sobre diversas variáveis ambientais, como na hidrologia local ou ainda regional. Face a este problema, diversos estudos objetivando a avaliação de impactos da vegetação sobre o escoamento através de bacias experimentais vêm sendo realizados. Bayer (2014) salienta, que na literatura são encontrados muitos estudos de casos em bacias experimentais que mostram incrementos na vazão devido a desmatamentos e reduções devido a reflorestamentos, alguns destacando o declínio do incremento da vazão devido a rebrota da vegetação após o desmatamento.

Como já mencionado, os impactos das mudanças do uso do solo, principalmente do desmatamento, sobre as variáveis hidrológicas têm demandado a atenção de muitos estudiosos. Estas interferências motivaram muitas pesquisas que, de certa forma, buscaram elucidar esta relação, vegetação versus processos hidrológicos. Nessa ótica, é ponto pacífico, que os processos como interceptação, evaporação e transpiração são fortemente influenciados pelo tipo de cobertura da terra (BAYER, 2014).

Ao analisar os hidrogramas de bacias hidrográficas verifica-se que após o início da chuva existe um intervalo de tempo em que o nível começa a elevar-se. Este tempo retardado de resposta deve-se às perdas iniciais por interceptação vegetal e depressões no solo, além do próprio retardado de resposta da bacia devido ao tempo de deslocamento da precipitação (TUCCI, 2012). Assim, destaca-se a importância da interceptação na retenção de parte da precipitação, reduzindo assim o volume e a energia cinética do escoamento superficial, auxiliando também na estabilização da vazão ao longo da bacia.

A interceptação ocorre em virtude da presença de vegetação ou outra forma de obstrução ao escoamento. O volume armazenado evapora-se, retornando à atmosfera. Este processo influencia no balanço hídrico da região, visto que atua como um reservatório de parcela da precipitação para o consumo. A interceptação é uma fase fundamental no ciclo hidrológico, à medida que reduz a variação da vazão ao longo do ano, bem como retarda e reduz os picos das cheias (TUCCI, 2012).

A cobertura vegetal torna-se importante no ciclo hidrológico, visto que parte da interceptação ocorre devido a presença de vegetação. A interceptação vegetal, no entanto, depende de uma série de fatores, dentre os quais, pode-se citar: características da precipitação e condições climática, tipo e densidade da vegetação e período do ano. Desta forma, para pequenos volumes de precipitação ($<0,3\text{mm}$), todo o volume é retido pelas florestas. Enquanto que para precipitações superiores a 1mm, 10 a 40% pode ficar retido. Ademais, o tipo de vegetação influenciará na quantidade de gotas que cada folha pode reter e a densidade indicará o volume mantido numa superfície de bacia. Em geral, as folhas interceptam o maior volume da precipitação, no entanto, ocorre também escoamento pelos troncos, que interceptam, cerca de 1 a 15% do total precipitado. No tocante as condições climáticas, ressalta-se que em regiões de latitudes mais elevadas,

ocorre uma expressiva variação climática, logo constata-se também uma significativa variação das folhagens no decorrer do ano, o que interfere diretamente na precipitação. Ao passo, que em regiões tropicais, onde verifica-se a presença de apenas duas estações climáticas bem definidas, as variações na folhagem não são tão expressivas. Entretanto, a época do ano pode caracterizar alguns tipos de cultivos que apresentam diferentes fases de crescimento e colheita (TUCCI, 2012).

Neste contexto, revela-se oportuno reconhecer que a quantificação do impacto causado pela retirada da cobertura vegetal sobre o escoamento é uma questão importante para regiões em desenvolvimento com grande ocupação do espaço rural e urbano como o Brasil. Todavia, existe uma grande dificuldade em quantificar efetivamente o processo de interceptação devido a interação com outros aspectos tais como infiltração e evaporação. Além disso, existem outros aspectos que podem interceptar as águas das chuvas, tais como as depressões naturais e artificiais de uma bacia. Em áreas rurais, por exemplo, observa-se que após uma enchente há a formação de pequenas lagoas em áreas que inexistiam drenagem. Como o lençol freático torna-se alto logo após uma enchente, a saída de água ocorre principalmente por evaporação, reduzindo a vazão média da bacia (TUCCI, 2012).

As mudanças no uso da terra, como o desmatamento, também exercem significativa influência em outra fase do ciclo da água, a evapotranspiração. Sabe-se que as mudanças no uso do solo, principalmente o desmatamento, está diretamente relacionado às alterações de parâmetros como albedo, altura média da vegetação, resistência estomática ou superficial, capacidade de interceptação, entre outras. Estas variáveis estão intimamente relacionadas aos processos como evaporação e transpiração. Assim, pode-se afirmar que em cenários de desmatamentos tem-se uma redução da evapotranspiração, enquanto que em cenários de reflorestamentos tem-se um aumento (RODRIGUEZ, 2011 *apud* BAYER, 2014). Bayer (2014) ainda destaca que, essas modificações produzem alterações no balanço hídrico, que podem, quando ocorrem em grandes escalas, ter consequências na circulação atmosférica. Além disso, ao promover a retirada de florestas reduz-se a capacidade de interceptação, logo de volume de água evaporada, e a profundidade das raízes.

No tocante às características do solo, as regiões florestadas apresentam maior permeabilidade devido a fatores como deterioração de raízes, presença de microrganismos e de pequenos animais, que criam micro e macro poros no solo, redução da densidade do solo devido a presença de matéria orgânica, além da transpiração das plantas reduzirem a umidade no solo e também devido ao fato de que a energia de queda da chuva é absorvida em regiões florestadas, permitindo que a água penetre no solo. Por outro lado, quando áreas florestadas passam a ser utilizadas para outros usos, como agricultura, pastagens, silvicultura, pecuária e mineração, podem apresentar uma maior compactação e impermeabilização do solo. Isto se deve, principalmente, ao manejo inadequado, pela excessiva utilização de máquinas, pelo excesso de animais de grande porte, entre outros. Com a interrupção das atividades pode ocorrer uma rápida recuperação do solo, porém a capacidade de infiltração não retornará a sua capacidade original (BAYER, 2014).

3.1.4. Gestão dos Recursos Hídricos e Aspectos da Legislação

Segundo Lanna (2012) a gestão dos recursos hídricos consiste em uma série de ações analíticas e criativas visando a definição de princípios e diretrizes, a concepção de documentos orientadores e normativos, à estruturação de sistemas gerenciais, bem como à tomada de decisão, cujo objetivo principal é o controle e a proteção dos recursos hídricos. Dentre as ações necessárias para a implementação da gestão dos recursos hídricos, destaca-se a política dos recursos hídricos.

Atualmente, a gestão de recursos hídricos no Brasil é amparada pela Lei das Águas (Lei nº 9.433, de 1997) que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Desta forma, a PNRH (1997) institui o domínio público da água, bem como estabelece que a água é um recurso limitado, dotado de valor econômico. Em situações de escassez a prioridade é para o consumo humano e dessendentação animal. Adicionalmente, a PNRH determina a bacia hidrográfica como unidade territorial de gestão; bem como ressalta o caráter descentralizador da gestão dos recursos hídricos, que deve incluir a participação do poder público, usuários e sociedade civil, de modo a proporcionar os usos múltiplos da água.

Neste sentido, os objetivos da PNRH (1997) consistem em garantir disponibilidade e qualidade da água às futuras gerações; integrar e racionalizar os diversos usos; e a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos. Para alcançar tais objetivos, a PNRH define cinco instrumentos para a gestão dos recursos hídricos: o Plano de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água; a cobrança pelo uso; o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos; e a outorga pelo direito de uso. Em verdade, são esses os principais instrumentos de uma política de gestão descentralizada e participativa e sobre os quais se pretende destacar as peculiaridades para a implementação de cada um de acordo com as especificidades intrínsecas às atividades da mineração (ANA, 2006). A seguir serão detalhadas as suas especificidades:

Planos de Recursos Hídricos: são planos diretores de longo prazo e visam a fundamentar e orientar a implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos, com horizonte de planejamento compatível com o período de implantação de seus programas e projetos.

Enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água: estabelece o nível de qualidade a ser alcançado ou mantido ao longo do tempo. Instrumento de planejamento, pois deve tomar como base os níveis de qualidade que deveriam possuir ou ser mantidos.

Cobrança pelo uso de recursos hídricos: tem como objetivo estimular o uso racional da água e gerar recursos financeiros para investimentos na recuperação e preservação dos mananciais das bacias. A cobrança não é um imposto, mas um preço condominial, fixado a partir de um pacto entre os usuários de água e o Comitê de Bacia, com o apoio técnico da Agência Nacional das Águas (ANA).

Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos: sistema de informações que visa reunir, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos no Brasil, atualizar permanentemente informações sobre disponibilidade e demanda de recursos hídricos e fornecer subsídios para elaboração de Planos de Recursos Hídricos (IBRAM, 2013).

Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos: tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos.

Vale destacar, que os instrumentos da PNRH se relacionam e se complementam visando a efetiva gestão dos recursos hídricos. A Figura 7 apresenta, de forma simplificada, a relação entre os instrumentos da Política de Recursos Hídricos.

Figura 7 - Relação entre os instrumentos da Política de Recursos Hídricos.



Fonte: Agência Nacional das Águas (2011).

Considerando que a atividade minerária tem especificidades de utilização e consumo de água passíveis de provocar alterações nos regimes de corpos hídricos, na quantidade e na qualidade da água existente, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) aprovou a Resolução nº 29, de 11 de dezembro de 2002, que em seu art. 2º, onde relaciona os usos e as interferências nos recursos hídricos, pela mineração, sujeitos à outorga, destacados aqui:

- I. a derivação ou captação de água superficial ou extração de água subterrânea para consumo final ou insumo do processo produtivo;
- II. o lançamento de efluentes em corpos de água;
- III. outros usos e interferências, tais como:
 - captação de água subterrânea com a finalidade de rebaixamento de nível de água;
 - desvio, retificação e canalização de cursos de água necessários às atividades de pesquisa e lavra;

- barramento para decantação e contenção de finos em corpos de água;
- barramento para regularização de nível e vazão;
- sistema de disposição de estéril e rejeitos;
- aproveitamento de bens minerais em corpo de água;
- e captação de água e lançamento de efluentes relativos ao transporte de produtos minerais.

A outorga é assim um instrumento de controle que avalia a real condição da bacia hidrográfica em termos de potencial hídrico. É por meio do cadastro dos usos outorgados que se torna possível conhecer a capacidade de suporte da bacia para o desenvolvimento desejado. Desse modo, esse instrumento é básico na elaboração do Plano de Recursos Hídricos, pois dá suporte às proposições de enquadramento, além de apoiar a discussão dos termos em que se dará a cobrança pelo uso da água (ANA, 2006).

A mineração, em qualquer de suas formas ou qualquer que seja seu objeto, mesmo ao considerar a sua característica mais típica, que é a rigidez locacional, desenvolve-se sempre no âmbito de uma bacia hidrográfica, unidade territorial para a implementação da PNRH, um dos fundamentos da Lei nº 9.433, de 1997. Portanto, estará sempre sujeita à regulação relativa às águas, sejam elas superficiais ou subterrâneas, na medida do uso de recursos hídricos concernente à atividade instalada e ao âmbito – federal ou estadual – ao qual pertencem. De qualquer modo, a mineração estará sempre vinculada às diretrizes e aos instrumentos definidos na Lei das Águas ou em suas correspondentes estaduais, portanto estará estreitamente vinculada ao uso de recursos hídricos (ANA, 2006).

3.1.5. Os Recursos Hídricos na Mineração

Para a avaliação dos impactos gerados pela mineração nos recursos hídricos torna-se necessário abordar a interface água/ mineração, isto é, como a água é utilizada em seu processo produtivo. Assim, é preciso definir a atividade minerária, entender o seu processo produtivo, bem como os potenciais impactos gerados no meio ambiente.

A mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extraír, tratar, beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los recursos econômicos e sociais. Em termos de classificação da cadeia produtiva, o setor mineral compreende as etapas de pesquisa, mineração e transformação mineral

(metalurgia e não metálicos). A pesquisa mineral é a fase que objetiva descobrir e estudar em detalhe as jazidas que apresentem viabilidade técnica, econômica e ambiental, sendo sucedida pelos estágios de desenvolvimento e de produção da mina. A mineração é a fase de exploração da lavra em que se produzirá a matéria-prima mineral. Já o segmento da transformação mineral é o elo da cadeia mineral que faz a interface com o setor secundário da economia, agregando valor e gerando emprego a partir da mineração (CNI e IBRAM, 2017).

A operação na mineração está condicionada à interação com os recursos naturais e a disponibilidade destes. Em grande parte dos processos de produção, a água é utilizada como insumo. Sendo assim, os recursos hídricos são vitais para a atividade da mineração. Deve-se ressaltar que o sucesso da atividade minerária depende, em grande parte, da resolução adequada de suas interações com a água (ANA, 2006). Portanto, são cada vez mais proeminentes ações que visam à minimização e o uso racional destes insumos, de modo a garantir a sustentabilidade da cadeia da mineração (CNI e IBRAM, 2017).

O contexto hidrológico no qual se localiza o minério é importante para determinar a eficiência, e a viabilidade técnica e econômica de uma lavra, tendo em vista a rigidez locacional da atividade minerária. As empresas de mineração devem planejar o uso do recurso, desde a fase de pesquisa até a de pós-fechamento. A utilização da água não se limita apenas ao processo de lavra, como também se estende para as atividades de beneficiamento e transporte dos minérios, nas quais a disponibilidade dos recursos hídricos tem um papel fundamental para a produção e viabilidade do processo (IBRAM, 2013).

Observa-se, portanto, que a disponibilidade de água é crucial para a mineração. O seu gerenciamento envolve componentes multidisciplinares visto que necessita atender a diferentes objetivos, sejam econômicos, ambientais ou sociais. A engenharia de recursos hídricos busca adequar a disponibilidade e a necessidade de água em termos de espaço, tempo, quantidade e qualidade. O Quadro 1 apresenta alguns exemplos dos usos da água na mineração (IBRAM, 2013).

Quadro 1 - Interações da água em processos de mineração.

Processo	Utilização da Água
Lavra	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desmonte hidráulico ▪ Aspersão de pistas e praças para controle de emissão de poeira ▪ Lavagem de materiais
Barragens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ As barragens de contenção de sedimentos: estruturas construídas com o objetivos de conter sedimentos carreados em períodos de chuva, garantindo a qualidade do efluente final. ▪ As barragens de rejeitos: bacia de acumulação dos rejeitos gerados nas instalações de beneficiamento de minério e a acumulação da água a ser reutilizada no processos industrial.
Pilhas de estéril	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pilhas de estéril podem causar interferência do escoamento superficial, que pode vir a gerar, dependendo do tamanho e da forma, pequenos desvios de água.
Rebaixamento do nível de água subterrânea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exploração das águas subterrâneas para viabilização da lavra a céu aberto ou subterrânea.
Processamento mineral	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Processo de flotação - processo físico-químico de superfície, usado na separação de minerais, que dá origem à formação de um agregado, partícula mineral e bolha de ar, o qual, em meio aquoso, flutua sob a forma de espuma. A composição química da água constitui um parâmetro de controle da flotação. ▪ Processo de lavagem - etapas do tratamento de minérios que demandam utilização de elevados volumes de água para limpeza do minério. ▪ Concentração gravítica - processo de separação que utiliza a proporção sólido/água para análise detalhada do balanço de água, bem como da densidade ótima de polpa para cada operação. ▪ Processos hidrometalúrgicos - processos onde há reações de dissolução do metal de interesse em meio ácido ou a dissolução em meio alcalino.
Água como meio de transporte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A água é o meio de transporte mais utilizado no processo mineral. Assim, é usado de forma intensa como meio de transporte nas mais variadas operações, tais como: na lavra como desmonte hidráulico; na lavagem de minérios e nos processos de concentração a úmido.

Fonte: Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2013).

Além de conhecer a interação da água na mineração, torna-se relevante compreender a origem da água utilizadas no processo, visto que estes locais apresentam grande potencial de serem impactados pela atividade minerária. A origem do abastecimento consiste, basicamente, em fontes subterrâneas, águas superficiais e as chamadas águas de reciclagem. Adicionalmente, a água proveniente das bacias de rejeitos, dos espessadores, das operações de filtragem, entre outros, é reciclada nas usinas de concentração, o que contribui para diminuir o consumo desse processo (ANA, 2006).

Face ao exposto, não há dúvidas sobre a importância do uso dos recursos hídricos na atividade minerária, que em alguma etapa de seu processo produtivo irá interagir com este recurso, seja por demanda ou por necessidade de bombeamento da água subterrânea que aflora das cavas de mineração e que, será destinada ao corpo de água mais próximo ou armazenada em cavas ou estruturas de contenção (ANA, 2006).

No entanto, a atividade da mineração causa inúmeras alterações físicas na paisagem que geram diversos problemas ambientais decorrentes de suas atividades tais como aberturas das cavas, supressão da vegetação, fragmentação dos ecossistemas, disposição de material estéril proveniente do decapeamento superficial e disposição de rejeitos decorrentes dos processos de tratamento ou beneficiamento. Assim o setor de mineração está diretamente atrelado às mudanças no uso do solo e ao uso dos recursos naturais, dentre eles os recursos hídricos, impactando-os, principalmente no que concerne à poluição das águas e à degradação de áreas sob exploração mineral (CNI e IBRAM, 2017; ANA, 2006). Desta forma, a mineração pode ser caracterizada como uma atividade potencialmente poluidora, causadora de danos ambientais, algumas vezes irreversíveis, o que cria a necessidade da avaliação de seus impactos ambientais.

3.2. AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

3.2.1. Aspectos Legais, Objetivos e Etapas da Avaliação de Impacto Ambiental

A Política Nacional de Meio Ambiente criada a partir da Lei Federal nº 6.938, em 1981, foi a primeira lei federal a abordar o meio ambiente como um todo e fixou princípios, objetivos e instrumentos de gestão ambiental. Dentre os quais destaca-se a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA). No entanto, foi somente em 23 de janeiro de 1986, por meio da Resolução CONAMA 001/86, quando ficaram estabelecidos os

critérios técnicos e as diretrizes gerais de elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente, que a AIA passou efetivamente a ser conduzida em todos os Estados da Federação. Posteriormente, a Resolução CONAMA 237/1997 estabeleceu os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental, de forma a efetivar a utilização do sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental, instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente.

Atualmente, o termo “avaliação de impacto ambiental” tem múltiplos sentidos. Designa diferentes metodologias, procedimentos ou ferramentas empregados por agentes públicos e privados no campo do planejamento e gestão ambiental, sendo usado para descrever os impactos ambientais decorrentes de projetos de engenharia, de obras ou atividades humanas quaisquer, incluindo tanto os impactos causados pelos processos produtivos quanto aqueles decorrentes dos produtos desta atividade. É usado para descrever os impactos que podem advir de um determinado empreendimento a ser implantado, assim como para designar o estudo dos impactos que ocorreram no passado ou estão ocorrendo no presente (SÁNCHEZ, 2008).

Assim, é comum encontrar-se, sob a denominação de avaliação de impacto ambiental, atividades tão diferentes como: (i) previsão dos impactos potenciais que um projeto de engenharia poderá vir a causar, caso venha a ser implantado; atualmente, essa modalidade da avaliação de impacto ambiental divide-se em ramos específicos, como avaliação de impacto social, de impactos sobre a saúde humana e outros; (ii) identificação das consequências futuras de planos e programas de desenvolvimento socioeconômico ou de políticas governamentais (modalidade conhecida como avaliação ambiental estratégica); (iii) estudo das alterações ambientais ocorridas em uma determinada região ou determinado local, decorrentes de atividade individual ou de uma série de atividades humanas, passadas ou presentes (nesta acepção, a avaliação de impacto ambiental também é chamada de avaliação de dano ambiental ou avaliação do passivo ambiental, uma vez que se preocupa com os impactos ambientais negativos); (iv) identificação e interpretação de aspectos e impactos ambientais decorrentes das atividades de uma organização, nos termos das normas técnicas da série ISO 14.000; (v) análise dos impactos ambientais decorrentes do processo de produção, da utilização e do descarte de

um determinado produto (esta forma particular de avaliação de impacto ambiental é também chamada de análise de ciclo de vida) (SÁNCHEZ, 2008).

Para a compreensão dos objetivos e propósitos do processo de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) torna-se oportuno apresentar o conceito de impacto ambiental. Segundo SÁNCHEZ (2008) impacto ambiental consiste na alteração da qualidade ambiental resultado da modificação de processos naturais ou sociais provocada pela ação humana, tal alteração pode ser benéfica ou adversa. O autor aponta as principais implicações de ações humanas que podem causar impactos ambientais, são elas:

1. *Supressão de certos elementos do ambiente*, a exemplo de: supressão de componentes do ecossistema, como a vegetação; de elementos significativos do ambiente construído; de referências físicas à memória, como locais sagrados, cemitérios, pontos de encontro de membros de uma comunidade; e de elementos ou componentes valorizados do ambiente (por exemplo cavernas, paisagens notáveis); destruição completa de habitats (por exemplo, aterrramento de um mangue); e de componentes físicos da paisagem.
2. *Inserção de certos elementos no ambiente*, tais como: espécies exóticas e de ambientes construídos (barragens, rodovias, edifícios, áreas urbanizadas).
3. *Sobrecarga*, ou seja, introdução de fatores de estresse além da capacidade de suporte do meio, gerando desequilíbrio, a exemplo de: poluentes; introdução de espécies exóticas; redução do habitat ou da disponibilidade de recursos para uma dada espécie; e aumento da demanda por bens e serviços públicos.

Vale mencionar, que toda intervenção ou projeto gerará impactos, benéficos e/ou adversos em um ambiente. Todavia, nem toda intervenção ou projeto exigirá um estudo prévio de impacto ambiental. Claramente, uma padaria e uma usina eletrônica não têm o mesmo potencial de causar impactos ambientais. O conceito-chave aqui é o de *impacto significativo*. A primeira tem o potencial de causar impactos ambientais sim, porém não significativos. Enquanto uma usina eletrônica tem o potencial de causar impactos significativos.

Para SÁNCHEZ (2008) o potencial que determinada obra ou ação humana tem de causar alterações ambientais depende de duas ordens de fatores:

- as solicitações impostas ao meio pela ação ou projeto, ou seja, a sobrecarga imposta ao ecossistema, representada pela emissão de poluentes, supressão ou adição de elementos ao meio;
- a vulnerabilidade do meio, isto é, o inverso da resiliência, que por sua vez dependerá do estado de conservação do ambiente e das solicitações impostas anteriormente e cujos efeitos se acumularam; ou a importância do ambiente ou do ecossistema.

Assim, o potencial de impacto ambiental resulta de uma combinação entre a solicitação (característica inerente ao projeto e seus processos tecnológicos) e a vulnerabilidade do meio. Tal combinação se dá em uma relação direta, ou seja, quanto maior a solicitação e maior a vulnerabilidade, maior o potencial de impactos. Inversamente, quanto maior a solicitação e maior a resiliência do ambiente, menor o potencial de impactos. Não é o potencial de impacto que é inerente ao projeto e sim a solicitação ou pressão que ele pode exercer sobre os recursos ambientais.

Em termos práticos, a solicitação potencial que um empreendimento pode impor ao meio (e, por consequência, sua capacidade de causar impactos) depende não somente de suas características técnicas intrínsecas, mas também largamente da capacidade gerencial da organização responsável pelo projeto. É indiscutível que dois projetos idênticos, se realizados por duas empresas com culturas organizacionais diferentes, podem resultar em impactos ambientais muito diferentes.

Deste modo, pode-se considerar impacto ambiental significativo algo irreversível, permanente, e que afeta potencialmente toda a população do planeta, presente e futura. Um projeto de tamanhas implicações requer uma detalhada análise de suas consequências e ampla discussão pública. É justamente esse o objetivo da avaliação de impacto ambiental, e é nesses casos que se torna necessário empregar o chamado processo completo de avaliação de impacto ambiental, incluindo a preparação de um estudo de impacto ambiental, sua publicidade, a realização de audiências públicas e a análise técnica criteriosa dos estudos apresentados (SÁNCHEZ, 2008).

Nessa ótica, conforme Sánchez (2008) o processo de avaliação de impacto ambiental, consiste, basicamente, em três etapas, a citar: *Inicial, Análise Detalhada e Pós-Aprovação*, as quais serão apresentadas a seguir.

- *Etapa Inicial*: apresentação da proposta (projeto, programa ou política) e triagem. A triagem objetiva selecionar, dentre as inúmeras ações humanas, aquelas que tenham potencial de causar alterações ambientais significativas. A triagem resulta em um enquadramento do projeto, em três categorias: (i) são necessários estudos aprofundados; (ii) não são necessários estudos aprofundados; (iii) há dúvidas sobre o potencial de causar impactos significativos ou sobre as medidas de controle.
- *Análise Detalhada*:
 - (i) Determinação do escopo do Estudo de Impacto Ambiental (EIA): consiste em determinar a abrangência e a profundidade dos estudos a serem feitos, nos casos em que se mostra necessária a realização do EIA. A abrangência e profundidade do EIA dependerá dos impactos de cada empreendimento.
 - (ii) Elaboração do EIA: essa é a atividade central do processo de avaliação de impacto ambiental, a que normalmente consome mais tempo e recursos e estabelece as bases para a análise da viabilidade ambiental do empreendimento. O estudo deve ser preparado por equipe multidisciplinar, visando levantar a extensão e intensidade dos impactos ambientais, e se necessário, propor, modificações no projeto de forma a reduzir ou, se possível, eliminar os impactos negativos. Posteriormente, a elaboração do EIA, deve-se preparar o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), que caracteriza-se como um resumo do EIA em linguagem simplificada, cujo objetivo é comunicar as principais características do empreendimento e seus impactos a todos os interessados.
 - (iii) Análise técnica do EIA: é executado por uma terceira parte, em geral equipe técnica do órgão governamental responsável por aprovar o empreendimento; ou equipe da instituição financeira à qual foi solicitado empréstimo. O objetivo consiste em verificar a conformidade do EIA aos termos de referência

e a regulamentação ou procedimentos aplicáveis. Assim como, averiguar se o estudo descreve adequadamente o projeto proposto e se analisa devidamente seus impactos e propõe medidas mitigadoras capazes de atenuar suficientemente os impactos negativos. Vale destacar, que as manifestações expressas na consulta pública podem ser consideradas na análise.

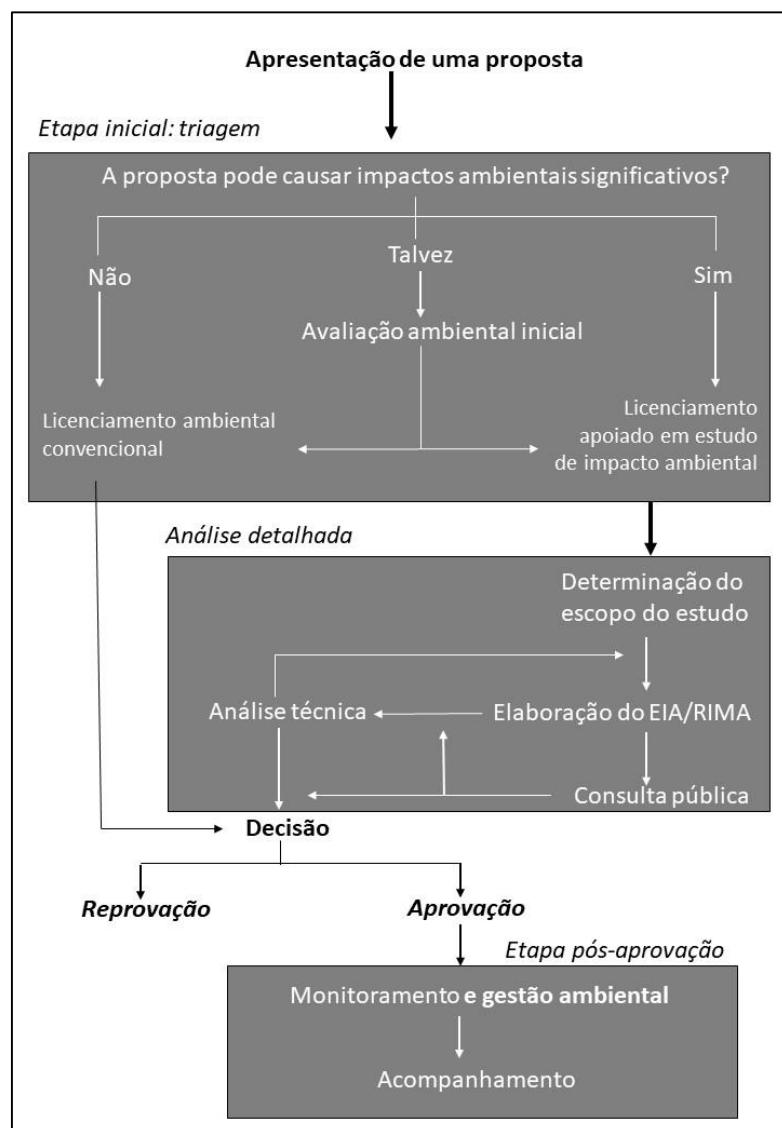
- (iv) Consulta Pública: comprehende os mecanismos formais de consulta aos interessados. Entre os procedimentos mais conhecidos, cita-se a audiência pública. Este tipo de consulta pode ocorrer em diferentes momentos do processo, tais como na preparação dos termos de referência, etapa que leva à decisão sobre a necessidade de realização do EIA, durante a realização do EIA e após a sua conclusão, que consiste na melhor etapa para realizar a consulta pública, visto que haverá o quadro mais completo possível sobre as implicações da decisão a ser tomada.
 - (v) Decisão: a decisão final pode caber: à autoridade ambiental; ao governo; e a um conselho (subordinado à autoridade ambiental) com a participação da sociedade civil. Três tipos de decisão são possíveis: não autorizar o empreendimento; aprová-lo incondicionalmente; ou aprová-lo com condições, situação em que podem ser solicitadas modificações ou complementações dos estudos apresentados.
- *Pós-aprovação*: no caso da decisão ter sido favorável à implantação do empreendimento deverá ocorrer o **monitoramento e a gestão ambiental** durante todas as suas fases de funcionamento (operação, desativação e fechamento) visando a reduzir, eliminar ou compensar os impactos negativos, ou potencializar os positivos. Além de permitir a confirmação ou não das previsões feitas no EIA e a verificação do atendimento aos requisitos legais, e, por conseguinte alertar para a necessidade de aplicando medidas corretivas. O **acompanhamento** agrupa o conjunto de atividades que se seguem à decisão de autorizar a implantação do empreendimento, onde inclui a fiscalização, a supervisão, a auditoria e o monitoramento. A supervisão é realizada pelo empreendedor e tem a função de assegurar que as condições expressas na autorização (licenças ambientais) sejam efetivamente cumpridas. A fiscalização é

exercida pelos agentes governamentais, enquanto a auditoria pode ter caráter público ou privado.

Por fim, cabe ressaltar a grande quantidade de documentos envolvidos em todo este processo, o que permite inferir o longo tempo necessário até a obtenção da licença ambiental, bem como os custos significativos para o empreendedor e para o agente público gestor do processo.

A Figura 8 apresenta de forma sucinta todo o processo de avaliação de impacto ambiental.

Figura 8 - Processo de avaliação de impacto ambiental.



Fonte: SÁNCHEZ (2008).

3.2.2. Etapas do planejamento e da elaboração de um Estudo de Impacto Ambiental (EIA)

O estudo de impacto ambiental (EIA) é um dos documentos mais importantes de todo o processo de avaliação de impacto ambiental. Como visto anteriormente, este tipo de estudo é necessário em casos de empreendimentos que apresentem a possibilidade de causar impactos significativos. Adicionalmente, o art. 2º da Resolução CONAMA 001/86 estabelece as principais atividades que deverão elaborar o EIA/RIMA a serem submetidos ao órgão ambiental competente como uma das etapas do licenciamento ambiental do empreendimento, dentre as atividades que devem apresentar o estudo, destaca-se a mineração, apontada no inciso IX, do mesmo parágrafo, descrita como – “*Extração de minério, inclusive os da classe II, definidas no Código de Mineração*”. Ainda a Resolução CONAMA 237/1997, no Anexo 1, destaca a mineração como umas das atividades sujeitas ao licenciamento ambiental, especificando as principais atividades que deverão ser submetidas a tal processo: pesquisa mineral com guia de utilização; lavra a céu aberto, inclusive de aluvião, com ou sem beneficiamento; lavra subterrânea com ou sem beneficiamento; lavra garimpeira; e perfuração de poços e produção de petróleo e gás natural.

A Resolução CONAMA 001/86, além de definir as atividades que devem elaborar o EIA/RIMA, estabelece no parágrafo 6º o conteúdo mínimo de um EIA, o qual deverá compreender:

I - Diagnóstico ambiental da área de influência do projeto contendo completa descrição e análise dos recursos ambientais e suas interações, de modo a caracterizar a situação ambiental da área, antes da implantação do projeto, considerando:

- a) **o meio físico** - o subsolo, as águas, o ar e o clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos d'água, o regime hidrológico, as correntes marinhas, as correntes atmosféricas;
- b) **o meio biológico e os ecossistemas naturais** - a fauna e a flora, destacando as espécies indicadoras da qualidade ambiental, de valor científico e econômico, raras e ameaçadas de extinção e as áreas de preservação permanente;

c) **o meio socioeconômico** - o uso e ocupação do solo, os usos da água e a sócio-economia, destacando os sítios e monumentos arqueológicos, históricos e culturais da comunidade, as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e a potencial utilização futura desses recursos.

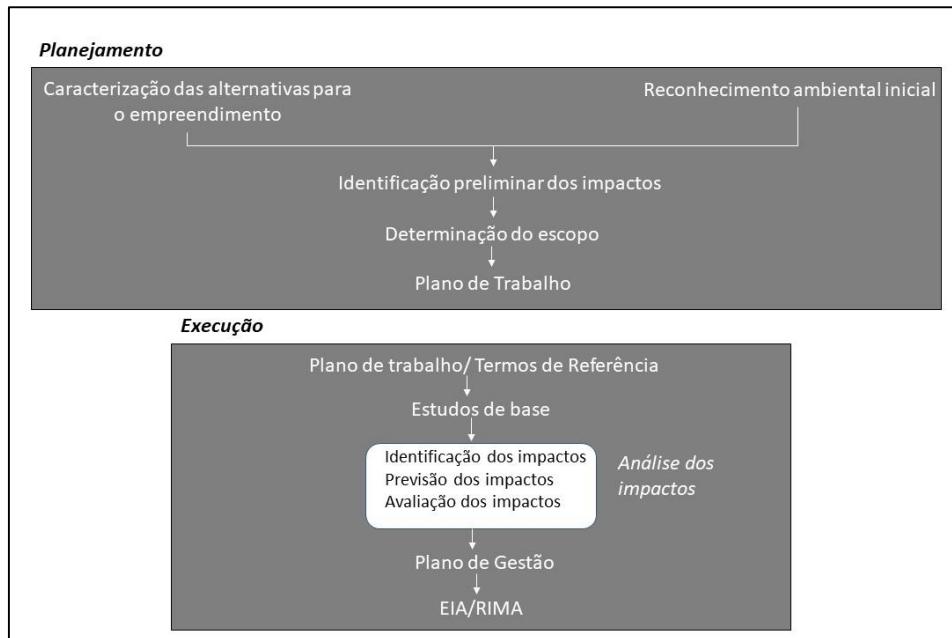
II - Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazos, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade; suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais.

III - Definição das medidas mitigadoras dos impactos negativos, entre elas os equipamentos de controle e sistemas de tratamento de despejos, avaliando a eficiência de cada uma delas.

IV - Elaboração do programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos positivos e negativos, indicando os fatores e parâmetros a serem considerados.

Assim o planejamento e a execução de um EIA deve basear-se nesta regulamentação, visando atender aos requisitos básicos para realizar a avaliação ambiental de determinado projeto que apresente potencial de gerar impactos significativos. Face ao exposto, SÁNCHEZ (2008) estabeleceu as principais etapas do planejamento e execução de um estudo de impacto ambiental, as quais devem obedecer uma sequência lógica, onde cada uma depende dos resultados da etapa anterior. Desta forma, ressalta-se que a sua concatenação e sequência são muito importantes, visto que o modo de iniciar e conduzir um estudo ambiental afetará a qualidade do resultado final. Segundo o autor são sete as atividades básicas na preparação de um estudo de impacto ambiental (Figura 9).

Figura 9 - Principais etapas do planejamento e execução de um estudo de impacto ambiental.



Fonte: SÁNCHEZ (2008).

Cabe destacar aqui duas etapas centrais na execução de um EIA – os estudos de base (diagnóstico ambiental) e a análise dos impactos, as quais serão detalhadas a seguir.

O objetivo principal dos **estudos de base, ou diagnóstico ambiental**, de um EIA consistem em fornecer informações às fases seguintes do estudo, tais como a identificação, previsão e avaliação dos impactos; programas de gestão ambiental (medidas mitigadoras, compensatórias, programas de monitoramento, etc.); além de estabelecer uma base de dados para futura comparação com a real situação, caso o projeto seja implementado. Para isso deverão ser realizados levantamentos acerca dos componentes e processos selecionados do meio ambiente que podem ser afetados pela proposta em análise, isso poderá ocorrer por meio de informações primárias ou secundárias. Como resultado um estudo de base deverá permitir previsões cientificamente fundamentadas sobre a provável situação futura da área de influência do empreendimento (SÁNCHEZ, 2008).

Em suma, o diagnóstico deverá fazer uma síntese da situação atual do ambiente nessa área, ou seja, indicar seu estado; analisar as principais forças e tendências que contribuem para a degradação ambiental, isto é, apontar as pressões a quais este meio sofre; e por fim discutir as iniciativas para reduzir ou reverter a degradação, em outras

palavras, fornecer uma resposta para os problemas ambientais encontrados. O diagnóstico representa, então, o caminho para compreender as potencialidades e as fragilidades da área de estudo, da evolução histórica de ocupação e das pressões do homem sobre os sistemas naturais. Também esclarece sobre os acertos e conflitos do uso da terra e os impactos passados, presentes e futuros. Nesta etapa torna-se importante considerar as variações temporais, espaciais e escalares, com o intuito de formar retratos da área que, comparados, somados e interpolados, ressaltam as principais características e fornecem indícios da dinâmica da região (SANTOS, 2004).

Diante da complexidade e da importância do diagnóstico ambiental para o EIA, esta etapa caracteriza-se como a mais cara e demorada. Para otimizar a elaboração desta fase do estudo, deve-se atentar para o tipo de informação que é realmente necessária, definindo claramente as escalas temporal e espacial, os métodos de coleta, as análises laboratoriais, os métodos de tratamento e interpretação dos dados. Outra questão importante aqui é a definição prévia da área de estudo, ou seja, a definição da área onde serão coletadas informações para realizar o diagnóstico ambiental. Vale mencionar que, neste momento não é possível a delimitação da área de influência do projeto, que consiste na área cuja qualidade ambiental sofrerá modificações direta ou indiretamente decorrentes do projeto. Esta não é conhecida na fase dos estudos, mas somente depois de analisados os impactos (e varia conforme os impactos afetem o ambiente físico, biótico ou antrópico) (SÁNCHEZ, 2008).

Com base no diagnóstico ambiental será feita a **análise dos impactos** do empreendimento, que é composta de três atividades distintas: *a identificação, a previsão e a avaliação*, que são definidas da seguinte forma (SÁNCHEZ, 2008):

- *Identificação de impactos*: é a descrição das consequências esperadas de um determinado empreendimento e dos mecanismos pelos quais se dão as relações de causa e efeito, a partir das ações modificadoras do meio ambiente que compõe tal empreendimento;
- *Previsão de impactos*: significa fazer hipóteses, técnica e científicamente fundamentadas, sobre a magnitude ou intensidade dos impactos ambientais;
- *Avaliação dos impactos*: informa sobre a importância ou significância dos impactos.

No Brasil, a Resolução Conama 01/86 estabelece que a análise dos impactos ambientais de um projeto e de suas alternativas, deve considerar os seguintes atributos:

- impactos positivos e negativos (benéficos e adversos);
- impactos diretos e indiretos;
- impactos imediatos, a médio ou longo prazo;
- impactos temporários ou permanentes;
- impactos reversíveis ou irreversíveis;
- propriedades cumulativas ou sinérgicas dos impactos;
- distribuição dos ônus e benefícios sociais decorrentes do empreendimento.

Todavia, esta regulamentação não confere nenhuma interpretação aos atributos estabelecidos. Deste modo, este trabalho adotará a seguinte interpretação dada por SÁNCHEZ (2008):

- *Expressão (positivo ou negativo)*: este atributo descreve o impacto como positivo ou negativo. Assim, alguns impactos podem ser positivos para um determinado componente ou elemento natural e negativos para outros.

Embora seja devido às consequências negativas que a lei exige a elaboração dos estudos ambientais, a possibilidade de ocorrerem impactos ambientais positivos é uma noção que deve ser bem assimilada. Um exemplo corriqueiro de impacto positivo é descrito como “criação de empregos”. Trata-se, como é evidente, de um impacto social econômico, campo em que é relativamente fácil compreender que possa haver impactos benéficos. Entretanto, há também impactos positivos sobre componentes físicos e bióticos do meio. Um projeto que envolva a coleta e o tratamento de esgotos resultará em melhoria da qualidade das águas, em recuperação do meio aquático e em efeitos benéficos sobre a saúde pública. Uma indústria que substitua uma caldeira a óleo pesado por uma caldeira a gás emitirá menos poluentes, como material particulado e óxidos de enxofre, ao mesmo tempo em que, caso venha a ser abastecida por um duto de gás, serão eliminadas as emissões dos caminhões de transporte de óleo e os incômodos causados pelo tráfego pesado.

No tocante aos impactos ambientais negativos, deve-se salientar o conceito de degradação ambiental. Tal conceito consiste em qualquer alteração adversa dos processos, funções ou componentes ambientais, ou da qualidade ambiental. O agente causador da degradação ambiental é sempre o ser humano, pois processos naturais não degradam ambientes, apenas causam mudanças. A degradação ambiental, portanto, é notadamente, um termo de conotação negativa, que está associada a perda ou deterioração da qualidade ambiental. Em outras palavras, a degradação ambiental corresponde a impacto ambiental negativo. Neste contexto, se o ambiente pode ser degradado de diversas maneiras, a expressão área degradada sintetiza os resultados da degradação do solo, da vegetação e da água (SÁNCHEZ, 2008).

- *Origem (direto ou indireto):* trata-se da causa ou fonte do impacto, direto ou indireto.

Diretos: decorrem das atividades ou ações realizadas pelo empreendedor, por empresas por ele contratadas ou que por ele possam ser controladas;

Indiretos: decorrem de um impacto direto (impactos de 2^a ou 3^a ordem). São mais difusos, se manifestam em áreas geográficas mais abrangentes e sofrem influência de outros fatores.

- *Escala temporal (immediatos, médio e longo prazos):*

Immediatos: ocorrem simultaneamente à ação que os gera;

Médio ou longo prazos: ocorrem com uma certa defasagem de tempo em relação à ação que os gera.

- *Duração (temporários ou permanentes):*

Temporários: só se manifestam durante uma ou mais fases do projeto, ou seja, acabam depois que cessa a ação que os causou;

Permanentes: alteração definitiva de um componente do meio ambiente, em outras palavras, apresenta duração indefinida.

- *Reversibilidade (reversível ou irreversível):*

Reversível: Capacidade do ambiente afetado de retornar ao seu estado anterior caso:

(i) cesse a solicitação externa; (ii) seja implantada uma ação corretiva;

Irreversível: ambiente afetado não retorna ao seu estado anterior. Ex.: extinção de uma espécie; alteração da topografia, uma vez que a recompor a conformação topográfica original de um local, na maioria dos casos, é algo economicamente inviável.

- *Cumulatividade e sinergismo*: referem-se, respectivamente, à possibilidade de os impactos se somarem ou se multiplicarem.

O caráter aditivo ou cumulativo dos impactos ambientais é bem mais comum que o sinérgico (SÁNCHEZ, 2008). Segundo Gonçalves, 2009 *apud* VALERA, 2012 os efeitos sinérgicos dizem respeito à alteração significativa na dinâmica ambiental a partir da acumulação de impactos locais provocados por mais de um empreendimento. Em sintonia com esta abordagem, Milaré, 2011 *apud* VALERA, 2012 esclarece que a “sinergia é o efeito ou força ou ação resultante da conjunção simultânea de dois ou mais fatores, de forma que o resultado é superior à ação dos fatores individualmente, sob as mesmas condições.

Por outro lado, Gonçalves, 2009 *apud* VALERA, 2012 caracteriza os impactos cumulativos como capazes de ensejarem alteração significativa na dinâmica ambiental a partir da acumulação de impactos locais, provocados por mais de um empreendimento. Neste mesmo sentido, SÁNCHEZ (2008) define os impactos cumulativos como aqueles que se acumulam no tempo ou no espaço, resultado de uma combinação de efeitos decorrentes de uma ou diversas ações. Uma série de impactos insignificantes pode resultar em significativa degradação ambiental se concentrados espacialmente ou caso de sucedam no tempo. Assim, o corte de vegetação ripária em uma pequena propriedade rural pode não ter efeitos mensuráveis sobre o ecossistema aquático, mas se essa vegetação for eliminada de toda uma bacia hidrográfica, não há dúvidas sobre seus efeitos deletérios. As consequências de esgotos de uma residência lançados in natura em um córrego podem não ser mensuráveis, porém se muitas residências procederem da mesma forma, certamente a qualidade das águas ficará sensivelmente degradada.

A consideração de impactos cumulativos pode ser crucial para bem fundamentar uma decisão em casos de projetos sujeitos à elaboração de estudos ambientais. Uma maneira prática de identificar impactos cumulativos é ordenar uma relação de projetos localizados dentro da área de abrangência do estudo para que possa identificar outras atividades ou projetos cujos impactos possam se acumular aos impactos do projeto em análise (SÁNCHEZ, 2008).

Em sintonia com esta abordagem Smith e Spaling, 1995 *apud* SÁNCHEZ, 2008 sugerem que os métodos de avaliação de impactos cumulativos geralmente sigam um modelo causal que consiste em três componentes:

- identificação de fontes de mudanças ambientais cumulativas, que podem ser distintos tipos de atividades;
- identificação dos caminhos ou processos de acumulação, considerando que mudanças ambientais acumulam-se no tempo e no espaço de modo aditivo ou interativo;
- desenvolvimento de uma tipologia de efeitos cumulativos, considerando que as mudanças podem ser diferenciadas, em geral de acordo com atributos temporais e espaciais.

Diante do exposto, pode-se afirmar que o estudo de impacto ambiental é o mais completo e profundo estudo previsto em nosso quadro legal. O EIA deverá, obrigatoriamente, contemplar a análise da viabilidade ambiental do empreendimento em questão, no caso do presente trabalho o empreendimento minerário. Assim, todas as estruturas principais e secundárias integrantes do complexo minerário devem ter a viabilidade de sua instalação atestada na fase da licença prévia. Sendo assim, a avaliação de impactos ambientais deve ocorrer em regra antes da concessão da licença prévia, já que é por meio desse instrumento que serão identificados os aspectos positivos e negativos da atividade a ser licenciada, devendo ser determinadas as condicionantes na forma de medidas mitigadoras ou de medidas compensatórias. Neste contexto, a avaliação de impactos ambientais deve ser entendida como um requisito para a concessão da licença prévia (BARREIRO, 2012).

No entanto, apesar da importância e da complexidade do EIA, como parte do processo de avaliação de impacto ambiental. Este tipo de estudo é alvo de críticas, em decorrência das fragilidades e deficiências relacionadas às falhas operacionais e técnicas do órgão público e às deficiências de elaboração do próprio estudo, onde vários elementos não são avaliados, ou se avaliados, são estudados de forma insuficiente (ROMACHELI, 2009). Por esse motivo, o próximo tópico discutirá as principais fragilidades do processo de Avaliação de Impactos Ambientais, no que concerne às deficiências dos EIA's/RIMA's no Brasil.

3.2.3. Fragilidades da Avaliação de Impactos Ambientais (AIA)

Em geral, a AIA ainda possui fragilidades em diversos países, principalmente pelo uso dessa ferramenta apenas para obtenção de uma certificação ambiental e não como um meio a proteção do ambiente e desenvolvimento sustentável (MORAES & D'AQUINO, 2016). Isto, portanto, reflete notadamente na qualidade dos estudos de impacto ambiental apresentados.

Neste âmbito, o Ministério Público Federal (2004) apontou os problemas mais frequentes ou mais graves em estudos de impacto ambiental no Brasil, resumidos a seguir:

- desconexão entre o diagnóstico ambiental, a análise de impactos e as propostas de mitigação;
- ausência de proposição de alternativas;
- desconsideração da bacia hidrográfica na delimitação da área de influência dos empreendimentos;
- ausência de investigação de séries históricas e ciclos anuais;
- caracterização da área baseada, predominantemente, em dados secundários;
- ausência ou insuficiência de informações sobre a metodologia utilizada;
- proposição de execução de atividades de diagnóstico em etapas do licenciamento posteriores à Licença Prévia;
- apresentação de informações inexatas, imprecisas e/ou contraditórias, como nos casos que citam espécies reconhecidamente inexistentes na região;

- caracterização incompleta de águas, sedimentos, solos, resíduos, ar etc.;
- superficialidade ou ausência de análise de eventos singulares em projetos envolvendo recursos hídricos;
- ausência de estudos orientados pela ampla acepção do conceito de patrimônio cultural;
- tendência a minimização ou subestimação dos impactos negativos e à supervalorização dos impactos positivos, entre outros.

Outra falha comumente encontrada nos EIA's consiste no fato de que, embora, o art. 6º, III, da Resolução CONAMA nº 01/86 estabeleça que estes documentos devam analisar os impactos ambientais, através de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando suas propriedades cumulativas e sinérgicas, isto não ocorre de fato. A necessidade de avaliação cumulativa e sinérgica vêm sendo desconsiderada, pois os tradicionais EIAs e RIMAs limitam-se a apresentar a análise da área de propriedade do empreendedor e, quando muito, das denominadas Áreas de Influências Direta e Indireta. Pode-se constatar um completo descaso, por exemplo, na análise de outras atividades ou mesmo de outros empreendimentos que possuam a mesma finalidade. Ademais, o exame de processos administrativos de licenciamento permite-nos afirmar que cada empreendimento, embora locado em uma bacia hidrográfica ou até na mesma microbacia hidrográfica, chega a apresentar estudos distintos e, não raras vezes, discrepantes, denotando que a análise cumulativa e sinérgica nem sequer foi cogitada. Contudo, observa-se, a necessidade de aprimoramento dos procedimentos dos estudos ambientais e a necessidade de se precisar em qual local ou, mais exatamente, em qual unidade territorial citados estudos devem se desenvolver (VALERA, 2012).

Tratando-se de atividades e empreendimentos com alto potencial degradador/poluidor, como a mineração, é notório que a apresentação dos tradicionais EIAs/RIMAs, por si só, não tem a capacidade de prever os impactos cumulativos e sinérgicos, principalmente, no Estado de Minas Gerais, que concentra grande parte da atividade minerária do país, na região do Quadrilátero Ferrífero. Neste sentido, torna-se necessário que não somente o empreendimento a ser licenciado seja considerado, mas

sim, toda a cadeia produtiva que exista ou possa vir a existir naquele ecossistema (VALERA, 2012).

Nesta ótica, Valera (2012) destaca a Avaliação Ambiental Integrada (AAI) como o estudo capaz de conhecer especificamente os efeitos sinérgicos e cumulativos resultantes dos impactos ambientais ocasionados pelo conjunto de empreendimentos em planejamento, implantação e operação em uma determinada área. Desta forma, o autor visando a utilização das mais atuais e melhores técnicas de avaliação ensejando a deliberação isenta e eficaz sobre a viabilidade ou não do empreendimento proposto, salienta a importância dos empreendimentos minerários, que causem ou possam causar significativo impacto ambiental, se submetam à apresentação de Avaliação Ambiental Integrada (AAI), utilizando-se como unidade de gestão ambiental, no mínimo, a bacia hidrográfica, incluindo a Avaliação Ambiental Integrada (AAI) (VALERA, 2012).

Todavia, é sabido que a apresentação de Avaliação Ambiental Integrada (AAI) para todos os empreendimentos minerários ainda não é uma realidade. No entanto, há de se pensar em novos métodos e procedimentos que preencham as lacunas dos atuais EIA's, de forma a promover o entendimento e a análise das transformações ocorridas no ambiente, possibilitando identificar o estado de degradação e avaliar alternativas de desenvolvimento sustentável, que diferem da abordagem setorial e fragmentada tradicional.

Neste sentido, uma quantidade significativa de pesquisa tem sido feita para desenvolver técnicas de sensoriamento remoto que possam obter informações que auxiliem na detecção e avaliação de impactos ambientais causados pela atividade minerária, a fim de propor ações e medidas que otimizem a análise sistêmica e integrada dos impactos ambientais. (ZHANG et. al., 2011; LATIFOVIC et. al., 2004; CARDOZO, PIMENTA & RIBEIRO, 2004; ROUDGARMI, 2008; VOROVENCII, 2011).

4. METODOLOGIA

4.1. MÉTODO DE ABORDAGEM

O presente estudo de caso consiste em uma pesquisa qualitativa que visa analisar as transformações que ocorreram nos recursos hídricos do município de Nova Lima, Minas Gerais decorrente da atividade minerária baseado na monitoria de transformações

espaciais de diferentes épocas, por meio da interpretação de imagens *Landsat*, e séries históricas de dados de vazão.

A pesquisa fundamentou-se em dados secundários provenientes de imagens multitemporais do satélite *Landsat* disponíveis pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS – e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE - da área em estudo para os anos de 1987, 1997, 2007 e 2017; e dados da série histórica de vazão obtidos no sistema de informações hidrológicas da Agência Nacional das Águas - ANA.

As principais variáveis analisadas foram as áreas diretamente afetada pela mineração e a vazão média. Desta forma, a análise deu-se de forma quantitativa, em que mensurou-se as relações entre as variáveis e apresentou-se os resultados colocando em evidência as similaridades e divergências entre os dados analisados, baseado-se em uma análise crítica dos dados secundários.

Nas seções seguintes serão apresentadas a descrição dos procedimentos e técnicas utilizadas na pesquisa, onde destaca-se os fundamentos e as aplicações do sensoriamento remoto do ambiente e a análise estatística dos dados hidrológicos.

4.2 SENSORIAMENTO REMOTO DO AMBIENTE

4.2.1. Fundamentos do Sensoriamento Remoto

Em termos práticos, Jensen (2009) caracteriza o sensoriamento remoto como o registro da informação das regiões do ultravioleta, visível, infravermelho e micro-ondas do espectro eletromagnético, sem contato, por meio de instrumentos tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos lineares e/ou matriciais localizados em plataformas tais como aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento digital de imagens. De forma complementar, o autor designa o sensoriamento remoto como uma ferramenta ou técnica similar à matemática, a qual utiliza-se de uso de sofisticados sensores para medir a quantidade de energia eletromagnética que emana de um objeto ou área geográfica à distância. Para, sequencialmente, extrair as informações importantes dos dados utilizando-se de algoritmos baseados em matemática e estatística. Nestas condições, o sensoriamento

remoto funciona muito bem com outras ciências da informação geográfica, incluindo a cartografia e sistemas de informações geográficas.

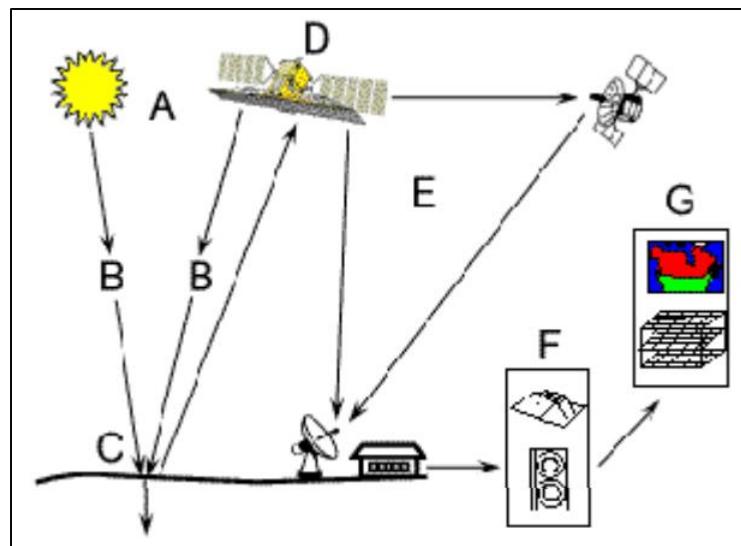
Florenzano (2011) endossa essa concepção definindo o sensoriamento remoto como a tecnologia que permite obter imagens – e outros tipos de dados - da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. A autora ainda classifica separadamente cada um dos termos, referindo ao termo *sensoriamento* com a obtenção de dados por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões e aeronaves) e orbitais (satélites artificiais). Enquanto o termo *remoto*, que significa distante, é utilizado visto que a obtenção é feita à distância, ou seja, sem o contato físico entre o sensor e objetos na superfície terrestre.

Em consonância com esta abordagem, Souza (2010) ressalta que sensoriamento remoto significa observar o nosso planeta usando sensores muito acima do solo. Ele classifica os sensores como câmeras que “enxergam” não somente a luz visível, mas também a radiação em outros comprimentos de onda como o infravermelho e as microondas, por exemplo. Por este motivo o sensoriamento remoto é conhecido hoje também pelo termo “*Observação da Terra*” sendo feito, comumente, por satélites.

Observa-se, portanto, que o sensoriamento remoto só é possível devido a interação da energia eletromagnética com a superfície terrestre. A quantidade e a qualidade da energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres resultam das interações entre a energia e estes objetos. Essas interações são determinadas pelas propriedades físiocoquímicas e biológicas dos alvos e podem ser identificadas nas imagens e nos dados de sensores remotos. Desta forma, a energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação, pois ela permite quantificar a energia espectral refletida e/ou emitida por estes, e assim avaliar suas principais características. Logo os sensores remotos são ferramentas indispensáveis para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais (MORAES, 2002).

Com base nesta premissa, Souza (2010) ressalta sete elementos fundamentais no processo de coleta da informação a partir do sensoriamento remoto, os quais são ilustrados na Figura 10.

Figura 10 – Elementos fundamentais no processo de coleta da informação a partir do sensoriamento remoto.



Fonte: Souza (2010).

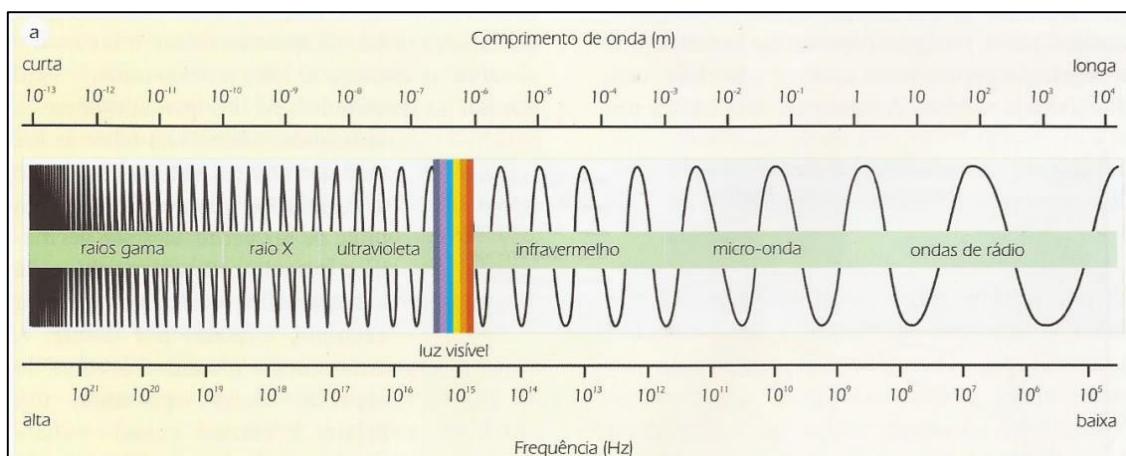
- (A) Fonte de energia ou iluminação
- (B) Radiação eletromagnética e atmosfera
- (C) Interação com o alvo
- (D) Registro da energia pelo sensor
- (E) Transmissão, recepção e processamento dos dados
- (F) Interpretação e análise
- (G) Aplicações

Verifica-se que a obtenção de dados por sensoriamento remoto requer o uso de energia, que pode ser proveniente de uma fonte natural, como a luz do sol e o calor emitido pela superfície terrestre, ou ainda pode ser uma fonte artificial como, por exemplo, a do flash utilizado em uma máquina fotográfica e o sinal produzido por um radar. A energia, portanto, utilizada consiste na radiação eletromagnética (REM), que se propaga em forma de ondas eletromagnéticas com a velocidade da luz (300.000 km/s). Ela é mensurada em frequência em unidades de hertz (Hz) e seus múltiplos; e

comprimento de onda (λ) em unidades de metro e seus submúltiplos (FLORENZANO, 2011).

De forma sucinta, Florenzano (2011) explica que o espetro eletromagnético representa a distribuição da radiação eletromagnética, por regiões, segundo o comprimento de onda e a frequência. Ressalta-se que o espectro eletromagnético abrange desde curtos comprimentos de ondas, como os raios cósmicos e os raios gamas (γ), de alta frequência, até longos comprimentos de ondas, como as ondas de rádio e TV, de baixa frequência. Na região do espectro visível, o olho humano enxerga a energia (luz) eletromagnética, sendo capaz de distinguir as cores do violeta ao vermelho. A radiação do infravermelho é subdividida em três regiões: infravermelho próximo (0,76-1,2 μm), médio (1,3-6,0 μm) e distante termal (6,0-1.000 μm). A Figura 11 ilustra o espectro eletromagnético.

Figura 11 - Espectro eletromagnético.



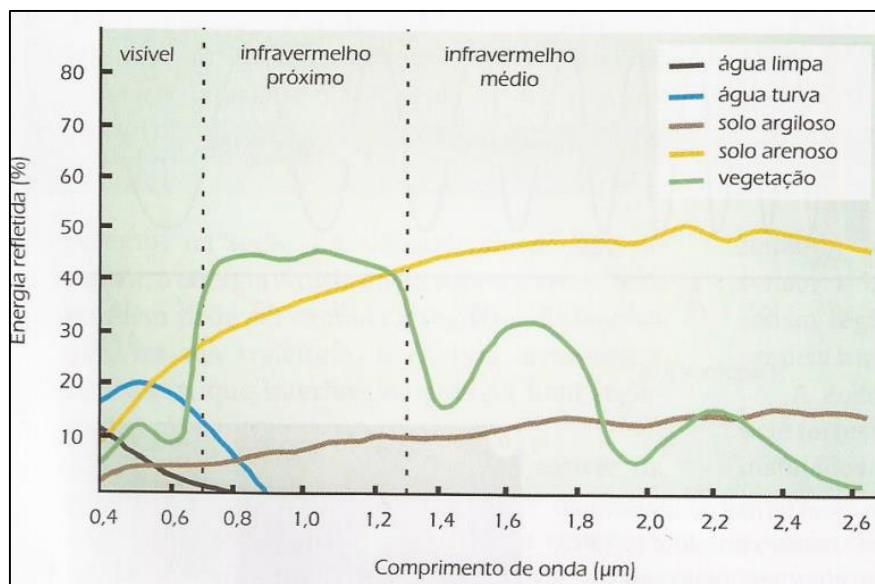
Fonte: Florenzano (2011).

O sensoriamento remoto é baseado no pressuposto de que diferentes superfícies refletem a energia solar de forma diferenciada. Neste contexto, o sensoriamento remoto só é útil se as características de reflexão de diferentes superfícies são devidamente compreendidas. Objetos da superfície terrestre, como a vegetação, a água e o solo, refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características biofísicas e químicas. As variações da energia refletida pelas superfícies terrestres podem ser representadas por

curvas espectrais, o que possibilita identificá-los nas imagens dos sensores remotos. A representação dos objetos nessas imagens varia do branco (objetos que refletem muita energia) ao preto (objetos refletem pouca energia) (JENSEN, 2009; FLORENZANO, 2011).

A 12 mostra as curvas espectrais da água limpa, água turva, solo argiloso e arenoso e da vegetação, em outras palavras, as curvas mostradas refletem o comportamento espectral padrão desses objetos.

Figura 12 – Curva espectral da vegetação, da água e do solo.



Fonte: Florenzano (2011).

As características básicas observadas no comportamento espectral destes objetos são (JENSEN 2009; FLORENZANO, 2011; MENESES e ALMEIDA, 2012):

- A **vegetação sadia** apresenta alta absorção da energia eletromagnética na região do espectro visível, que é capturada pela clorofila para a realização da fotossíntese. Dentro do espectro visível a reflectância é mais alta na região que caracteriza a coloração da vegetação. A alta reflectância no infravermelho próximo (até 1,3μm) é devido a estrutura celular, sendo que a partir deste comprimento de onda é o conteúdo de água na vegetação quem modula as bandas de absorção presentes no comportamento espectral desta.

- A curva do **solo** aponta um comportamento mais uniforme. Este comportamento é dominado pelas bandas de absorção de seus constituintes. As combinações e arranjos dos materiais constituintes dos solos é que define o seu comportamento espectral, sendo que os principais fatores são a constituição mineral, a matéria orgânica, a umidade e a granulometria (textura e estrutura) deste. Salienta-se que quanto maior o conteúdo de umidade em solos arenosos e em solos argilosos, menor a reflectância ao longo da região do visível e do infravermelho próximo.
- A **água** pode se apresentar na natureza em três estados físicos, os quais apresentam comportamento espectral totalmente distinto. O comportamento espectral da água líquida pura apresenta baixa reflectância na faixa do visível e nenhuma na região do infravermelho, absorvendo toda a energia. Este é o motivo da água aparecer tão escura em imagens infravermelho, branco-e-preta e colorida. O espalhamento na coluna d'água é importante especialmente nas porções violeta, azul escuro e azul claro do espectro. Esta é a razão pela qual a água pura é azul aos olhos humanos. No entanto, a maioria dos corpos d'água não são puros, desta forma o seu comportamento espectral é modulado, principalmente, pelos processos de absorção e espalhamento produzidos por materiais dissolvidos e em suspensão. Verifica-se que a presença de matéria orgânica dissolvida em corpos d'água desloca o máximo de reflectância espectral para o verde-amarelo, enquanto que a presença de matéria inorgânica em suspensão resulta num deslocamento em direção ao vermelho.

Face ao exposto, ressalta-se que o conhecimento do comportamento espectral das superfícies terrestres é muito importante para a escolha da região do espectro sobre a qual pretende-se adquirir dados para determinada aplicação (DI MAIO *et.al.*, 2008). Além disso, para a seleção e a interpretação das imagens de satélites faz-se necessário considerar os fatores que interferem na interação da radiação eletromagnética com as superfícies observadas e, consequentemente, na radiação captada pelo sensor. Dentre estes fatores, destaca-se as interferências atmosféricas.

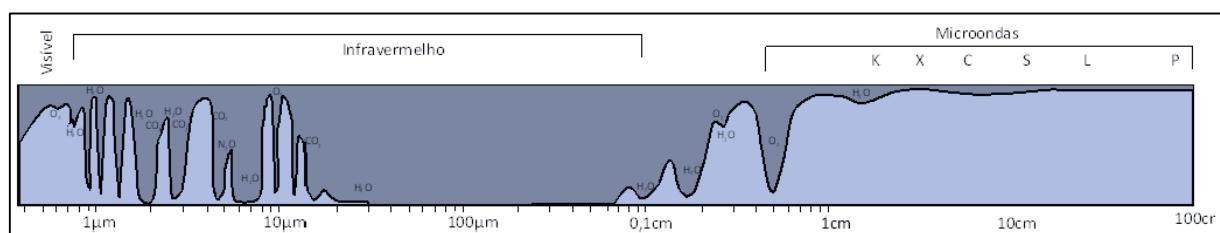
Esta interferência ocorre, em grande parte, devido à interação das moléculas dos constituintes gasosos com o material particulado suspenso na atmosfera, durante a

passagem da REM originada do Sol ou emitida pela Terra. Nessa passagem, a atmosfera interfere na intensidade do fluxo radiante, na distribuição espectral e na direção dos raios incidentes, tanto na sua trajetória descendente entre o Sol e a Terra como na trajetória ascendente da radiação refletida e emitida da superfície terrestre para o sensor. Parte da REM que interage diretamente com a atmosfera sofre dois efeitos, absorção e espalhamento da radiação, e esse comportamento da atmosfera é questão crucial para o sensoriamento remoto de alta altitude ou orbital (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Meneses e Almeida (2012) salientam que a absorção é o efeito mais prejudicial ao sensoriamento remoto. Como pode ser observado na

Figura 13, em vários intervalos de comprimentos de onda a atmosfera mostra-se parcial ou totalmente opaca às passagens da radiação solar e da radiação emitida pela Terra, em razão da absorção pelos gases nela presentes. Como consequência, a radiação solar pode ser impedida de atingir a superfície terrestre ou no mínimo sua intensidade é atenuada, o mesmo ocorre com a radiação emitida pela Terra. Dessa forma, o sensor colocado no espaço ficará impedido de obter imagens da superfície terrestre nesses comprimentos de onda. Esses intervalos de comprimentos de onda são chamados de bandas de absorção da atmosfera e são proibitivos para o uso de sensoriamento remoto. As demais regiões onde a atmosfera não absorve total ou intensamente a radiação solar são chamadas de janelas atmosféricas, as únicas em que é possível usar o sensoriamento remoto.

Figura 13 - Transmitância (T) da radiação eletromagnética através da atmosfera. As áreas em azul correspondem às regiões espectrais de transparências da atmosfera e as áreas em cinza correspondem às regiões espectrais onde os gases atmosféricos absorvem a radiação eletromagnética.



Fonte: Meneses e Almeida (2012).

Nota-se na

Figura 13 que a região de maior absorção, e sem uso do sensoriamento remoto, é no intervalo espectral termal de 14 μm a 1000 μm , devido à total absorção da radiação pelo vapor de água atmosférica. Em contrapartida, na região das micro-ondas a atmosfera é quase 100% transparente. No intervalo do visível ao infravermelho, que é a região espectral mais usada em sensoriamento remoto, a atmosfera também mostra a sua danosa influência para o uso do sensoriamento remoto. Por exemplo, nos comprimentos de onda de 1,4 μm e 1,9 μm , 100% da radiação solar é absorvida pelas moléculas de vapor de água, impedindo totalmente o uso de sensoriamento remoto nesses comprimentos de ondas (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Como já mencionado, o registro da REM só é possível em virtude de equipamentos que captam e registram a energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre - os chamados sensores remotos. Existem, no entanto, diferentes tipos de sensores - portáteis e instalados em plataformas terrestres, aéreas (balões, helicópteros e aviões) e orbitais (satélites artificiais). As câmaras fotográficas, câmaras de vídeo, radiômetros, sistemas de varredura (escâneres) e radares são exemplos de sensores. Os sensores diferenciam-se também em virtude das diferentes regiões do espectro eletromagnético de onde capturam dados. Dependendo do tipo, o sensor capta dados de uma ou mais regiões do espectro (sensor multiespectral). O sensor eletrônico multiespectral TM, do satélite Landsat-5, por exemplo, é um sistema de varredura que capta dados em diferentes faixas espetrais (três da região do visível e quatro da região do infravermelho). Este tipo de sensor é chamado de sensor passivo, uma vez que dependem da luz solar. Para esse tipo de sensor, a cobertura de nuvens limita a obtenção de imagens, diferentemente dos sensores ativos, como os radares que enviam pulsos próprios de energia, por produzirem uma fonte de energia própria na região de microondas. Desta forma, podem obter imagens tanto durante o dia como à noite e em qualquer condição metereológica (incluindo tempo nublado e com chuva) (FLORENZANO, 2011).

As imagens orbitais, as quais serão amplamente exploradas neste estudo, são geradas a partir de sensores instalados em satélites artificiais. Os satélites artificiais permanecem em órbita devido à aceleração da gravidade terrestre e à velocidade em que

ele se desloca no espaço, a qual depende da altitude de sua órbita. As órbitas podem ser baixas ou altas, polar, equatorial (geoestacionária) ou heliossíncrona (FLORENZANO, 2011).

Atualmente, o sensoriamento remoto é constituído por uma razoável constelação de satélites que oferecem imagens para atender as necessidades de uma ampla demanda de usuários. Estima-se que há entre 4 e 5 mil satélites orbitando a Terra. Os satélites artificiais são construídos para diferentes finalidades: telecomunicação, espionagem, experimentos científicos, metereologia e observação da Terra, este tipo de satélite serve como plataforma de coleta de dados dos recursos da Terra. Existem ainda os satélites de Posicionamento Global (GPS) que são importantes na navegação terrestre, aérea e marítima, além de auxiliar na localização de pessoas, objetos e lugares (FLORENZANO, 2011).

Diante deste contexto, pode-se inferir o grande número de satélites em órbita ao redor da Terra. Eles obtêm imagens com características distintas que dependem tanto do satélite, quanto do sensor. Assim, torna-se pertinente informar-se sobre as características básicas dos satélites e de seus sensores, com vistas a compreender a finalidade a que se destina cada produto ou imagem de sensoriamento remoto. Desta forma a seleção das imagens orbitais torna-se mais assertiva visando atender aos objetivos do estudo em questão.

As características fundamentais de um sensor baseam-se na sua resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal, as quais serão exploradas a seguir (FLORENZANO, 2011; MENESES e ALMEIDA, 2012).

- **Resolução espacial:** determina o tamanho do menor objeto que pode ser identificado em uma imagem. Nos sensores atuais, instalados em plataformas orbitais, esse tipo de resolução vai de 50cm a 1km. Um sensor com resolução espacial de 10m, por exemplo, é capaz de detectar objetos maiores que 10 m x 10m ($100m^2$).

- **Resolução espectral:** consiste na capacidade que um sensor possui para discriminar objetos em função da sua sensibilidade espectral. O termo resolução espectral envolve pelo menos três parâmetros de medida:

- i)* o número de bandas que o sensor possui;
- ii)* a largura em comprimento de onda das bandas;
- iii)* as posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético.

Comparativamente, um sensor tem melhor resolução espectral se ele possui maior número de bandas situadas em diferentes regiões espetrais e com larguras estreitas de comprimentos de onda. Essa necessidade é devido às diferenças relativas de reflectância entre os materiais da superfície da terra, que permitem distinguir um material do outro, em determinados comprimentos de onda.

- **Resolução radiométrica:** é a medida da intensidade de radiância da área de cada pixel unitário. Quanto maior for a capacidade do detector para medir as diferenças de intensidades dos níveis de radiância, maior será a resolução radiométrica. A maioria dos sensores multiespectrais com resolução espacial de 10 a 30 metros trabalha com resoluções radiométricas de 8 *bits*, isso é, possui capacidade de discriminar até 256 valores de radiância por banda espectral. Já os sensores com alta resolução espacial, com tamanho de pixel de 1 metro, possuem resoluções radiométricas de 10 ou 11 bits (1024 ou 2048 valores digitais).
- **Resolução temporal:** baseia-se na frequência de imageamento sobre uma mesma área e obtenção de imagens periódicas ao longo de sua vida útil. A resolução temporal é fundamental para acompanhar ou detectar a evolução ou mudanças que ocorrem na Terra, principalmente para alvos mais dinâmicos, como o ciclo fenológico de culturas, desmatamentos, desastres ambientais, tendo forte impacto na monitoração ambiental.

Por fim, vale ressaltar que, as imagens obtidas por sensores remotos necessitam ser processadas, analisadas e interpretadas para que os dados obtidos sejam transformados em informações úteis para os estudos. Nesta perspectiva, a interpretação de imagens de satélite possibilita a aquisição de inúmeras informações sobre os ambientes da superfície terrestre e geram mapas como os de geologia, solos, relevo, vegetação, recursos hídricos

e uso da terra. No processo de interpretação de uma imagem, onde ocorre a identificação dos objetos utiliza-se as variações de cor, forma, tamanho, textura (impressão de rugosidade), padrão (arranjo espacial dos objetos), localização e contexto da imagem analisada (FLORENZANO, 2011).

4.2.2. Vantagens e Limitações do Sensoriamento Remoto

Jensen (2009) salienta que o sensoriamento remoto é não-intrusivo, no sentido do sensor coletar a radiação eletromagnética emitida ou refletida pelo alvo sem afetar o seu estado presente, isto é, não impacta as características do objeto ou área de interesse. Adicionalmente, os sensores podem ser programados para coletar dados sistematicamente sobre um determinado alvo, eliminando, em alguns casos, a necessidade de amostragem presente em muitas das coletas de campo tradicionais.

O autor ainda endossa que a partir do sensoriamento remoto pode-se obter informações científicas novas, que poderão ser aplicadas por outras ciências ao conduzirem suas investigações, assemelhando-se assim ao levantamento. Todavia, diferentemente do levantamento, os dados do sensoriamento remoto podem ser obtidos para áreas geográficas maiores ao invés, apenas, de observações pontuais. Desta maneira, sob condições controladas, os dados de sensoriamento remoto podem ser usados para estimar variáveis geofísicas ou biofísicas como, por exemplo, posição, altura ou profundidade, temperatura, biomassa, concentração de clorofila, concentração de sedimentos, umidade do solo etc. Nesta perspectiva, os dados de sensoriamento remoto são atualmente críticos para a modelagem de processos naturais (mudanças climáticas, eutrofização, desertificação, desastres naturais etc.) ou antrópicos (desflorestamento, poluição, expansão urbana, deslizamentos etc.).

Por outro lado, Jensen (2009) esclarece que um dos grandes problemas do sensoriamento remoto é ser superestimado, ou seja, este é tido como a solução ideal. No entanto, o sensoriamento remoto deve ser compreendido simplesmente como uma ferramenta que provê algumas informações espaciais, temporais, espectrais, de forma mais eficiente e econômica. O autor ainda destaca que, embora a obtenção de dados de sensoriamento remoto possa ser feita de forma eficiente e econômica, na maioria dos casos, para o usuário final, os custos envolvidos na pesquisa espacial para o

desenvolvimento de tecnologias, lançamento de satélites e manutenção dos programas de observação da Terra podem ser muito caros.

Ainda na concepção de Jensen (2009), uma das limitações do sensoriamento remoto reside no fato dos instrumentos se tornarem descalibrados, resultando em dados não-calibrados obtidos por tais sensores, o que irá comprometer a qualidade dos dados a serem aplicadas no desenvolvimento de estudos ambientais.

4.2.3. As Aplicações das Imagens Orbitais em Estudos Ambientais

O planeta tem um comportamento dinâmico, e uma das vantagens dos sistemas de observação da Terra é fornecer dados para que as mudanças que ocorrem no planeta sejam estudadas. Essas mudanças ocorrem em diferentes escalas de tempo e espaço. Os sistemas de sensoriamento remoto são, portanto, configurados de maneira a captar as dinâmicas do planeta em variadas escalas de estudo. A maior parte dos satélites empregados para a observação do planeta são os satélites ambientais e meteorológicos. Desta maneira, os estudos ambientais são possíveis devido à existência destes satélites, assim como em virtude das características particulares de reflectância das diversas superfícies terrestres, explicadas anteriormente (SOUZA, 2010).

Neste contexto, as imagens orbitais vêm sendo utilizadas nos mais diversos estudos ambientais, tal como no estudo de fenômenos ambientais (previsão metereológica; detecção e monitoramento de focos de incêndio e áreas queimadas; desmatamento; erosão e escorregamento de encostas; inundações); no estudo de ambientes naturais (florestas tropicais; mangues; ambientes gelados; ambientes áridos; recursos minerais; feições de relevo e de ambientes aquáticos; e no estudo de ambientes transformados (ambientes aquáticos, rurais e urbano) (FLORENZANO, 2011). Nesta direção, o presente trabalho busca expandir os estudos sobre o uso de imagens orbitais no estudo de ambientes transformados, com foco em áreas impactadas pela mineração. Assim, o próximo item abordará alguns trabalhos nesta área, com o intuito de explorar as mais variadas técnicas de sensoriamento remoto aplicadas na mineração, visando, principalmente, à avaliação de impactos ambientais.

4.2.3.1. As Aplicações do Sensoriamento Remoto na Avaliação de Impactos Ambientais da Mineração

O sensoriamento remoto é uma poderosa ferramenta para avaliar os impactos ambientais causados pelas atividades de mineração. Por exemplo, análises a partir dos sensores Landsat Thematic Mapper (TM) e Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) foram executadas por Latifovic et al. (2005) com o intuito de avaliar as mudanças da cobertura do solo devido à mineração na região denominada *Athabasca Oil Sands*, no Canadá. Os resultados mostram uma diminuição da vegetação natural na área de estudo, cerca de 8,64% (715.094 ha) de 1992 a 2001. Latifovic et al. (2005) também realizou análises a partir do sensor AVHRR, do satélite NOAA, para calcular o índice de vegetação diferenciada normalizada (NDVI) durante os anos de 1990 a 2002. Os resultados indicam uma estreita relação entre o decréscimo da vegetação e o desenvolvimento da mineração.

Similarmente, Schueler, Kuemmerle e Schroder (2011) avaliaram as mudanças da cobertura do solo devido à mineração de ouro em Gana, uma das principais regiões de mineração de ouro do mundo, com base em imagens do satélite Landsat de 1986-2002. A partir da análise temporal e do mapeamento da cobertura do solo os autores evidenciaram o desmatamento de 58% das terras, 45% de perda de terras agrícolas dentro de concessões de mineração, e a conversão de florestas em áreas agrícolas em áreas adjacentes à região minerada, em decorrência do reassentamento da população.

Nesta mesma perspectiva, McIntyre et. al. (2016) desenvolveu um método multidisciplinar objetivando avaliar os impactos das mudanças no uso do solo nos recursos hídricos em uma região minerada no norte da Mongólia. Imagens do satélite Landsat foram usadas para criar uma série temporal da região, envolvendo um total de 18 cenas Landsat, de 1989 a 2015. Os dados foram compilados e analisados para determinar as extensões espaciais e as mudanças temporais, visando o mapeamento do uso do solo no período considerado. Os resultados deste estudo apontam riscos potenciais para os recursos hídricos da região devido à expansão da mineração, a citar: o aumento de sedimentos e contaminantes; redução e perturbação das vazões em virtude do represamento e desvio do rio; aumento do pH, dos sais e dos metais dissolvidos no rio

devido à lixiviação dos rejeitos da mineração; poluição por substâncias químicas potencialmente utilizadas na extração do ouro.

Charou (2010) investigou o uso de imagens multitemporais Landsat-5 e Landsat-7, SPOT Panchromatic e ASTER para avaliar os impactos das atividades de mineração, indicando as mudanças nos recursos hídricos e na cobertura do solo, em três áreas de mineração na Grécia. O autor denota que o uso complementar de imagens provenientes de diferentes satélites é muito útil para detectar os diferentes tipos de superfícies e monitorar os aspectos ambientais. Além disso, Charou (2010) evidencia que imagens multi-temporais ASTER, Landsat e SPOT podem ser aplicadas em mapeamentos de grandes regiões de mineração, visando detectar o uso e mudanças do solo e dos recursos hídricos, complementando, assim os dados de estudos ambientais.

Kumar e Reddy (2016) endossam o uso do sensoriamento remoto ao utilizar dados dos sensores orbitais Landsat 8 e Landsat 7 para avaliar os impactos ambientais decorrentes da mineração de calcário em uma região da Índia. Os autores utilizaram as imagens para determinar o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) e gerar mapas da temperatura da superfície, em três zonas em raio de 10 km das minas, para os anos de 2001 e 2015. Os resultados indicam que a vegetação diminuiu 29,99%, 16,62% e 29,58% na zona I, zona II e zona III, respectivamente, entre os dois períodos de análise, enquanto que a temperatura aumentou 6,9%, 9,48% e 8,94% na zona I, zona II e zona III, respectivamente, do ano de 2001 a 2015. O estudo revela que as mudanças na vegetação e na temperatura nas três zonas, podem estar relacionadas à elevação de nuvens de poeira de calcário quimicamente ativas na atmosfera e à consequente dispersão sobre os solos adjacentes e a cobertura vegetal. Kumar e Reddy (2016) evidenciam que a carga de poeira afetou a fotossíntese e o crescimento da planta, levando a mudanças notáveis na vegetação, induzidas pela atividade de mineração de calcário na região. Ademais, a variação considerável na temperatura das superfícies da área de estudo pode ser atribuída às mudanças da cobertura do solo devido à intensa atividade de mineração. A comparação entre o índice NDVI e os mapas de temperatura, nos dois períodos, confirma a relação entre ambos, o que indica ainda que o NDVI pode ser um indicador confiável da produtividade da vegetação e sua sensibilidade às condições prevalecentes na área de

estudo. Também é evidente a estreita correlação entre a redução da vegetação e o aumento proporcional da área de mineração nos períodos analisados.

No Brasil, Diniz et. at. (2014) utilizaram imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) proveniente do satélite Landsat 5 para avaliar a evolução da área minerada no Quadrilátero Ferrífero (QF), Minas Gerais. Os autores quantificaram a área coberta com vegetação florestal nativa suprimida pela mineração em um período de 26 anos, em 1985, 1989, 2000 e 2011. As imagens referentes a cada ano de análise foram interpretadas com vistas à identificação e delimitação das áreas mineradas. Na sequência, para a análise da supressão da vegetação, as imagens de 1985 foram classificadas gerando um mapa temático de uso e cobertura do solo do QF. Os resultados apontam as áreas suprimidas de vegetação florestal nativa entre os anos de 1985 a 1989, 1989 a 2000 e 2000 a 2011 corresponderam respectivamente a 324,42 ha, 948,98 ha e 1989,68 ha, com uma perda total de vegetação nativa de 3.263,07 ha, o que corresponde a um aumento de 213% na área minerada no QF.

Cardozo, Pimenta e Ribeiro (2016) investigaram o uso de série temporal de imagens do satélite Landsat objetivando à análise multitemporal de uma antiga mina de cobre abandonada localizada em Minas do Camaquã, no sul do Brasil. Os autores utilizaram uma abordagem diferente dos demais estudos mencionados anteriormente, ao comparar as áreas degradadas em duas etapas distintas da mina, considerando o período durante a sua operação e após o seu fechamento. Para isso, extraiu-se o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para produzir três mapas de uso da região, no período de 1985 a 2011. A partir das comparações entre os referidos mapas e as áreas sem cobertura vegetal, foi possível quantificar a modificação em cada porção da paisagem, identificando-se a evolução das mudanças na área de vegetação natural. Verificou-se que no período 1985 a 1996 a degradação aumentou em 8%, ou 47,43 ha. Em contrapartida, em 2011 verificou-se que a cobertura vegetal foi superior ao primeiro período analisado, ou seja, ocorreu uma recuperação da vegetação de 26% ou 113,22 ha em relação a 1985.

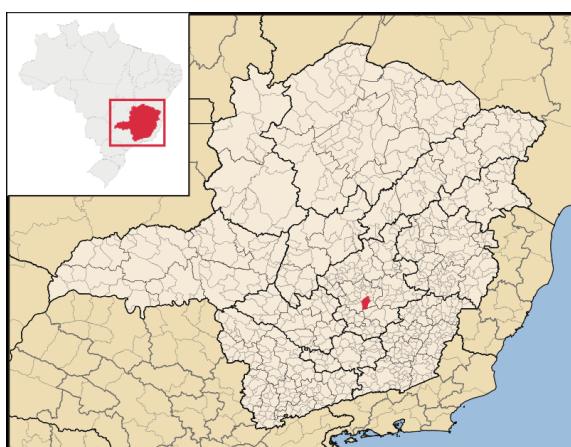
Oliveira e Fortes (2017), por meio de análise multitemporal de imagens orbitais dos satélites Landsat 5, 7 e 8 de 1987, 1999, 2007 e 2016, avaliaram os impactos da expansão da mineração de mármore em Cachoeira de Itapemirim, sul do Espírito

Santo. As imagens foram pré-processadas, segmentadas e classificadas. Finalmente, os produtos gerados no estágio de processamento foram avaliados e comparados com ortofotos. Os resultados evidenciam que a partir das classes geradas na etapa de segmentação e classificação foi possível distinguir as áreas de mineração, das áreas urbanizadas, no entanto não foi fácil diferenciar as áreas de mineração de áreas de solo exposto. Ademais, os resultados apontaram um aumento de cerca de 1000% em 30 anos, devido aos aumentos de exportação e ao desenvolvimento do mercado interno desde 2000.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o município de Nova Lima que está situado na região do Quadrilátero Ferrífero (Figura 14), onde se localizam as principais jazidas de ferro, manganês e ouro do país, de enorme tonelagem e de minérios de alto teor (IBRAM, 2015). A população estimada é de cerca de 92.178 habitantes (IBGE, 2015). A descoberta de minério de ouro na região remonta ao século XVII com a chegada dos bandeirantes. Atualmente, o município destaca-se pela produção de minério de ferro, ouro, mangânes, areia, além de lítio, nióbio e grafita. Em 2013, o município arrecadou com a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) R\$234.071.947,23, o que corresponde a 19,4% da arrecadação da CFEM do estado de Minas Gerais (IBRAM, 2015).

Figura 14 - Mapa de Localização de Nova Lima no estado de Minas Gerais.



Fonte: Wikipédia (2018).

A área de estudo está inserida na bacia do Rio das Velhas, cuja nascente principal situa-se na cachoeira das Andorinhas, município de Ouro Preto, numa altitude de aproximadamente 1.500 m. Toda a bacia compreende uma área de 27.857 Km², onde estão localizados 51 municípios. O rio das Velhas deságua no rio São Francisco em Barra do Guaicuí, distrito de Várzea da Palma, após quase 800 km, numa altitude de 478 m, com uma vazão média de 300 m³/s. A bacia hidrográfica é dividida em trechos, segundo os cursos alto, médio e baixo. O município de Nova Lima está inserido no Alto Rio das Velhas (Figura 15), que compreende toda a região do Quadrilátero Ferrífero, abrangendo uma área de 982 km².

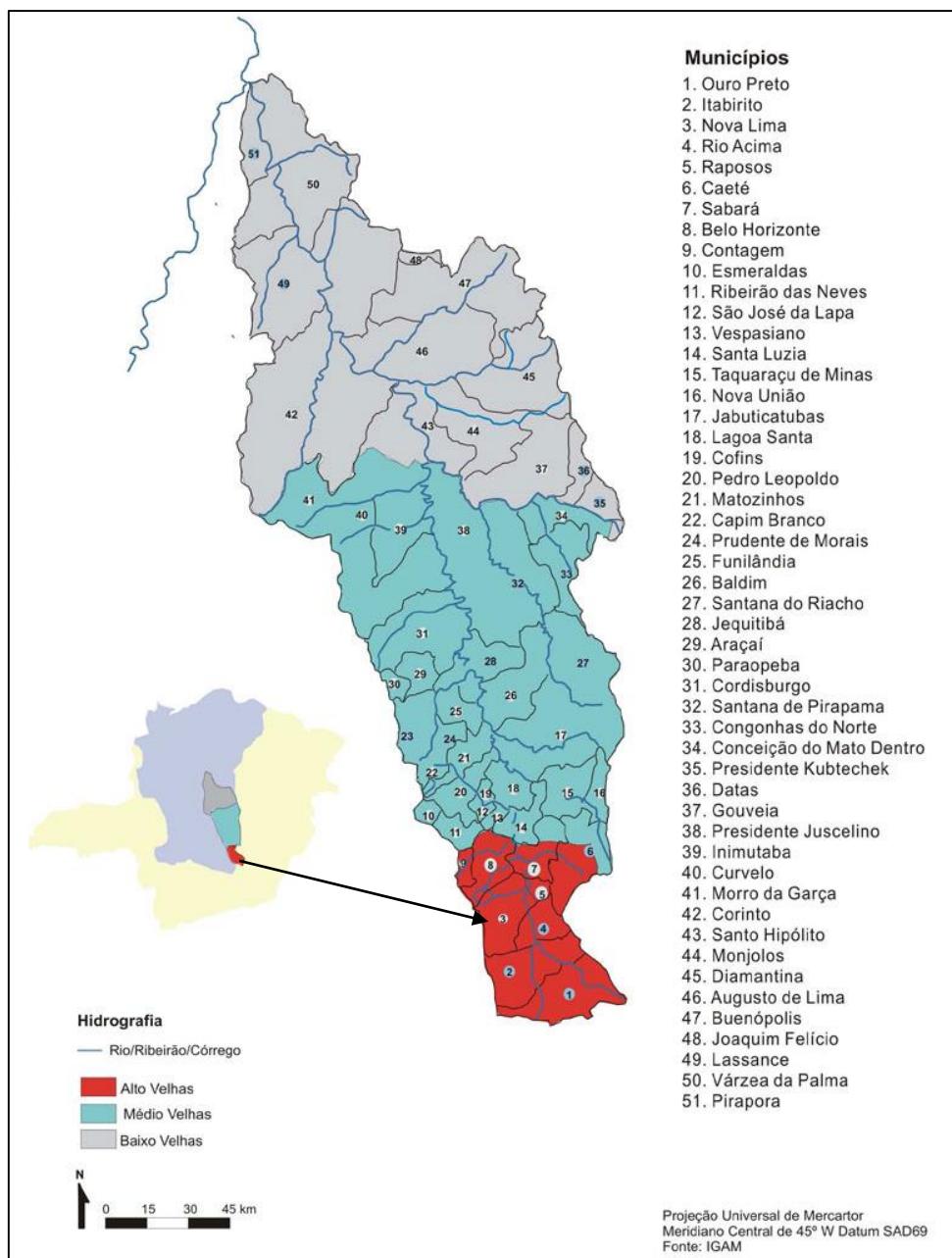
No município existem 10 sub-bacias e com exceção de uma, todas desaguam na margem esquerda do Rio das Velhas, drenando as encostas orientais das serras da Moeda, Calçada, Cachimbo e do Curral, correspondendo a uma área total de 513,2 km².

Cabe mencionar ainda que a região do Alto Rio das Velhas apresenta o maior contingente populacional, com uma expressiva atividade econômica, concentrada, principalmente, na RMBH. Nessa região encontra-se o sistema de abastecimento integrado Rio das Velhas com captação no rio das Velhas e capacidade instalada de 9,0 m³/s abastecendo 74% da cidade de Belo Horizonte além das cidades de Raposos, Nova Lima, Sabará e Santa Luzia. Os principais agentes poluidores são os esgotos industriais e domésticos não tratados e os efluentes gerados pelas atividades minerárias clandestinas atuantes nesta parte da bacia (PDRH, 2015).

Neste contexto, a área de estudo foi selecionada em virtude da presença expressiva da mineração, que está presente há séculos na região, somada à importância de seus recursos hídricos para o abastecimento da RMBH.

Por tratar-se de um estudo que visa avaliar os impactos nos recursos hídricos decorrentes da atividade minerária, o mais pertinente seria selecionar a sub-bacia do Alto do Rio das Velhas, cuja área abrange todo o Quadrilátero Ferrífero, como unidade espacial de análise. No entanto, devido ao grande volume de dados e informações que seriam gerados, não haveria tempo hábil para o processamento dos dados e a análise das informações. Sendo assim, optou-se por fazer um recorte desta sub-bacia e selecionar apenas um de seus municípios como unidade de análise.

Figura 15 - Bacia do Rio das Velhas.



Fonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas – CBH Velhas (2014).

4.4 SELEÇÃO E PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT

4.4.1. Seleção das imagens

A metodologia deste trabalho compreendeu a utilização de imagens multitemporais do satélite Landsat (órbita circular, quase polar, e síncrona com o Sol, resolução espacial de 30 metros), sensor TM (Landsat 5) e sensor OLI (Landsat 8), disponíveis pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS – e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE - da área em estudo para os anos de 1987, 1997, 2007 e 2017. A aquisição de dados por múltiplas fontes deu-se para atender a demanda específica deste estudo com intervalo de 10 anos entre as imagens analisadas. O Quadro 2 apresenta os principais dados dos satélites e as datas de imageamento das cenas utilizadas no trabalho. Vale mencionar, que a data de imageamento das imagens corresponde ao período seco, com o intuito de evitar a cobertura de nuvens e as interferências que elas podem causar na identificação e interpretação das imagens.

Quadro 2 - Dados dos satélites e datas de imageamento das cenas utilizadas no trabalho.

Satélite	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 8
Sensor	TM	TM	TM	OLI
Data do Imageamento	03/09/1987	28/07/1997	25/08/2007	04/08/2017
Projeção/Datum/Fuso	UTM/WGS 84/23S	UTM/WGS 84/23S	UTM/WGS 84/23S	UTM/WGS 84/23S

Fonte: Elaborado pela autora.

Os Quadro 3 e Quadro 4 apresentam as características espectrais dos sensores Thematic Mapper (TM), acoplado ao satélite Landsat 5, e Operational Land Imager (OLI), do satélite Landsat 8, respectivamente.

Quadro 3 - Características espetrais do sensor TM do satélite Landsat 5.

SATÉLITE LANDSAT 5		
Sensor: Thematic Mapper (TM)		
Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Resolução (m)
Band 1 - Azul	0.45 - 0.52	30
Band 2 - Verde	0.52 - 0.60	30
Band 3 - Vermelho	0.63 - 0.69	30
Band 4 - Infravermelho Próximo	0.76 - 0.90	30
Band 5 - Infravermelho Próximo	1.55 - 1.75	30
Band 6 - Termal	10.40 - 12.50	120
Band 7 - Infravermelho Médio	2.08 - 2.35	30

Fonte: Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS (2018).

Quadro 4 - Características espetrais do sensor OLI do satélite Landsat 8.

SATÉLITE LANDSAT 8		
Sensor: Operational Land Imager (OLI)		
Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Resolução (m)
Banda 1 – Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.450 - 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 – Vermelho	0.64 - 0.67	30
Banda 5 – Infravermelho próximo	0.85 - 0.88	30
Banda 6 – SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 – SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 – Pancromática	0.50 - 0.68	15
Banda 9 – Cirrus	1.36 - 1.38	30

Fonte: Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS (2018).

4.4.2. Processamento Digital das Imagens

As imagens utilizadas foram obtidas no formato .tiff, e foram compiladas para a formação de uma única cena multispectral com todas as bandas. Na sequência foram testadas diversas combinações de bandas e aplicada a técnica de realce de imagens, visando melhorar a qualidade visual das imagens e facilitar o trabalho de interpretação. A técnica de realce aplicada foi a ampliação linear de contraste, caracterizada como uma técnica simples e eficiente para destacar objetos e feições, com o objetivo de melhorar a qualidade das imagens sob critérios subjetivos do olho humano; é normalmente utilizada como uma etapa de pré-processamento para sistemas de reconhecimento de padrões. A manipulação do contraste linear consiste em expandir a distribuição dos níveis de cinza

(concentrados em um pequeno intervalo) para um intervalo maior (entre 0 a 255, para imagens de 8 bits), o que aumenta o contraste da imagem. Esta técnica baseia-se numa transferência radiométrica em cada pixel, em que um histograma da imagem descreve a distribuição estatística dos níveis de cinza em termos do número de pixels para cada nível de cinza (INPE, 2014).

Vale mencionar que, o sensor OLI do satélite Landsat 8 apresenta uma banda pancromática com resolução espacial de 15 metros. Desta forma, antes da combinação de bandas e aplicação do realce, realizou-se uma fusão de imagens, onde utilizou-se a imagem multiespectral para colorir a pancromática, alcançando assim uma resolução espacial de 15 metros para a imagem referente ao ano de 2017.

4.4.3. Interpretação de imagens

Para realizar a interpretação das imagens com vistas à identificação e delimitação das áreas mineradas no município de Nova Lima, baseou-se em elementos e chaves de interpretação das imagens multiespectrais, tal como a tonalidade, a cor, a textura, o tamanho, a forma, o padrão e a localização de suas variáveis. Em seguida, as áreas identificadas foram delimitadas por meio de vetorização, formando assim polígonos, cujas áreas foram calculadas na sequência.

Cabe ressaltar, que as áreas diretamente afetadas pela mineração podem ser compostas por diversas estruturas, tais como barragens e pilhas de rejeitos, pilhas de estéril, cavas a céu aberto, planta industrial, estradas e áreas administrativas. Estas estruturas, portanto, refletem de forma heterogênea a energia eletromagnética captada pelos sensores dos satélites, o que torna a sua identificação e delimitação complexas. Além disso, há a dificuldade de diferenciar estas estruturas de solo exposto e áreas urbanas, uma vez que esses alvos possuem reflectância semelhante. Desta forma, optou-se pela vetorização das áreas mineradas, em vez de realizar a classificação das imagens, com o objetivo de delimitar de forma ágil e objetiva as áreas.

Todos os procedimentos adotados nesse trabalho foram desenvolvidos com auxílio do software ArcGis Pro versão 2.1.0.

4.5 OBTENÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DA SÉRIE HISTÓRICA DAS VAZÕES

A série histórica de vazão empregada neste estudo corresponde aos dados provenientes da estação fluviométrica de Honório Bicalho, localizada no município de Nova Lima (Figura 16). Nesta estação são medidos diariamente a vazão do Rio das Velhas, e a partir destes dados são determinadas as vazões máximas, médias e mínimas. Embora a drenagem da porção norte do município não contribua para o escoamento da estação, considerou-se seus dados, pois esta é a única estação localizada no município que realiza este tipo de monitoramento. Assim, os dados foram obtidos no sistema de informações hidrológicas da ANA, o *HIDROWEB*. O Quadro 5 traz os principais dados da estação fluviométrica.

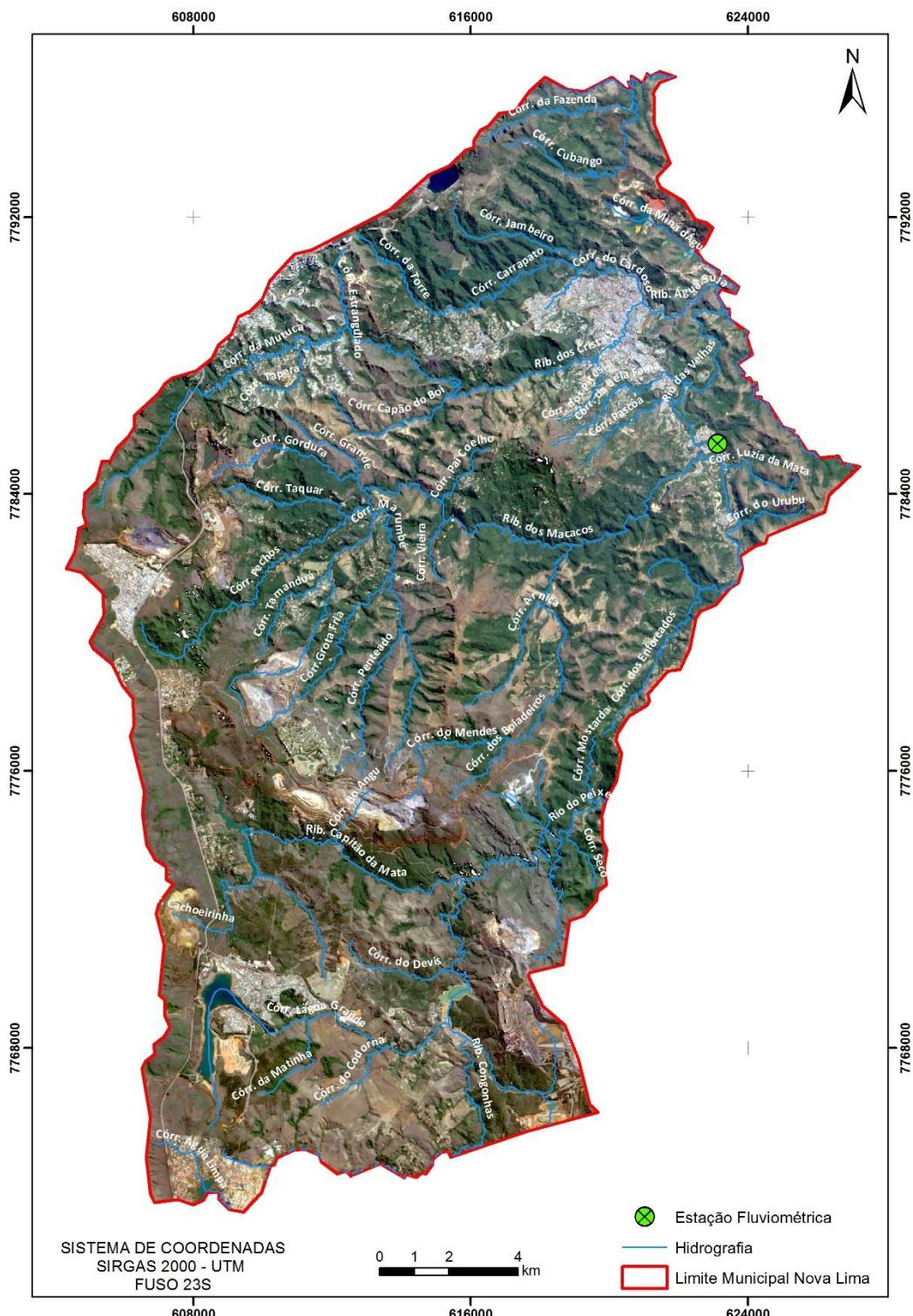
Quadro 5 - Dados da estação fluviométrica situada em Nova Lima.

Nome Estação	Honório Bicalho Montante
Código	41199998
Status	Ativa
Bacia	Rio São Francisco
Sub-bacia	Rio das Velhas (Alto Rio das Velhas)
Rio	Rio das Velhas
Estado	Minas Gerais
Município	Nova Lima
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-20:1:29
Longitude	-43:49:26

Fonte: Agência Nacional das Águas – ANA, HIDROWEB (2018).

Para compreender os dados da série histórica da vazão realizou-se uma análise descritiva das vazões médias. Desta forma, os dados foram sintetizados por meio de tabela com as medidas descritivas, gráficos boxplot e de séries temporais, com o intuito de organizá-los e descrevê-los, e assim obter uma visão global da variação e tendência dos dados amostrados.

Figura 16 - Hidrografia do município de Nova Lima e localização da estação fluviométrica - Honório Bicalho Montante.



Fonte: Elaborado pela autora.

5. RESULTADOS

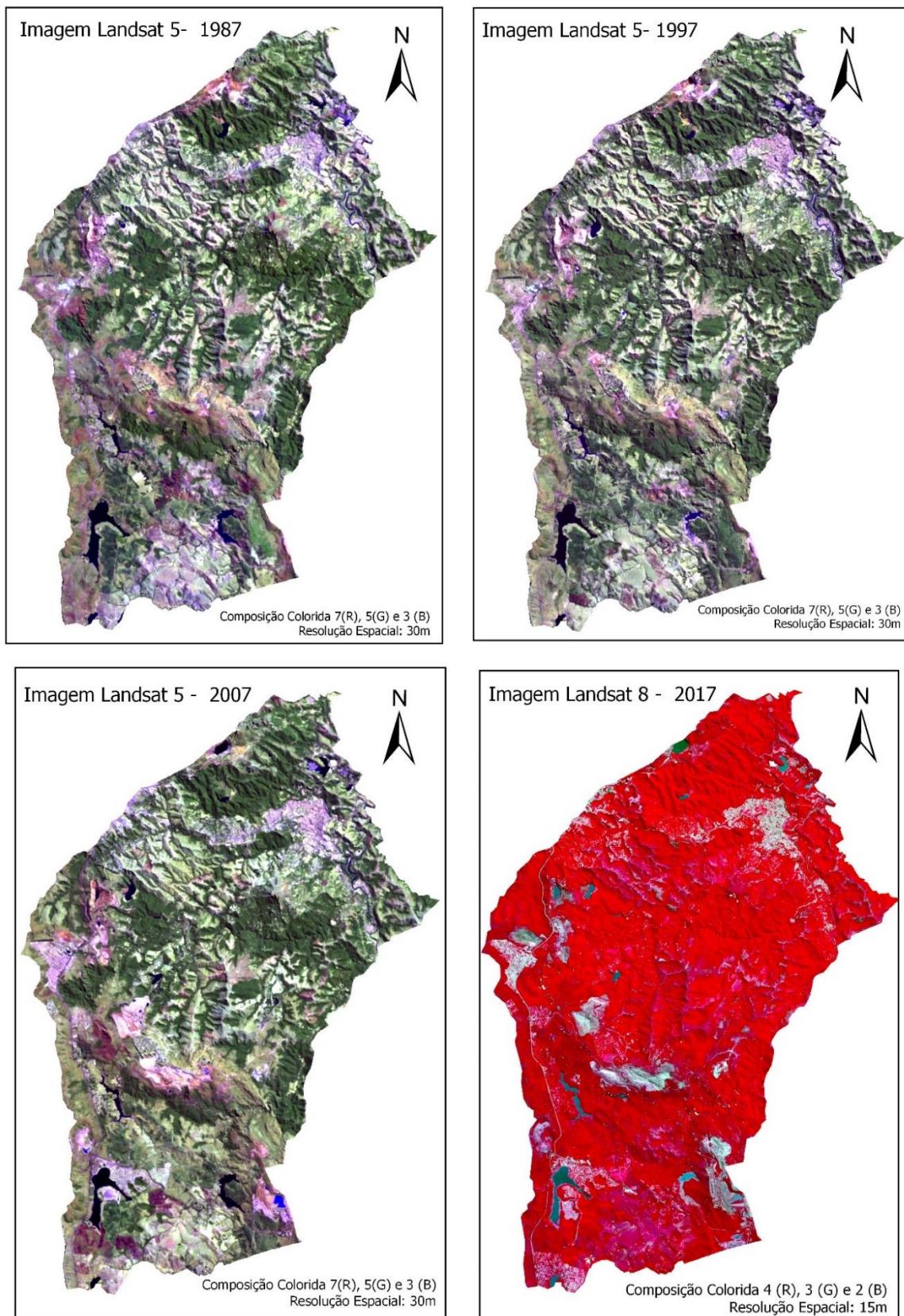
Esta seção visa descrever os resultados obtidos a partir da aplicação de técnicas de processamento digital e interpretação de imagens do satélite *Landsat*, bem como apresentar a análise descritiva dos dados hidrológicos considerados nesta pesquisa. A partir dos resultados aqui descritos espera-se identificar e analisar os possíveis impactos causados nos recursos hídricos decorrentes da atividade minerária, no município de Nova Lima, no período de 1987 a 2017.

5.1. PROCESSAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT

Os resultados obtidos compreendem imagens multiespectrais na composição colorida 7(R), 5(G) e 3 (B) para as imagens do Landsat 5 referentes aos anos de 1987, 1997, 2007; e imagem multiespectral pancromática com a composição colorida 4 (R), 3 (G) e 2 (B) para a imagem do Landsat 8 referente ao ano de 2017. A partir destas imagens foi possível a identificação e delimitação da ocorrência da atividade minerária durante o período.

Os resultados das composições coloridas e da aplicação da técnica de ampliação do contraste linear evidenciam as áreas de mineração nas quatro imagens, como observa-se na Figura 17. No entanto, a imagem multiespectral pancromática do Landsat 8, a qual possui resolução de 15 metros, apresenta um resultado melhor, uma vez que as áreas de mineração são claramente identificadas e se diferenciam de áreas urbanizadas e de solo exposto.

Figura 17 – Resultado das composições coloridas das imagens *Landsat*.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 ÁREAS DIRETAMENTE AFETADAS PELA MINERAÇÃO NAS ÚLTIMAS QUATRO DÉCADAS NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA

Os resultados do processamento e da interpretação das imagens evidenciaram as áreas diretamente afetadas pela mineração em um período de 30 anos, em 1987, 1997, 2007 e 2017. As imagens com composição na cor natural referentes a cada ano de análise, bem como a delimitação das áreas são apresentadas na Figura 19.

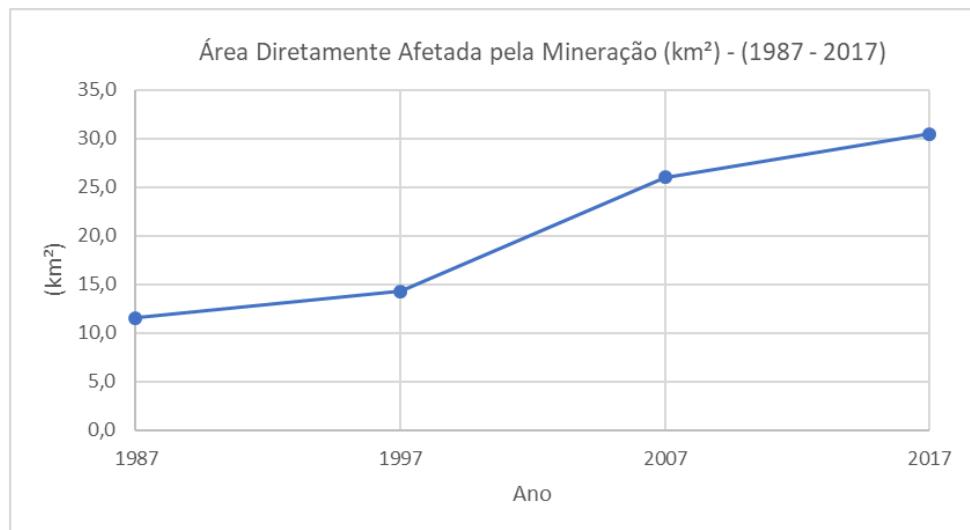
A partir da identificação e delimitação das áreas de mineração foi possível quantificá-las. O Quadro 6 apresenta uma estimativa destas áreas nos quatro anos de análise. O gráfico da Figura 18 ilustra o aumento significativo das áreas ao longo dos anos, de 11,55 km², em 1987, a 30,49 km², em 2017. O Quadro 7 aponta a variação e a variação acumulada em km², e a porcentagem desta variação com relação ao período anterior. Nota-se um aumento expressivo entre os anos de 1997 e 2007, quando houve um aumento de quase 82% das áreas afetadas pela mineração no município. Em todo o período as áreas de mineração aumentaram 164%, o que equivale a um aumento de 18,94 km².

Quadro 6 – Áreas diretamente afetadas pela mineração no município de Nova Lima no período de 1987 a 2017, em km².

Ano	Área Diretamente Afetada pela Mineração (km ²)
1987	11,55
1997	14,29
2007	25,99
2017	30,49

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – Gráfico indicando o crescimento das áreas diretamente afetadas pela mineração em Nova Lima, no período de 1997 a 2017.



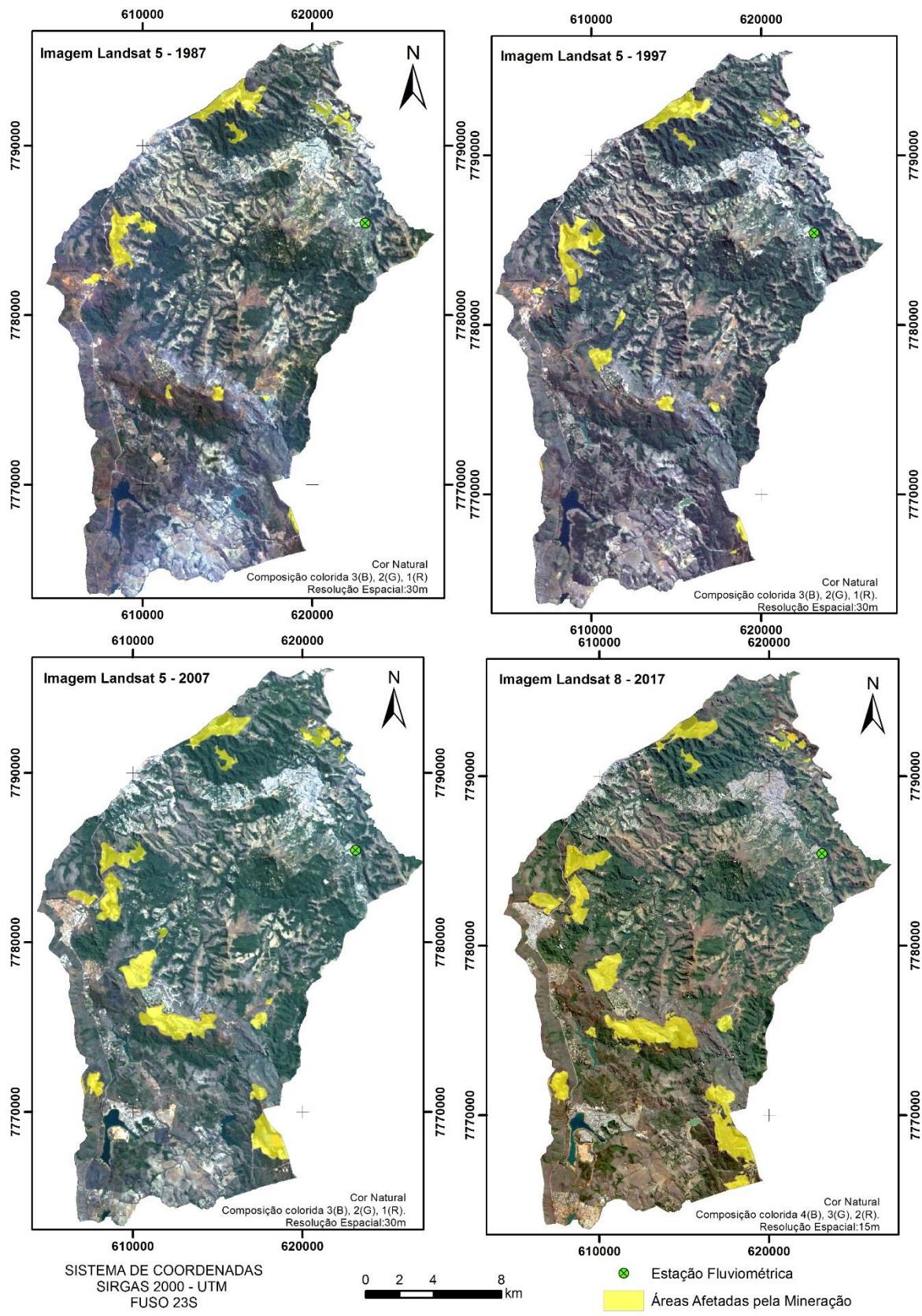
Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 7 - Variação das áreas diretamente afetadas pela mineração em Nova Lima, no período de 1987 a 2017.

Período	Variação (km ²)	Variação Acumulada (km ²)	Variação (%)
1987-1997	2,74	2,74	23,7
1997-2007	11,7	14,44	81,9
2007-2017	4,5	18,94	17,3
1987-2017	-	-	164,0

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Imagens *Landsat* na cor natural, com a delimitação das áreas diretamente afetadas pela mineração no município de Nova Lima.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 ANÁLISE DESCRIPTIVA DA SÉRIE HISTÓRICA DA VAZÃO MÉDIA DO RIO DAS VELHAS

O período de análise dos dados de vazão compreende os anos de 1987 a 2015. Não foi possível extender o período de análise até 2017, pois os dados obtidos da estação fluviométrica localizada no distrito de Honório Bicalho de 2016 e 2017 estavam incompletos. Desta forma, a partir de 334 amostras da série histórica da vazão média mensal calculou-se as medidas de tendência central (média aritmética e mediana), as medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação), as medidas separatrizes (primeiro -Q1 e terceiro quartil- Q3) e os valores mínimo e máximo de vazão, conforme mostra o Quadro 8.

Nota-se que os valores de mínima ($9,610\text{m}^3/\text{s}$) e máxima ($113,716\text{ m}^3/\text{s}$) vazão apresentam uma grande amplitude. Ao analisar estes dados verifica-se que a mínima registrada ocorreu em setembro de 2014, período naturalmente seco. No entanto, somado a este fenômeno, o ano de 2014 também foi marcado por uma grande estiagem no sudeste brasileiro, o que agravou a situação de seca na região, reduzindo significativamente a vazão dos rios. Por outro lado, a máxima vazão da série histórica foi registrada em janeiro de 2003, período de chuvas na região, quando há um aumento das vazões dos rios em virtude do aumento dos índices pluviométricos.

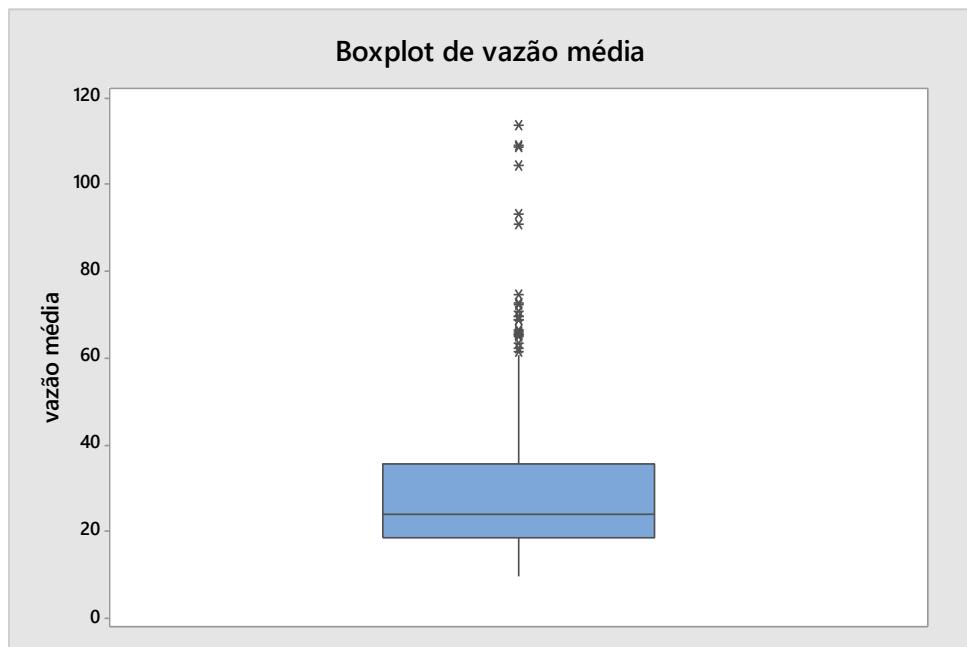
Quadro 8 – Estatísticas das vazões médias do trecho do Rio das Velhas, que drena o município de Nova Lima.

Variável	Vazão Média (m^3/s)
N	334
N*	13
Média	29,737
Desvio Padrão	17,557
Coeficiente de Variação	59,04
Mínimo	9,610
Q1	18,435
Mediana	23,953
Q3	35,497
Máximo	113,716

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir do gráfico boxplot da vazão média (Figura 20) observa-se que 75% dos dados analisados são valores menores ou iguais ao valor do terceiro quartil, isto é, 35,497 m³/s. 50% dos dados da vazão apresentam valores menores ou iguais a 23,953 m³/s. Enquanto que 25% são menores ou iguais a 18,435 m³/s. O gráfico ainda apresenta os dados discrepantes, que são aqueles cuja vazão média ultrapassa os 61,09 m³/s. Ao analisar estes dados verifica-se que correspondem as vazões médias do período chuvoso, dos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, dos anos de 1987 a 2011.

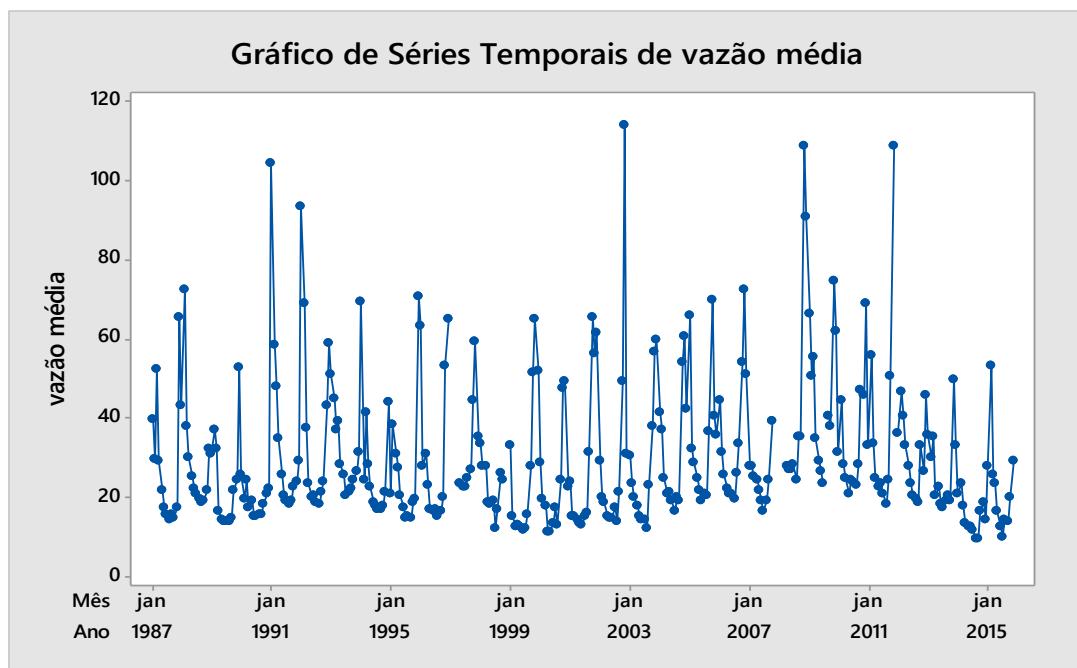
Figura 20 - Gráfico Boxplot de vazão média (m³/s), período 1987 a 2015.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 21 ilustra as séries temporais do período de 1987 a 2015. Este gráfico representa uma série longa, o que auxilia a detectar as flutuações e analisar as tendências das variáveis. Nota-se, portanto, que os dados apresentam-se de maneira sazonal, com certa tendência ao aumento ou redução de acordo com a estação climática do ano. Este fenômeno deve-se às duas estações climáticas bem definidas características da região de estudo - a estação seca que ocorre entre maio e setembro; e a estação chuvosa que ocorre entre outubro e abril. Neste contexto, observa-se que no período chuvoso, principalmente nos meses de janeiro e dezembro a vazão média aumenta consideravelmente, apresentando picos de vazão.

Figura 21 – Série temporal de vazão média mensal (m^3/s) do trecho do Rio das Velhas que drena o município de Nova Lima, período de 1987 a 2015.



Fonte: Elaborado pela autora.

6. ANÁLISE DOS POSSÍVEIS IMPACTOS CAUSADOS NOS RECURSOS HÍDRICOS DECORRENTES DA ATIVIDADE MINERÁRIA

A mineração é uma atividade industrial de uso temporário da terra que requer a alteração das condições ambientais naturais. A inserção de certos elementos no ambiente, como a abertura de cavas, barragem e pilhas de rejeitos, pilha de estéril, planta metalúrgica e estradas, necessitam da supressão de vegetação local, o que irá acarretar uma série de modificações ambientais que terão impacto direto nos recursos hídricos. Segundo Von Sperling (2005) solos desprovidos de cobertura vegetal apresentam maior escoamento superficial, em decorrência há maiores chances de ocorrer enchentes em períodos chuvosos; apresentam menor taxa de infiltração, o que prejudica a alimentação dos rios nos períodos secos; além de promover o carreamento de partículas do solo para os cursos d'água.

Adicionalmente, a intervenção antrópica pode causar a degradação da qualidade da água, e gerar impactos na vazão média anual e na distribuição sazonal da água. Estes efeitos decorrem do fato do potencial considerável de se aumentar a vazão anual do rio por meio da diminuição dos níveis de interceptação e transpiração na bacia. A maneira

mais simples de gerar essa redução dá-se pela remoção da cobertura florestal, devido às intervenções antrópicas, que reduzirá de forma significativa a capacidade de absorção de água pelo solo, decorrente da ausência da serapilheira que tornará o solo mais exposto e compactado. Ao lado disso, está a redução das taxas de infiltração do solo e o aumento do escoamento superficial, ocasionando inundações na época de chuva e uma menor disponibilidade de água e umidade no solo na época de seca. As florestas, ainda, contribuem para a manutenção da vazão na época de estiagem, o que reforça a necessidade do bom manejo das bacias para o estabelecimento de uma quantidade de água adequada às demandas locais. As florestas, também, tendem a melhorar a qualidade da água, ao reduzir o volume de sedimentos disponíveis por erosão e movimentos de massa (CASSIANO, 2013; BACELLAR, 2005).

Diante deste contexto, ao analisar os dados referente aos anos de 1987 a 1997 observa-se um aumento de 23,7% das áreas diretamente afetadas pela mineração. Neste mesmo período os valores máximos e mínimos de vazão foram 104,25 m³/s em janeiro de 1991; e 13,89 m³/s em julho de 1989. Além disso, ressalta-se que 9 amostras apresentaram valores discrepantes, isto é, dados cuja vazão média ultrapassaram os 61,09 m³/s, todos concentrados no período chuvoso (dezembro, janeiro e fevereiro).

Entre 1997 e 2007 a análise multitemporal das imagens *Landsat* aponta um aumento de 81,9% das áreas diretamente afetadas pela mineração, a maior variação de todo o período considerado pela pesquisa. Na mesma época registra-se a máxima vazão de toda a série histórica, 113,72 m³/s, em janeiro de 2003, que é também o valor máximo da vazão registrado neste intervalo. O valor mínimo da vazão média constatado foi de 11,43 m³/s, em julho de 2000. Salienta-se que neste intervalo de tempo foram registradas 6 amostras com valores discrepantes, ou seja, dados cuja vazão média ultrapassaram os 61,09 m³/s, todos concentrados no período chuvoso (dezembro, janeiro, fevereiro e março).

No intervalo de 2007 a 2017 a análise multitemporal das imagens *Landsat* indica a menor variação das áreas diretamente afetadas pela mineração, cerca de 17%, o que equivale a um aumento de 4,5km² das áreas mineradas em comparação ao período anterior. Nesta época, também observa-se a mínima vazão registrada em todo o intervalo de análise da pesquisa – 9,61m³/s, que ocorreu em setembro de 2014, período seco. No entanto, somado a este fenômeno, o ano de 2014 também foi marcado por uma grande

estiagem no Sudeste brasileiro, o que agravou a situação de seca na região, reduzindo significativamente a vazão dos rios. Por outro lado, o valor máximo computado foi de 108,77 m³/s em dezembro de 2008, período anterior a estiagem. Neste período 9 amostras apresentaram valores discrepantes, isto é, dados cuja vazão média ultrapassa os 61,09 m³/s, todos concentrados no período chuvoso (dezembro, janeiro e fevereiro).

De maneira geral, a análise multitemporal revela um aumento de 164% das áreas diretamente afetadas pela mineração no município de Nova Lima, entre 1987 e 2017, o que representa uma expansão de 18,94km². No tocante, aos dados da vazão média verifica-se 24 pontos discrepantes em um total de 334 amostras. Estes pontos discrepantes ultrapassam 61,09 m³/s e podem ser caracterizados como os picos de vazão da série temporal, os quais ocorrem, especialmente, no período chuvoso.

Face ao exposto, comparando-se a literatura com os resultados obtidos pela pesquisa, constata-se que a supressão da vegetação e a impermeabilização do solo causadas pela expansão das áreas de mineração podem causar impactos na vazão média e na distribuição sazonal dos recursos hídricos no município de Nova Lima. A análise dos resultados aponta picos de vazão na época de chuva e uma menor disponibilidade de água na época de seca, consequências do aumento do escoamento superficial e da diminuição das taxas de infiltração do solo.

Desta forma, os impactos causados nos recursos hídricos do município de Nova Lima, decorrentes da mineração podem ser avaliados segundo a Resolução do Conama 01/86, como: negativos, indiretos, a médio e longo prazo, permanentes, reversíveis e cumulativos.

O impacto é avaliado como negativo, pois verifica-se uma alteração adversa na quantidade do regime dos recursos hídricos das áreas de influência dos empreendimentos minerários. Com relação à origem, o impacto pode ser considerado indireto, visto que é decorrente de um impacto direto – a degradação da qualidade do solo, e se manifesta em toda a bacia hidrográfica. No que tange à escala temporal, o impacto na vazão média decorrente da expansão da mineração é caracterizado como de médio e longo prazos, uma vez que não ocorre simultaneamente à ação que os gera, ao contrário, ocorre com uma certa defasagem em relação à ação que o gera. No que concerne à duração, pode ser avaliado como permanente, tendo em vista que a alteração ocorrida pode ser definitiva.

Por outro lado, a situação pode ser reversível. Embora a regularização da vazão possa levar décadas, o ambiente possui a capacidade de retornar ao seu estado anterior caso: (i) cesse a degradação do solo; (ii) as áreas degradadas sejam reabilitadas. Por fim, os impactos na vazão média podem ser classificados como cumulativos, visto que se acumulam no tempo e no espaço, e caracteriza-se como resultado de uma combinação de efeitos decorrentes de uma ou diversas ações, como a concentração de empreendimentos minerários, a expansão da urbanização, novos loteamentos e condomínios e o incremento da infraestrutura rodoviária na região; todas estas atividades causam supressão de vegetação e degradam o solo, o que pode gerar impactos na quantidade do regime dos recursos hídricos.

Como já mencionado, o município de Nova Lima têm passado por inúmeros processos, dentre eles a expansão da urbanização, novos loteamentos e condomínios e o incremento da infraestrutura rodoviária, que também podem alterar a vazão e o ciclo hidrológico na região. Desta forma, não é possível associar todos os impactos ocorridos nos recursos hídricos à atividade minerária.

7. CONCLUSÃO

Tendo em vista que a mineração é uma atividade que pode causar impactos locais e regionais, dados de sensoriamento remoto combinados com a análise estatística de dados derivados de monitoramentos *in situ* configura-se como uma técnica bastante promissora na avaliação de impactos ambientais, uma vez que o sensoriamento remoto proverá informações regionais, enquanto os dados de coleta *in situ* irão fornecer informações pontuais, permitindo uma avaliação sistêmica dos impactos causados pela mineração nas regiões onde atuam.

Neste contexto, o presente trabalho, por meio de análise multitemporal de imagens de satélites *Landsat* e análise estatística de dados de uma série histórica de vazão média, conseguiu analisar as transformações que ocorreram no uso do solo do município de Nova Lima, Minas Gerais devido à expansão da atividade minerária. Para isso, as imagens do satélite *Landsat*, dos anos de 1987, 1997, 2007 e 2017, foram processadas e interpretadas com vistas à identificação e delimitação das áreas mineradas. Na sequência foi possível quantificá-las. Assim, a partir dos resultados obtidos foi possível identificar e analisar os impactos causados nos recursos hídricos, decorrentes da expansão da atividade minerária.

Desta forma, conclui-se que a supressão da vegetação e a impermeabilização do solo causadas pela expansão das áreas de mineração podem gerar impactos na vazão média e na distribuição sazonal dos recursos hídricos no município de Nova Lima. Por fim, os impactos foram avaliados como negativos, indiretos, a médio e longo prazo, permanentes, reversíveis e cumulativos.

Finalmente, é importante ressaltar que este trabalho não pretende ser exaustivo e acabado, visto que os procedimentos e técnicas para a identificação e delimitação das áreas afetadas pela mineração podem ser aperfeiçoados, visando um cálculo de área mais preciso; podem ser incluídos outros parâmetros quantitativos, como as vazões mínimas e máximas, assim como dados qualitativos da água para subsidiar a análise dos impactos; ao mesmo tempo pode-se expandir a área de estudo, ao considerar a bacia do Alto Rio das Velhas, região que compreende todo o Quadrilátero Ferrífero, objetivando uma análise mais detalhada e real dos impactos nos recursos hídricos decorrentes da mineração na região.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, A. Q. de et al. Relação entre cobertura florestal e resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto,, 14., 2009, Natal. **Anais...** . Natal: Inpe, 2009. p. 2507 - 2513.

ARCOVA, F. C. S.; CICCO, V. de; ROCHA, P. A. B.. Precipitação Efetiva e Interceptação das Chuvas Por Floresta de Mata Atlântica em uma Microbacia Experimental em Cunha, São Paulo. **Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p.257-262, 19 fev. 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (Org.). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Brasília: ANA, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Os Efeitos das Mudanças Climáticas sobre os Recursos Hídricos: Desafios Para a Gestão**. Brasília: ANA, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos: Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos**. Brasília: SAG, 2011. 50 p.

BACELLAR, Luiz de A. P.. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. **Geo.br**, Ouro Preto, v. 1, n. 1, p.1-39, jan. 2005.

BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p.131-149, abr. 2008.

BAYER, D. M.. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**.2014. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BRASIL. Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília, DF.

BRASIL. Lei 6.938, de 31 de agosto 08 de 1981. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília, DF.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; RIBEIRO, R. R.. Sensoriamento Remoto Aplicado na Detecção de Áreas Degradadas Pela Mineração No Sul Do Brasil Entre 1985 - 2011. **Tecnológico**, Santa Cruz do Sul, v. 20, n. 2, p.97-102, jun. 2016.

CASSIANO, Carla Cristina. **O papel dos remanescentes florestais na manutenção da qualidade da água em microbacias agrícolas**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C.. **Gestão de águas: princípios e práticas**. PortoAlegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH, 2003.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; RIBEIRO, R. R.. Sensoriamento Remoto Aplicado na Detecção de Áreas Degradas pela Mineração no Sul do Brasil entre 1985 - 2011. **Tecno Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 20, p.97-102, dez. 2016.

CHAROU, E. et al. Using Remote Sensing to Assess Impact of Mining Activities on Land and Water Resources. **Mine Water Environ.** Athens, p. 45-52. fev. 2010.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R.. **Introduzindo hidrologia**. 5. ed. Porto Alegre: UFRG, 2008.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS (CBH-VELHAS). **A Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas**. 2014. Disponível em: <<http://cbhvelhas.org.br/a-bacia-hidrografica-do-rio-das-velhas/>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS (CBH-VELHAS). **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas**: Plano Diretor Consolidado. Belo Horizonte: CBH - Velhas, 2015.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Publicado no DOU 01/02/86.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Publicado no DOU 22/12/97.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI) e INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Mineração e economia verde**. Brasília: CNI, 2017.

CNI & IBRAM. **Mineração e economia verde**. Encontro da indústria para a sustentabilidade. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002708.pdf>>. Acesso em 28 ago. 2017.

DI MAIO, Angélica al. **Sensoriamento Remoto**. Brasília: Agência Espacial Brasileira, 2008.

DINIZ, J. M. F. de S. et al . Detecção da expansão da área minerada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, no período de 1985 a 2011 através de técnicas de sensoriamento remoto. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba , v. 20, n. 3, p. 683-700, set. 2014 .

FLORENZANO, T. G.. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Nova Lima**: Histórias & Fatos. 2015. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/nova-lima/historico>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM) (Brasília). **Gestão para a sustentabilidade na mineração**: 20 anos de história. Brasília: IBRAM, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Panorama da Mineração em Minas Gerais**. Brasília: IBRAM, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Teoria : Processamento de Imagens**. 2014. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/realce/realce.htm>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

JENSEN, J. R.. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parênteses, 2009.

LANNA, A. E.. Gestão dos Recursos Hídricos. In: TUCCI, Carlos E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Cap. 19. p. 727-764

LATIFOVIC, R. et al. Assessing land cover change resulting from large surface mining development. **International Journal of Applied Earth Observation And Geoinformation**. Toronto, p. 29-48. nov. 2004.

LEITE, D. V. Brier; MOURA, A. C. M.; MAGALHÃES, D. M. de. Estudo de evolução temporal da paisagem do Quadrilátero Ferrífero através de classificação de imagens de satélite. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** . São José dos Campos: Inpe, 2011. v. 15, p. 6293 - 6300.

KUMAR, G. S.; REDDY, A. N. . Application of remote sensing to assess environmental impact of limestone mining in the Ariyalur district of Tamilnadu, India. **Journal Of Geomatics**. Ahmedabad, p. 158-163. out. 2016.

MCINTYRE, N. et al. A multi-disciplinary approach to understanding the impacts of mines on traditional uses of water in Northern Mongolia. **Science of The Total Environment**. Brisbane, p. 404-4014. mar. 2016.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: UNB, 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Ciclo Hidrológico**. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em: 17 set. 2017.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL. **Deficiências em estudos de impacto ambiental: síntese de uma experiência**. Brasília: Escola Superior do Ministério Público, 2004.

MORAES, C. D. de; D'AQUINO, C. de A.. Avaliação de Impacto Ambiental: uma revisão da literatura sobre as principais metodologias. In: 15º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, 15, 2016, Florianópolis. **SICT-Su**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

MOURA, Priscilla et al. Avaliação ambiental para restauração hidrológica e fluvial em áreas degradadas por atividades de mineração. **Rega: Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p.5-19, jun. 2014.

OLIVEIRA, M. S. L. de; FORTES, P. de T. F. de O.. Análise multitemporal do crescimento de áreas de mineração nos marmores da Serra de Itaoca, sul do Espírito Santo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, 18., 2017, Santos. *Anais...* Santos: Inpe, 2017. p. 5424 - 5431.

PAZ, A. R. da. **Hidrologia Aplicada**. Porto Alegre: Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2004.

PREFEITURA DE NOVA LIMA, MG - **Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima – MG PMSB**: Produto I Diagnóstico Setorial Drenagem E Manejo Das Águas Pluviais. Nova Lima: Secretaria de Meio Ambiente - SMA, 2016.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A.. O Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: Aspectos sobre sua História, seus Recursos Minerais e Problemas Ambientais Relacionados. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 18, n. 1, p.33-37, 2010

ROMACHELI, R. de A.. **Avaliação de Impactos Ambientais: Potencialidades e Fragilidades**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão Econômica do Meio Ambiente, Departamento de Economia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROUDGARMI, P. et al. Environmental impact prediction using remote sensing images. **Journal Of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering**. Hangzhou, p. 381-390. jan. 2008.

SANCHEZ, .L H. **Avaliação de impacto ambiental**. Conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

SANTOS, R. **Planejamento ambiental**: Teoria e prática. São Paulo: Oficina de textos, 2004. SCHUELER, V.; KUEMMERLE, T.; SCHRODER, H.. Impacts of Surface Gold Mining on Land Use Systems in Western Ghana. **AMBIO**. Berlim, p. 528-539. mar. 2011.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.. **Gestão de recursos hídricos**: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Viçosa: Folha de Viçosa, 2000. 659 p.

SOUZA, R. B. de. **Sensoriamento Remoto: conceitos fundamentais e plataformas**. Santa Maria: Inpe, 2010. 76 slides, color. Disponível em: <http://www.inpe.br/crs/crectealc/pdf/ronald_ceos.pdf>. Acesso em: 23 out. 2017.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**: Ciência e Aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

USGS, UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat Missions**. 2017. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 29 ago. 2017.

VALERA, C. A.. A avaliação ambiental integrada dos impactos cumulativos e sinérgicos dos empreendimentos minerários. **Ministério Público de Estado de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<https://aplicacao.mpmg.mp.br/xmlui/handle/123456789/1086>>. Acesso em: 23 out. 2017

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Ambiental/UFMG, 2005.

VOROVENCII, I.. Satellite remote sensing in environmental impact assessment: an overview. **Bulletin of the Transilvania University of Brașov**. Brasov, p. 73-80. jan. 2011.

ZHANG, B. et al. Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas. **Environmental Earth Sciences**. Beijing, p. 649-658. maio 2011.