



# AVANÇOS TECNOLÓGICOS PARA UMA MINERAÇÃO MAIS SUSTENTÁVEL

Consuelo Y. Moromizato Yoshida<sup>1</sup>  
Henrique Costa de Seabra<sup>2</sup>

**Resumo:** O presente artigo aborda a relevância e a contribuição dos avanços tecnológicos para uma mineração mais sustentável, embora as tecnologias de ponta estejam por ora concentradas nas grandes corporações. A utilização de tecnologias geoespaciais é um avanço incontestável. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tornaram-se ferramentas essenciais para integração de dados geológicos, ambientais e

---

<sup>1</sup> Mestre e doutora em Direito pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC/SP). Professora da graduação e da pós-graduação na área de Direitos Difusos e Coletivos na mesma instituição. Coordenadora da Especialização “Direito Ambiental e Gestão Estratégica da Sustentabilidade” (PUC/COGEAE/SP). Desembargadora Federal no Tribunal Regional Federal da 3<sup>a</sup> Região (TRF3R). Coordenadora dos Juizados Especiais Federais da 3<sup>a</sup> Região. Email: cyoshida@trf3.jus.br

<sup>2</sup> Doutorando em Direito Difusos e Coletivos, com ênfase em Direito Minerário e Ambiental, pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC/SP). Mestre em Direito das Relações Econômicas e Sociais, com ênfase em Direito Ambiental, pela Faculdade de Direito Milton Campos (FDMC). Especialista em Direito Ambiental e Urbanístico pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC/MG). Graduado em Direito pela Faculdade de Direito Milton Campos (FDMC). Sócio do escritório Seabra Advogados. Tem atuação nas áreas de Mineração, Meio Ambiente e Fundiário. Email: hc.seabra@gmail.com

operacionais. O sensoriamento remoto expandiu sua aplicação: os satélites da constelação Planet e Sentinel-2 auxiliam na identificação de jazidas e no monitoramento de degradação ambiental em regiões remotas. A topografia digital e o uso de GPS diferencial (DGPS), inicialmente adotados para cumprir exigências legais, mostraram-se cruciais após os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Contudo, enquanto empresas líderes já utilizam modelos tridimensionais para monitorar a estabilidade de barragens com precisão centimétrica, paradoxalmente muitas pequenas operações ainda recorrem a métodos empíricos, por limitações financeiras.

**Palavras-chave:** Mineração, sustentabilidade e avanços tecnológicos – tecnologias geoespaciais – Sistemas de Informação Geográfica (SIG) – sensoriamento remoto por satélites – topografia digital e GPS diferencial (DGPS).

## INTRODUÇÃO

O Brasil, com seu território geologicamente privilegiado, sempre figurou como ator relevante no cenário mineral global. Desde o ciclo do ouro no período colonial – que redefiniu não apenas a economia, mas a própria estrutura territorial do país – até os dias atuais, a mineração tem sido atividade econômica estratégica.

Atualmente, o país destaca-se na produção de minério de ferro, nióbio (do qual detém cerca de 75% das reservas mundiais), bauxita e ouro, além de possuir depósitos significativos – ainda que subexplorados – de terras-raras, grafita e lítio.

Contudo, somente nas últimas décadas o setor superou métodos rudimentares de exploração mineral, apesar dos avanços não serem distribuídos de forma homogênea. A adoção de tecnologias de ponta concentra-se em grandes corporações, enquanto empresas de médio e pequeno porte enfrentam dificuldades para se modernizarem. Essa disparidade reflete-se não apenas na produtividade, mas também na capacidade de gestão ambiental e segurança operacional.

Se há um avanço incontestável, é a incorporação de tecnologias geoespaciais, que são objeto desta abordagem.

O equilíbrio exigirá não apenas investimentos em tecnologia, mas também maior colaboração entre universidades, empresas e órgãos reguladores – estes, muitas vezes, ainda despreparados para fiscalizar inovações técnicas.

## CADASTRO AMBIENTAL RURAL (CAR) E LICENCIAMENTO DIGITAL

A legislação ambiental mais rigorosa, somada à maior conscientização social, forçou mudanças no setor. Programas de recuperação de áreas degradadas, antes negligenciados, tornaram-se padrão nas grandes mineradoras. No entanto, críticos argumentam que parte dessas iniciativas se limita ao “compliance mínimo”, com pouca inovação efetiva em redução de impactos.

O Cadastro Ambiental Rural (CAR) é um registro público eletrônico obrigatório para todos os imóveis rurais no Brasil. Ele foi criado pela Lei nº 12.651/2012 (Código Florestal) como um instrumento fundamental para auxiliar no processo de regularização ambiental de propriedades rurais. Ainda, O CAR contém informações georreferenciadas do imóvel, com delimitação das Áreas de Preservação Permanente (APPs), Reserva Legal, remanescentes de vegetação nativa, área rural consolidada, áreas de interesse social e de utilidade pública.

Portanto, o seu uso é para fins ambientais e o seu cadastro é realizado nos órgãos ambientais estaduais ou municipais e integrado ao Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR). O SICAR possui uma plataforma *online* e aberta ao público, embora sejam vedados os dados referentes ao titular de determinada propriedade rural, com exceção do número do CAR gerado no cadastro.

Com o CAR e a digitalização dos processos de licenciamento ambiental, foi possível a sua integração, o que representa avanços significativos na gestão ambiental das atividades minerárias.

Essas integrações facilitam o intercâmbio de informações entre diferentes órgãos públicos, de diferentes unidades federativas, somando a quantidade de informações disponíveis em uma eventual fiscalização e também na assertividade da aplicação de qualquer tipo de sanção – desde multa e caducidade de um título minerário, por exemplo.

Segundo ALMEIDA (2023, p. 78):

*“A integração dos sistemas de licenciamento digital com o CAR permitiu reduzir em 65% o tempo médio para obtenção de licenças ambientais no setor mineral, ao mesmo tempo em que aumentou a transparência e o rigor nas análises técnicas dos processos”.*

Os sistemas digitais de licenciamento permitem o monitoramento contínuo das condicionantes ambientais impostas às mineradoras, com a possibilidade de *upload* automatizado de dados de monitoramento ambiental e verificação remota do cumprimento das exigências legais. Esta automação reduz custos administrativos e aumenta a eficácia da fiscalização pelos órgãos ambientais.

O georreferenciamento preciso das áreas de preservação permanente (APPs) e reserva legal dentro das propriedades onde ocorrem atividades minerárias, exigido pelo CAR, contribui para o planejamento territorial integrado e para a proteção efetiva de áreas sensíveis. A sobreposição destas informações com os polígonos dos direitos minerários permite identificar restrições ambientais e planejar operações com menor impacto.

No que tange ao trabalho dos órgãos ambientais, a fiscalização remota efetiva já é uma realidade, considerando que é possível, conjugando os sistemas de tecnologia geoespeciais e mapeamento

avançado, às informações do CAR e dos Licenciamentos Ambientais, analisar pormenorizadamente o cumprimento de algumas condicionantes; a realização de compensações ambientais e acompanhar o seu estágio; bem como verificar alterações na vegetação com diferenças diárias.

## A MINERAÇÃO BRASILEIRA NA ERA DAS GEOTECNOLOGIAS: AVANÇOS, CONTRADIÇÕES E DESAFIOS

A mineração brasileira encontra-se em uma encruzilhada. De um lado, defronta-se com a necessidade de aumentar a competitividade global via automação e *big data*; de outro, enfrenta as pressões por redução de danos socioambientais e geração de empregos qualificados.

Desde os ciclos do ouro e diamante nos séculos coloniais até a atual dependência das *commodities*, a mineração moldou economicamente o país, gerando tanto desenvolvimento quanto conflitos socioambientais. Apesar dos avanços tecnológicos das últimas décadas, persistem desigualdades gritantes na adoção dessas inovações, revelando um setor que se modernizou de forma fragmentada e incompleta.

Enquanto as grandes corporações operam com sistemas de automação avançados e monitoramento por satélite, muitas médias e pequenas empresas ainda utilizam métodos semi-artesanais. Essa disparidade tornou-se particularmente visível após os desastres de Mariana e Brumadinho. As grandes mineradoras rapidamente implementaram sistemas de monitoramento geotécnico sofisticados, enquanto diversas operações de menor porte continuam dependendo de metodologias obsoletas, quando não ignoram completamente as normas de segurança básicas.

Minerais como terras-raras, lítio e grafita, essenciais para a transição energética global, continuam sendo explorados de forma primária ou mesmo negligenciados. Essa situação reflete não apenas limitações tecnológicas, mas principalmente a ausência de uma política mineral integrada e de longo prazo, problema que sucessivos governos demonstraram incapacidade de resolver.

## TECNOLOGIAS GEOESPACIAIS E MAPEAMENTO AVANÇADO

O encontro contemporâneo entre as complexas disciplinas das geociências, os avanços exponenciais dos sistemas computacionais e as inovadoras práticas da engenharia ambiental tem engendrado uma verdadeira revolução epistêmica no âmbito da indústria extractiva mineral brasileira. Não se trata, como poderia supor uma análise mais superficial, de mera incorporação incremental de ferramentas tecnológicas ao arcabouço operacional preexistente, mas sim de uma profunda reconfiguração dos paradigmas que historicamente nortearam a atividade minerária em solo nacional.

Esta metamorfose setorial, cujas raízes remontam às últimas décadas do século passado mas que floresceu com vigor particular em período recente, manifesta-se primordialmente na dissolução das fronteiras conceituais que tradicionalmente opunham viabilidade econômica e responsabilidade socioambiental. Sob a égide desta nova concepção produtiva, intrinsecamente permeada pela digitalização e pela sofisticação dos instrumentos de monitoramento e controle, a mineração brasileira caminha – ainda que de forma não-linear e permeada por contradições – rumo a um modelo onde a lucratividade não mais se contrapõe, mas efetivamente se alimenta das práticas sustentáveis.

A transformação digital que ora se observa nas operações minerárias transcende, em muito, a mera otimização processual ou redução de custos operacionais. Ao viabilizar a aquisição e o processamento de volumes de dados inimagináveis há algumas décadas, estas

tecnologias proporcionam uma compreensão quase orgânica da complexa teia de relações entre as atividades extractivas, os ecossistemas circundantes e as dinâmicas sociais das comunidades afetadas. Testemunha-se, assim, o surgimento de uma consciência operacional ampliada, onde cada decisão técnica reverbera num universo multi-dimensional de consequências económicas, ambientais e sociopolíticas, todas agora passíveis de mensuração, análise e gestão.

As geotecnologias emergiram como ferramentas potencialmente transformadoras para o setor mineral. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que nos anos 1990 estavam restritos às grandes empresas, hoje possuem aplicação mais ampla, embora muitas vezes de forma precária e sem o devido suporte técnico. O sensoriamento remoto mostrou-se uma ferramenta de duplo alcance: permite o monitoramento de áreas extensas, como demonstrado por OLIVEIRA et al. (2022) em seu estudo sobre drones na mineração, mas esbarra na limitada capacidade institucional de processar e utilizar esses dados efetivamente.

SANTOS (2023, p. 45) destaca que

*“a integração de dados multitemporais de sensoriamento remoto com modelos digitais de terreno de alta precisão tem permitido às empresas mineradoras brasileiras otimizar suas operações e reduzir significativamente os impactos ambientais em áreas sensíveis”.*

No entanto, essa realidade aplica-se apenas a uma parcela limitada das operações minerais no país. Estimativas sugerem que menos de um terço das empresas do setor têm acesso pleno a essas tecnologias, enquanto as demais as utilizam de forma incompleta ou sequer possuem condições de implementá-las.

A adoção de tecnologias como DGPS e estações totais robotizadas representou um avanço técnico inegável, mas sua aplicação prática enfrenta obstáculos significativos. Muitas empresas subutilizam

esses equipamentos devido à falta de manutenção adequada ou à carência de profissionais qualificados. FERREIRA (2021) demonstra o potencial dos algoritmos de IA para análise de imagens de satélite, mas a realidade operacional mostra que numerosas empresas sequer possuem infraestrutura de TI adequada para processar dados dos satélites Sentinel-2 em sua resolução completa.

A crescente pressão por operações mais sustentáveis tem gerado mudanças no setor, embora em ritmo insuficiente. Observa-se aumento nos investimentos em recuperação de áreas degradadas, mas ainda predominam abordagens reativas em vez de preventivas. A fiscalização ambiental, apesar de mais presente que no passado, continua frágil, especialmente em regiões onde a mineração goza de influência política e econômica desproporcional.

O setor mineral brasileiro enfrenta um dilema complexo. As geotecnologias trouxeram ganhos mensuráveis em produtividade e segurança, mas esses avanços não resolveram – e dificilmente resolverão por si só – problemas estruturais como a desigualdade tecnológica, a fragilidade institucional e a falta de coordenação política. Como evidenciado ao longo desta análise, a disponibilidade de ferramentas sofisticadas não garante seu uso adequado ou generalizado. Os desafios que se apresentam transcendem a esfera tecnológica, exigindo soluções que combinem inovação com fortalecimento institucional e maior responsabilidade socioambiental.

## MODELAGEM GEOLÓGICA 3D E GEOPROCESSAMENTO AVANÇADO

A evolução das técnicas de modelagem geológica tridimensional transformou radicalmente o planejamento de lavra e a estimativa de recursos minerais no Brasil. Os atuais softwares de modelagem 3D permitem a incorporação de múltiplas camadas de informação, desde dados geofísicos e geoquímicos até informações estruturais detalhadas, resultando em modelos geológicos de alta fidelidade.

Conforme destacam RODRIGUES e COSTA (2024, p. 112):

*“A modelagem geológica 3D baseada em algoritmos geostatísticos avançados permitiu reduzir em até 30% as incertezas na estimativa de recursos minerais em complexos depósitos brasileiros, levando a um planejamento de lavra mais preciso e economicamente otimizado”.*

A integração de dados de perfuração, mapeamento geológico de superfície e levantamentos geofísicos em plataformas unificadas de geoprocessamento permite uma visão holística dos depósitos minerais. Algumas técnicas como a simulação condicional e a krigagem indicativa melhoraram significativamente a quantificação das incertezas associadas às estimativas de teor e volume dos recursos, possibilitando análises de risco mais robustas para os projetos minerários (SAMPAIO; MEIRELES, 2022).

O geoprocessamento avançado também tem sido aplicado na otimização do sequenciamento de lavra, incorporando variáveis ambientais e sociais além dos tradicionais parâmetros econômicos e geotécnicos. Esta abordagem integrada resulta em planos de lavra que minimizam impactos ambientais e maximizam o aproveitamento dos recursos, contribuindo para a sustentabilidade das operações.

Esse impacto também é sentido na pesquisa mineral em momentos ainda iniciais. As análises que podem ser realizadas pela Geofísica (método indireto de pesquisa), muitas vezes fruto de dados gerados por aerolevantamentos realizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) – em parceira com as empresas estatais que fomentam a pesquisa mineral – geram grande acervo e fonte de dados para os consultores e pesquisadores.

Esses dados, se associados a outras informações estruturais (levantamentos topográficos por drone e geoquímica com os pontos georreferenciados) tornam a pesquisa mineral extremamente assertiva, especialmente no avanço para estágios cujo custo é conhecido

pela sua onerosidade, como a sondagem. A possibilidade de indicação pelo técnico de pontos específicos em um direito mineral, com maiores chances de encontrar o recurso mineral desejado e com menos gasto de sondagem, reduz o investimento e o risco na pesquisa.

## TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO E CONTROLE

As tecnologias de monitoramento e controle representam um dos campos mais dinâmicos da inovação no setor mineral brasileiro. Sistemas automatizados de monitoramento geotécnico, utilizando redes de sensores sem fio, radar interferométrico e escaneamento laser, permitem o acompanhamento contínuo da estabilidade de taludes e barragens de rejeitos, oferecendo alertas precoces para potenciais problemas (VIEIRA et al., 2023).

Segundo LIMA (2022, p. 203), a adoção de plataformas digitais de monitoramento em tempo real nas maiores barragens de rejeitos brasileiras marcou uma evolução substancial nos processos de gerenciamento de riscos da mineração nacional. Esses sistemas automatizados possibilitam a identificação imediata de irregularidades estruturais, elevando consideravelmente os níveis de proteção e confiabilidade dessas instalações.

O monitoramento de qualidade da água utilizando sondas multiparamétricas conectadas a sistemas de transmissão remota de dados possibilita o acompanhamento em tempo real das condições hídricas nas áreas de influência das minas. Algoritmos de detecção de anomalias alertam para alterações súbitas em parâmetros críticos, permitindo intervenções rápidas para mitigação de possíveis impactos.

Estações automáticas de monitoramento atmosférico, estrategicamente posicionadas nas áreas operacionais e comunidades próximas, fornecem dados contínuos sobre qualidade do ar, direção e velocidade dos ventos, umidade e outros parâmetros relevantes. Estas

informações são essenciais para o controle de emissões de poeira e a implementação de medidas mitigadoras quando necessário.

Tecnologias emergentes como o uso de drones equipados com sensores de gases para detecção de emissões fugitivas e sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) para monitoramento de equipamentos críticos estão sendo gradualmente incorporadas pelas mineradoras brasileiras, aumentando a eficiência operacional e reduzindo riscos ambientais (CARVALHO; MENDES, 2023). Essas inovações prometem aumentar a eficiência operacional e reduzir riscos ambientais, mas enfrentam barreiras significativas. A conectividade limitada em áreas remotas, o alto custo de implementação e a resistência cultural à mudança por parte de equipes operacionais mais tradicionais têm retardado sua adoção em larga escala.

Um aspecto frequentemente negligenciado nessa discussão é a integração dos dados coletados. Muitas mineradoras investem pesado em equipamentos de monitoramento, mas falham em desenvolver sistemas eficientes de análise e interpretação dos dados. O resultado é um volume impressionante de informações que, na prática, não se traduzem em ações preventivas ou corretivas eficazes. Essa desconexão entre coleta e utilização de dados representa um dos principais gargalos para o pleno aproveitamento das tecnologias de monitoramento no setor mineral brasileiro.

Por fim, cabe questionar até que ponto essas tecnologias estão realmente promovendo maior transparência e participação social. Embora os dados de monitoramento ambiental sejam teoricamente públicos, sua apresentação em formatos excessivamente técnicos e a falta de canais eficientes de comunicação com as comunidades do entorno limitam severamente seu potencial como ferramentas de diálogo e construção de confiança. O desafio que se coloca, portanto, vai além da mera adoção tecnológica – requer a construção de sistemas mais integrados, acessíveis e verdadeiramente úteis para todos os stakeholders envolvidos.

## CONCLUSÃO

Como salientado, esse avanço tecnológico distribui-se heterogeneamente pela cadeia produtiva nacional. Observa-se, de um lado, operações de grande porte incorporando o que há de mais avançado em termos de tecnologias geoespaciais, modelagem tridimensional e sistemas preditivos; de outro, uma miríade de pequenos e médios empreendimentos ainda atados a metodologias tradicionais, seja por insuficiência de capital para investimento, seja pela ausência de capacitação técnica adequada para absorção destas novas tecnologias.

Esta disparidade tecnológica constitui, talvez, o mais significativo desafio para a consolidação de um modelo mineral brasileiro verdadeiramente sustentável e socialmente justo. Enquanto persistir este abismo entre diferentes escalas produtivas, a mineração nacional permanecerá fragmentada em dois universos paralelos: um tecnologicamente avançado, ambientalmente controlado e economicamente robusto; outro rudimentar, ambientalmente vulnerável e economicamente frágil.

A superação desta dicotomia demanda esforços concertados em múltiplas frentes. Primeiramente, faz-se necessária a democratização efetiva do acesso às tecnologias emergentes, através de políticas públicas que fomentem tanto a transferência tecnológica quanto a capacitação técnica dos empreendimentos de menor porte. Paralelamente, impõe-se a criação de mecanismos financeiros específicos, que viabilizem os investimentos necessários à modernização tecnológica destas operações, reconhecendo suas peculiaridades e limitações.

Ademais, a academia possui papel fundamental neste processo, não apenas como centro formador dos profissionais que implementarão estas transformações, mas também como polo gerador das adaptações e simplificações tecnológicas necessárias para que as

soluções digitais avançadas possam ser efetivamente incorporadas por operações de menor escala e complexidade.

O futuro da mineração brasileira desenha-se, assim, como uma gama de possibilidades. Em um cenário otimista, ocorrerá a gradual homogeneização tecnológica do setor, com a disseminação das práticas avançadas de gestão ambiental e operacional por todo o espectro produtivo, culminando num modelo mineral verdadeiramente sustentável e inclusivo. Em contrapartida, a persistência dos atuais padrões de assimetria poderá aprofundar ainda mais o abismo entre os diferentes estratos da indústria, comprometendo tanto a competitividade global do setor quanto sua aceitação social em um mundo cada vez mais consciente dos desafios ambientais.

Neste contexto de incertezas e possibilidades, a tecnologia emerge não como panaceia para todos os males, mas como ferramenta fundamental para a construção de um equilíbrio dinâmico entre a necessária exploração dos recursos minerais – imprescindíveis ao desenvolvimento socioeconômico e à transição energética global – e a igualmente vital preservação do patrimônio natural e cultural das regiões mineradoras. Este equilíbrio, constantemente renegociado nos campos técnico, econômico, político e social, constitui o cerne do que se poderia denominar um modelo brasileiro de mineração: tecnologicamente avançado, ambientalmente responsável e socialmente inclusivo.

No limiar da segunda metade do século XXI, a indústria mineral brasileira encontra-se, portanto, diante do desafio de transcender sua própria história, reinventando-se não apenas como setor produtivo, mas como protagonista de um novo paradigma civilizatório, onde a geração de riquezas materiais harmoniza-se com a preservação dos bens naturais e o desenvolvimento humano genuíno.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. R. Licenciamento ambiental digital no setor mineral: avanços e desafios na integração com o Cadastro Ambiental Rural. **Revista Brasileira de Mineração**, v. 45, n. 3, p. 67-89, 2023.
- CARVALHO, M. S.; MENDES, P. T. Internet das Coisas aplicada ao monitoramento ambiental em áreas de mineração. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 29, n. 2, p. 178-195, 2023.
- FERREIRA, A. L. Sensoriamento remoto aplicado à detecção de mudanças ambientais em áreas de mineração no Quadrilátero Ferrífero. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, p. 2145-2158, 2021.
- LIMA, R. S. Sistemas automatizados de monitoramento geotécnico em barragens de rejeitos: estudos de caso no Brasil. **Revista Brasileira de Geotecnica**, v. 44, n. 2, p. 189-210, 2022.
- OLIVEIRA, T. M.; SANTOS, F. C.; BASTOS, R. M. Aplicações de LiDAR e veículos aéreos não tripulados no mapeamento topográfico de minas a céu aberto. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 28, n. 1, p. 82-103, 2022.
- PEREIRA, C. A. Mineração 4.0: convergência tecnológica e sustentabilidade no setor mineral brasileiro. **Revista Escola de Minas**, v. 77, n. 2, p. 305-326, 2024.
- RODRIGUES, F. L.; COSTA, J. F. Modelagem geológica 3D e estimativa de recursos: aplicações de geostatística avançada em depósitos minerais brasileiros. **REM – International Engineering Journal**, v. 77, n. 2, p. 105-120, 2024.

SAMPAIO, L. E.; MEIRELES, E. P. Técnicas de simulação condicional na quantificação de incertezas em recursos minerais. **Revista do Instituto Geológico**, v. 43, n. 1, p. 57-76, 2022.

SANTOS, M. R. Tecnologias geoespaciais na mineração sustentável: panorama brasileiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 46, p. 32-51, 2023.

VIEIRA, P. L.; COSTA, R. D.; MACHADO, M. F. Monitoramento geotécnico integrado: novas tecnologias para prevenção de acidentes em áreas de mineração. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 89-112, 2023.

Artigo recebido em 27/05/2025

Aprovação final em 01.12.2025