



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

MATHEUS WANDERLEY DE ALMEIDA

SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO RELEVO NO LONGO TEMPO: SUBSÍDIO À
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

Rio de Janeiro

2024

MATHEUS WANDERLEY DE ALMEIDA

SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO RELEVO NO LONGO TEMPO: SUBSÍDIO À
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de mestre em Geografia

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ferreira Fernandes.

Coorientador: Dr. Pedro Val.

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

d614s de Almeida, Matheus Wanderley
Simulação da Evolução do Relevo no Longo Tempo:
Subsídio à Recuperação de Áreas Degradadas Pela
Mineração / Matheus Wanderley de Almeida. -- Rio de
Janeiro, 2024.
71 f.

Orientador: Nelson Ferreira Fernandes.
Coorientador: Pedro Val.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geografia, 2024.

I. evolução da paisagem. 2. modelagem de erosão.
3. relevo pós-mineração. I. Ferreira Fernandes,
Nelson, orient. II. Val, Pedro, coorient. III.
Título.

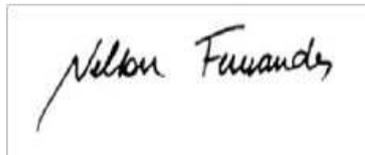
MATHEUS WANDERLEY DE ALMEIDA

SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DO RELEVO NO LONGO TEMPO: SUBSÍDIO À
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de mestre em Geografia.

Aprovada em: 17/07/2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Nelson Ferreira Fernandes (Orientador)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Dr. Pedro Val (Coorientador)
City University of New York (CUNY)

Prof. Dr. André de Souza Avelar
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Profa. Dra. Marcilene dos Santos
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais Carlos e
Monica, e à minha irmã Juliana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e à minha irmã por todo o suporte que me deram durante essa jornada, tudo isso foi feito por vocês e nada seria feito sem vocês. Agradeço também aos meus orientadores Nelson Fernandes, que teve a paciência e o cuidado necessários comigo durante a minha formação como cientista desde a iniciação científica em 2017, e Pedro Val, o qual em pouco tempo de coorientação conseguiu ajudar muito com suas sugestões e contribuições. Nelson e Pedro me ensinaram coisas que vou levar por toda a minha vida profissional e sou muito grato por isso.

Agradeço a todos do LAMPEGE, grupo de pesquisa o qual faço parte desde 2017. João Paulo Araújo, Rafaela Niemann, Carolina Coelho, Renato Vilella e Paulo Fachin foram pessoas que me ajudaram muito durante esses 2 anos. Um agradecimento especial ao Leonardo Cassará, que voltou de seu doutorado e em pouco tempo me ajudou muito com a geração de vários resultados deste trabalho, sou muito grato por isso.

Agradeço também a todos os meus amigos de fora do ambiente acadêmico, em especial ao Mateus Thompson, um irmão que esteve do meu lado em todos os momentos de altos e baixos durante o período desse mestrado.

Por fim, agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado durante a maior parte desses 2 anos. Essa bolsa possibilitou a minha dedicação a esse projeto de pesquisa.

RESUMO

A mineração é uma atividade humana praticada há centenas de anos, a qual desempenha um papel econômico importante para diversos países ao longo da história. Apesar disso, relevos típicos de mineração apresentam grandes alterações geomórficas se tornando mais suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa. Além disso, potencializam processos como o escoamento superficial, desencadeando na formação de grandes formas erosivas. A ação dos processos de transporte em encostas mineradas cria um cenário com grande produção de sedimentos, os quais podem ser carreados por canais fluviais importantes, o que apresenta riscos ambientais para a sociedade. Para mitigar os efeitos negativos da mineração, a legislação brasileira hoje exige que qualquer projeto minerário contenha um plano de recuperação de áreas degradadas com informações sobre a estabilidade química e física do relevo minerado. Para isso, modelos de evolução do relevo se tornam importantes ferramentas na abordagem dessas questões, podendo ser utilizados para visualizar formas erosivas e quantificar taxas de erosão ao longo do tempo em paisagens mineradas. Dentro do contexto apresentado, com o objetivo de assegurar a estabilidade física de relevos minerados no longo prazo e assim isolar fisicamente os rejeitos do meio ambiente, diversos trabalhos incorporam o uso de modelos matemáticos na avaliação de aspectos relacionados à reconstrução topográfica de áreas degradadas pela mineração. Entretanto, não existem estudos no Brasil que simulam de que forma relevos minerados evoluirão ao longo do tempo, sob diferentes cenários erosivos. A partir disso, os principais objetivos desse trabalho são: Avaliar se as taxas de erosão de uma bacia minerada irão superar as taxas simuladas para uma bacia análoga não minerada, além de simular como diferentes estruturas minerárias (cavas e pilhas de estéril) irão evoluir ao longo do tempo simulado, e por fim analisar se os maiores focos erosivos estão localizados dentro das estruturas minerárias. Este projeto implementa um modelo de evolução do relevo em uma paisagem pós-mineração. O modelo é capaz de simular como essa topografia vai evoluir ao longo de 10000 anos sob cenários de baixa, moderada e alta eficiências erosivas. Foram analisadas 2 bacias análogas, a primeira onde ocorreu um processo de mineração no passado e hoje se encontra revegetada, e a segunda à qual não houve nenhum processo minerário registrado. Os resultados não indicam que exista uma diferença significativa entre as taxas de erosão média da bacia minerada quando comparadas com a bacia não minerada durante o período de 10000 anos. Contudo, as estruturas minerárias (principalmente as cavas das minas) apresentaram as maiores profundidades de erosão em todos os cenários erosivos e de tempo, indicando que os processos erosivos ocorrem com maior intensidade nessas áreas. De forma geral, encostas com maior produção de sedimentos são predominantemente convexas e com altos ângulos. É possível concluir que a topografia de estruturas minerárias pode condicionar uma maior produção de sedimentos provenientes dessas áreas, mostrando a necessidade de intervenções para reduzir a ação dos processos erosivos nesse tipo de paisagem.

Palavras-chave: evolução da paisagem; modelagem de erosão; relevo pós-mineração

ABSTRACT

Mining is a human activity practiced for hundreds of years, which has played an important economic role for several countries throughout history. However, typical mining reliefs present major geomorphic changes, becoming susceptible to the occurrence of mass movements. Furthermore, they enhance processes such as surface runoff, triggering the formation of large erosive forms. The action of transport processes on mined slopes creates a scenario with large sediment production, which can be carried by important river channels, and presents environmental risks for society. To mitigate the negative effects of mining, Brazilian legislation requires that any mine site contain a recovery plan for degraded areas providing information on the chemical and physical stability of the mined terrain. To this end, relief evolution models become important tools in addressing these issues and can be used to visualize erosion forms and quantify erosion rates over time in mined landscapes. Within the context presented, with the objective of ensuring the physical stability of mined reliefs in the long term and thus physically isolating the tailings from the environment, several works incorporate the use of mathematical models in the evaluation of aspects related to the topographic reconstruction of areas degraded by mining. However, there are no studies in Brazil that simulate how mined landforms will evolve over time, under different erosion scenarios. Therefore, the present study aims to: Assess whether the erosion rates of a mined basin will exceed the simulated rates for an analogous non-mined basin, in addition to simulating how different mining structures (pits and waste piles) will evolve over time, lastly analyze whether the largest erosion hotspots are located within the mining structures. This project implements a landform evolution model in a post-mining landscape. The model simulates how this topography will evolve over 10,000 years under scenarios of low, moderate and high erosion. Two similar basins were investigated, the first where a mining process took place in the past and is now revegetated, and the second where there were no records of mining. The results do not indicate that there is a significant difference between the average erosion rates of the mined basin when compared to the non-mined basin over the 10,000-year period. However, mining structures (mainly mine pits) showed the greatest erosion depths in all scenarios, indicating that erosion processes occur with greater intensity in these areas. In general, slopes with greater sediment production are predominantly convex and with high angles. It is possible to conclude that topography with mining structures can lead to greater sediment production from these areas, showing the need for interventions to reduce the action of erosion processes in this type of landscape.

Keywords: landscape evolution; erosion modeling; post-mining landscape

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	RELEVO POS-MINERAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS.....	11
2.1	Mineração, Erosão dos Solos e Degradação do Relevo.....	12
2.2	Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração: Legislação Brasileira.....	15
2.3	Recuperação de Áreas Degradadas Pela Mineração: Experiência da Austrália e dos Estados Unidos.....	16
3	MODELOS DE EVOLUÇÃO DO RELEVO (LEMs) COMO FERRAMENTA ÚTIL.....	18
3.1	Princípios Básicos dos LEMs.....	19
3.2	Principais Leis de Transporte.....	20
3.3	Principais Modelos de Evolução do Relevo Implementados em Áreas de Mineração.....	22
3.3.1	SIBERIA.....	23
3.3.2	CAESAR-Lisflood.....	25
3.3.3	SSSPAM (State Space Soil Production Assessment Model)	26
3.4	Landlab.....	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1	Áreas de Estudo.....	30
4.1.1	Bacia Minerada.....	31
4.1.2	Bacia Análoga Não Minerada.....	40
4.2	Parametrização do Modelo.....	42
5	RESULTADOS.....	43
6	DISCUSSÃO.....	56
6.1	Evolução Geomórfica das Áreas Mineradas.....	56
6.2	Importância da Vegetação e do Clima na Evolução do Relevo.....	59
6.3	Limitações do Trabalho.....	60
7	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade humana centenária a qual possui um papel econômico importante para diversos países ao longo da história. Por outro lado, para que essa atividade seja realizada, é preciso fazer diversas intervenções na paisagem, incluindo alterações de grandes proporções nas formas do relevo (Henselowsky *et al.*, 2021; Machado *et al.*, 2021). Essas alterações podem causar aumento do escoamento superficial nessas áreas (Negley e Eshleman, 2006; Martín Duque *et al.*, 2015), levando à formação de voçorocas (Reed e Kite, 2020) e à degradação dos canais fluviais afetados pela atividade minerária (Mossa e James, 2013). Paisagens mineradas também representam um cenário onde há maior transporte de sedimentos inconsolidados, e muitas vezes susceptível à ocorrência de movimentos de massa, principalmente deslizamentos e queda de blocos (Martín Duque *et al.*, 2015). Além disso, as mudanças na topografia, supressão da vegetação e retirada de diversas camadas de solo para mineração também são ações que resultam na liberação de CO_2 na atmosfera, o que contribui para o aceleração das mudanças climáticas (Ruiz *et al.*, 2023). Dessa forma, para que tais processos de degradação sejam evitados, é importante entender a evolução de relevos alterados pela mineração.

Com o objetivo de mitigar os efeitos negativos da mineração, a legislação brasileira hoje exige que qualquer projeto de mineração tenha dentro de si um plano de fechamento de mina e um plano de recuperação de áreas degradadas contendo informações sobre a estabilidade química e física do relevo minerado (ABNT, 1999; IBAMA, 2011; ANM, 2021). Tais exigências não se limitam ao contexto brasileiro, a Austrália, por exemplo, possui leis que exigem a simulação da estabilidade do relevo pós-mineração para um período de milhares de anos, devendo estar prevista em um plano de reabilitação de uma mina (Australia, 1999, 2016). Assim como a legislação australiana (Australia, 1999), a legislação dos EUA exige que a configuração topográfica do relevo pós-mineração esteja conforme com o período pré-mineração, evitando mudanças adversas nas formas de relevo e nas taxas de erosão (NMMMD, 2010).

Nesse contexto, modelos numéricos de evolução do relevo (LEMs) se tornam importantes ferramentas a serem incorporadas na avaliação da estabilidade de paisagens pós-mineração (*e.g.*, Willgoose e Riley (1998), Lowry *et al.* (2004), Hancock *et al.* (2015), Hancock *et al.* (2016)). Segundo Fernandes (2016), os LEMs simulam a evolução de uma paisagem geomorfológica levando em consideração processos superficiais, quantificados por leis gerais

de transporte (Dietrich *et al.*, 2003), e tectônicos, podendo englobar diferentes escalas espaciais e temporais. A partir disso, tornou-se viável simular a evolução de diversas estruturas minerárias, como as pilhas de estéril (e.g., Hancock e Turley (2005), Hancock e Martin Duque (2022)), assim como a estabilidade de diversas feições erosivas presentes em áreas pós-mineração (e.g., Hancock *et al.* (2019), Hancock e Willgoose (2021)). No entanto, não existem estudos no Brasil que se dediquem a simular e quantificar a evolução de relevos pós-mineração em grandes escalas de tempo. Dessa forma, se torna essencial o entendimento e a quantificação de como o relevo pós-mineração vai evoluir ao longo de diferentes escalas de tempo, sob diferentes cenários erosivos e qual será a evolução geomórfica de estruturas minerárias desativadas (cavas de minas e pilhas de estéril), como exigido pelas diferentes legislações ao redor do mundo.

Dessa forma, este trabalho procura avaliar, de maneira qualitativa e quantitativa, como se dará a evolução do relevo de uma bacia hidrográfica a qual passou pelo processo de mineração. Nesse contexto, o presente trabalho se propõe a implementar um modelo de evolução do relevo em duas bacias hidrográficas análogas, uma pós-mineração e outra sem registros de mineração. A partir disso, se torna possível: 1) Avaliar se a topografia de uma área minerada possui controle na ação dos processos erosivos que irão atuar ali ao longo do tempo; 2) Simular como diferentes estruturas minerárias (cavas e pilhas de estéreis) irão evoluir geomorficamente ao longo do tempo simulado; 3) Avaliar se ações de conformação topográfica durante o fechamento de uma mina são eficazes no controle dos processos erosivos em estruturas minerárias.

2 RELEVO POS-MINERAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

Para compreender a importância de investigar como os processos erosivos irão atuar sobre um relevo minerado, é necessário que se entenda como a mineração altera as paisagens naturais e quais são as consequências dessa atividade. Nesse contexto, esta seção irá abordar como a atividade pode alterar a morfologia do relevo, podendo potencializar a ação dos processos erosivos as principais legislações em países com grande histórico minerador, como o Brasil, os EUA e a Austrália. A legislação de cada país tem suas especificidades e possuem diferentes estratégias para recuperação das áreas degradadas pela mineração. A partir dessa contextualização é possível traçar objetivos e avaliar a implementação de ferramentas para que a recuperação de relevos pós-mineração possa ser bem-sucedida ao longo do tempo.

2.1 Mineração, Erosão dos Solos e Degradação do Relevo

A mineração é economicamente muito importante em diversos países no mundo. Entretanto, o processo de extração mineral carrega consigo diversos problemas ambientais, como a descaracterização topográfica das paisagens (Goudie, 2013), acelerando o processo de degradação do relevo. A degradação do relevo pode ser definida como a perda progressiva de suas funções, causada por distúrbios dos quais o relevo não se recupera naturalmente (Bai *et al.*, 2008). O processo de degradação do relevo depende de um “jogo de forças” entre a soma dos processos erosivos naturais e potencializados pela ação humana, menos a soma dos processos naturais de restauração do relevo com as práticas de conservação do solo (Blaikie e Brookfield, 1986).

Nesse contexto, a degradação do relevo de uma paisagem pós-minerada pode vir acompanhada da deflagração de movimentos gravitacionais de massa, como deslizamentos de terra (Figura 1a) e rastejo, além da formação de voçorocas (Figura 1b) (Martín Duque *et al.*, 2015), o que potencializa o processo de escoamento superficial (Negley e Eshleman, 2006). Isso acaba fazendo com que a área minerada perca suas funções ecológicas, não retorne ao estado de equilíbrio natural de forma espontânea e não esteja conforme com o ecossistema em seu entorno. Também é importante ressaltar que os sedimentos podem por muitas vezes ser poluentes, dependendo do uso do solo e dos produtos químicos adsorvidos a ele (Morgan, 2005). Nesse contexto, a prática da mineração, além de alterar a morfologia natural dos relevos (Figura 2), também deixa uma grande marca de rejeitos químicos que “se conectam” aos sedimentos. A partir da ação dos processos erosivos, os riscos de contaminação causados por esses sedimentos aumentam desde sua área fonte até o local onde eles são depositados, sejam em alúvios ou colúvios (Coulthard e Macklin, 2003; Žibret *et al.*, 2018).

Figura 1 – (a) Registro da cicatriz de um deslizamento de terra em uma área minerada no sudeste da Espanha, e (b) registro de uma voçoroca na mesma área. As feições erosivas, identificadas em área de mineração, representam a instabilidade que esse tipo de paisagem pode apresentar.



Fonte: Martín Duque *et al.* (2015)

Figura 2 – Exemplo de uma topografia altamente modificada em uma área de mineração de carvão na Índia. A imagem indica relevos antrópicos com feições criadas por maquinários e que não são encontradas em áreas não modificadas pela ação humana.



Fonte: Saini *et al.* (2016)

A mineração também envolve processos capazes de gerar poluentes que contribuem para o aceleramento das mudanças climáticas. Um desses processos é a remoção do solo e da vegetação, onde todo o carbono estocado nesses locais será liberado para a atmosfera na forma de CO₂ (Ruiz *et al.*, 2023). A partir disso, é possível entender que os padrões de chuva, alterados pelas mudanças climáticas, também podem influenciar no aceleramento ou na redução das taxas de erosão ao longo do tempo, inclusive em áreas de maior instabilidade geomórfica (Hancock *et al.*, 2017). Atualmente existem trabalhos que procuram quantificar como as variações nos regimes de chuva – controladas pelas mudanças climáticas – vão se manifestar em mudanças nas taxas de transporte de sedimento (Barnhart *et al.*, 2020b). Tais trabalhos mostram que um regime de chuvas mais intenso acabará potencializando a ação dos processos erosivos (consultar Hancock *et al.* (2017) e Barnhart *et al.* (2020b)).

Em resumo, percebe-se que áreas mineradas, sem vegetação e geomorficamente modificadas muitas vezes apresentam relevos instáveis e mais susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa, escoamento superficial, rastejo, voçorocamento e erosão por salpico. O processo minerário também é um fator que influencia na liberação de CO₂ na atmosfera, acentuando o efeito das mudanças climáticas, as quais também vão influenciar nos processos

de transporte de sedimentos através das variações nos regimes de chuva ao longo do tempo e do espaço.

2.2 Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração: Legislação Brasileira

Esta seção se propõe a fazer uma breve análise sobre alguns textos da legislação brasileira em relação à recuperação de áreas degradadas, com ênfase na reconstrução topográfica e na investigação da estabilidade do relevo desses locais. O primeiro grande marco no século XX é o decreto que estabelece o Código de Minas em 1934, com novas redações em 1940 e em 1967. Estes decretos formalizaram a existência de um código único abrangendo os regulamentos regentes sobre as atividades minerárias no território brasileiro (Brasil, 1934, 1940, 1967). O Código de Minas até 1967 dispõe principalmente de informações sobre as condições para a autorização de novas lavras e ainda aborda de maneira incipiente sobre as técnicas para proteção do solo, não dedicando nenhum direcionamento para a recuperação topográfica de áreas mineradas.

No começo da década de 80 entra em vigor a lei n° 6938, dando início à Política Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 1981), onde pela primeira vez a legislação aborda o conceito de recuperação de áreas degradadas e proteção de áreas ameaçadas de degradação. Esta lei entende a degradação da qualidade ambiental como a alteração adversa das características do meio ambiente, seja essa alteração estética ou sanitária, por exemplo (Brasil, 1981). Além disso, em 1989 é lançado o decreto n° 97.632 (Brasil, 1989), no qual se institucionaliza a obrigatoriedade da apresentação de um Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD). Segundo o decreto, “a recuperação deve ter como objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização”, e “visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente” (Brasil, 1989).

Já no ano de 1999 foi implementada a NBR 13.030 (ABNT, 1999), a qual obriga a apresentação de um projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração. Essa norma contempla a necessidade de conformação topográfica local, exigindo informações sobre a estabilidade, o controle de erosão e a drenagem tanto da área afetada quanto de seu entorno, considerando o uso futuro do local. Em 2001 foi lançada a NRM 21 (DNPM, 2001), onde são definidos procedimentos necessários para reabilitação de áreas mineradas e impactadas. Segundo a norma, devem constar nos projetos de reabilitação informações sobre a conformação paisagística e topográfica da área, observando sua estabilidade e controle de erosão, por exemplo. É importante ressaltar que há a exigência de um programa de acompanhamento e

monitoramento. Em 2011, a Instrução Normativa n° 4 lançada pelo IBAMA (IBAMA, 2011) traz as informações que devem estar contidas dentro de um PRAD. Segundo o documento, um dos objetivos específicos do PRAD é a contenção dos processos erosivos, devendo ser descritas todas as medidas necessárias para alcançar tal objetivo. O agente minerador deve informar as condições do solo, indicando a presença de processos erosivos e, caso seja necessário, deverá ser realizado um conjunto de técnicas para o controle da erosão.

Mais recentemente foi lançada a resolução ANM n° 68, trazendo algumas atualizações em relação ao Plano de Fechamento de Mina (ANM, 2021). Segundo esta resolução, o Plano de Fechamento de Mina é o conjunto de procedimentos para o descomissionamento da área da mina após mineração, envolvendo, entre outras ações, a estabilização física e química das estruturas permanentes (por ex.: cavas de minas a céu aberto e pilhas de rejeitos e estéreis). Apesar das últimas resoluções e normas levarem em consideração a estabilidade do relevo em áreas mineradas, a legislação brasileira ainda não aborda de maneira precisa a preocupação sobre como essas áreas irão evoluir ao longo do tempo. Além disso, no país ainda não existem normas com informações sobre quais são as taxas de erosão consideradas "ideais" para cada período e por quanto tempo as estruturas minerárias devem se manter estáveis fisicamente, como é o caso de outros países com grande histórico minerário.

2.3 Recuperação de Áreas Degradadas Pela Mineração: Experiência da Austrália e dos Estados Unidos

Em uma escala global, existem diversas organizações que definem diretrizes para boas práticas de mineração, como o *International Council of Mining and Metals* (ICMM), que assim como a legislação brasileira, afirma que de forma geral as formas de relevo pós mineração precisam ser geomorficamente estáveis (ICMM, 2021). A consideração de princípios geomórficos na reabilitação de minas começou a ser feita por países protagonistas em atividades minerárias, como a Austrália e os Estados Unidos. Segundo Hancock *et al.* (2020), o primeiro marco dessa atenção à forma do relevo foi a Lei de Controle e Recuperação de Mineração em Superfície (EUA, 1977). Essa legislação considerou as bacias hidrográficas como unidade fundamental para garantir a conectividade hidrológica durante o processo de reabilitação de uma mina. Isso faz com que a área reabilitada necessite ser integrada aos padrões hidrológicos das áreas no seu entorno, assegurando sua estabilidade no longo prazo.

A Lei de Controle e Recuperação de Mineração em Superfície tem como princípio o “contorno original aproximado”. Segundo este conceito, a configuração do relevo reconstruído

após a mineração tem que se assemelhar à configuração geral da superfície terrestre pré-mineração e se integrar com a drenagem padrão das áreas em seu entorno (EUA, 1977). Seguindo este mesmo princípio, a Divisão de Mineração e Minerais do estado do Novo México (EUA) propõe que a configuração topográfica do relevo pós mineração deve estar conforme com o período pré-mineração, porém isso não significa que o relevo precisa ter os mesmos valores de elevação de antes da atividade minerária (NMMMD, 2010). Ainda segundo o documento, o objetivo da recuperação das áreas degradadas é evitar mudanças adversas, tendo em vista que o aumento nas taxas de infiltração e a diminuição no escoamento superficial são mudanças favoráveis.

Além disso, ao longo das últimas décadas o governo australiano vem publicando guias e manuais com diretrizes sobre como realizar o processo de reabilitação das áreas degradadas por mineração. Em 1998 o governo australiano lança o Manual de Reabilitação de Minas (MCA, 1998). Segundo o manual, o relevo reabilitado deve ser hidrologicamente e, se possível, visualmente compatível com a área em seu entorno. Além disso, o documento ainda menciona os tipos de processos erosivos mais atuantes desencadeados pela ação das chuvas, são eles: a erosão por salpico e o escoamento superficial. Segundo o documento, os fatores que mais influenciam a ocorrência do escoamento superficial em áreas de mineração são principalmente as chuvas, a morfologia das encostas, as características do solo e o tipo de uso do solo (MCA, 1998).

A elevação, o gradiente e a densidade da drenagem também são fatores que influenciam no aceleração das taxas de erosão do solo. Entretanto, um dos grandes princípios do Manual de Reabilitação de Minas australiano é entender que mesmo replicando a forma de relevo natural, as encostas reconstruídas consistem principalmente de material não consolidado, deixando-as mais susceptíveis à retirada e transporte desses sedimentos pela água. Nesse contexto, sabe-se que reabilitação das áreas mineradas pode fazer com que esses fatores, com exceção da frequência e intensidade das chuvas, não acentuem o processo de transporte de sedimentos (consultar MCA (1998)).

Em comparação com os manuais e a legislação brasileira, o governo australiano ainda dispõe de mais requisitos específicos para a reabilitação do relevo em áreas mineradas (por ex.: Australia (1999)). Segundo a legislação australiana, entre os principais objetivos da reabilitação, está a busca por um relevo com "características de erosão que sejam compatíveis com áreas circundantes não perturbadas e que apresentem formas de relevo similares". Ainda de acordo com as diretrizes australianas, a disposição final do relevo deve garantir, com base

na melhor modelagem disponível, que os rejeitos advindos das atividades minerárias estejam fisicamente isolados do meio ambiente por pelo menos 10.000 anos (Australia, 1999).

Outra importante estrutura minerária mencionada pelas diretrizes australianas são as pilhas de rejeitos, as quais precisam ser planejadas para reabilitação desde a sua concepção. As pilhas de rejeitos também precisam passar pelo processo de reabilitação a partir do uso de métodos tecnicamente eficazes e comprovados para garantir sua estabilidade em longos períodos (ICMM, 2008). De acordo com MCA (1998), as pilhas de rejeitos não podem ser geradores de poluentes tanto durante sua fase de operação, como após a reabilitação da área. Além disso, elas também precisam ser fisicamente estáveis e resistentes aos processos erosivos para que não ocorra contaminação pelos rejeitos no longo tempo.

A partir dessa perspectiva que encara a importância de levar em consideração a evolução do relevo reabilitado não só no curto prazo (anos a décadas), mas também no longo prazo (centenas a milhares de anos), é possível pensar em novas ferramentas para que esse tipo de análise possa ser feita. Nesse contexto, alguns autores ao longo das últimas décadas (Lowry *et al.*, 2004; Hancock *et al.*, 2010; Hancock *et al.*, 2015, 2016; Lowry *et al.*, 2020; Welivitiya *et al.*, 2021) aplicam modelos de evolução do relevo como ferramentas úteis para avaliar se a forma de relevo reabilitada pode atender aos requisitos ambientais exigidos pelo governo australiano.

3 MODELOS DE EVOLUÇÃO DO RELEVO (LEMs) COMO FERRAMENTA ÚTIL

A partir dos anos 90, observou-se uma crescente produção de trabalhos utilizando modelos de evolução do relevo (LEMs), os quais segundo Tucker e Hancock (2010), foram entendidos como “uma teoria matemática que descreve como as ações de vários processos geomórficos conduzem (e são impulsionadas por) a evolução da topografia ao longo do tempo”. Os LEMs possuem diversas funcionalidades, dentre elas estão o cálculo de taxas de erosão e a visualização de formas erosivas, como as voçorocas (Hancock, 2004; Tucker e Hancock, 2010; Hancock *et al.*, 2020). Dessa forma é possível analisar como diversos ambientes de encosta e fluviais, tectonicamente ativos ou não, respondem aos processos erosivos ao longo do tempo (Hancock *et al.*, 2003).

Os LEMs possuem importantes aplicações ambientais (Tucker e Hancock, 2010), já que permitem a visualização e quantificação de cenários geomórficos sob a ação de diferentes condições climáticas e tectônicas para assim entender como a paisagem irá evoluir sob qualquer condição simulada. Tal fato traz a possibilidade de avaliar a evolução de diferentes tipos de

relevo (naturais e antropogênicos) e entender suas diferenças em relação aos processos erosivos atuantes. Dessa forma, é possível desenvolver uma maior capacidade de interpretação da paisagem em diferentes escalas espaciais e temporais (Tucker e Hancock, 2010; Willgoose, 2018), que antes não era possível com os modelos de erosão existentes (*e.g.* USLE, RUSLE, MUSLE etc.). Essas aplicações tornam viável o planejamento de mudanças em designs geomórficos de relevos modificados por atividades humanas, com o objetivo de diminuir as taxas de erosão e seus problemas ambientais relacionados ao longo do tempo (Hancock *et al.*, 2020).

3.1 Princípios Básicos dos LEMs

De forma geral, os LEMs simulam as mudanças que ocorrem na topografia ao longo do tempo. Essas simulações são feitas numericamente através de expressões matemáticas que levam em consideração processos físicos incorporando a ação de processos geomórficos controlados por características locais como forma do relevo, litologia e clima (Fernandes *et al.*, 2021). Segundo Tucker e Hancock (2010), os LEMs são compostos essencialmente por 5 componentes, sendo elas: 1) A consideração do Princípio da Conservação de Massa, partindo do ponto que toda a massa erodida é conservada dentro do sistema, ou seja, todo sedimento erodido de um ponto, conseqüentemente é depositado em outro, sem perdas dentro do sistema; 2) Funções de transporte geomórfico que descrevem a geração e o movimento de sedimentos nas encostas; 3) Representação da geração de escoamento e o caminho da água através da paisagem; 4) Funções geomórficas de transporte por processos fluviais e de encosta; 5) Métodos numéricos que servem para solucionar equações que integram os LEMs.

O Princípio da Conservação de Massa é aplicado aos LEMs, ou seja, a erosão determinará a saída de material de uma área-fonte, mas esse material (por ex: sedimentos, solo) sempre será depositado em outro lugar dentro do sistema. A partir desse pressuposto, é possível entender que após um soerguimento tectônico, uma cadeia montanhosa é erodida ao ponto de se tornar colinas suaves ao longo do tempo geológico, caso não exista mais atividade tectônica no local (Bierman e Montgomery, 2019). Nesse contexto hipotético, não existe perda de massa dentro do sistema, todo sedimento que é erodido de um lugar, será depositado em outro. Isso significa que a variação no armazenamento (ΔAr) durante um certo tempo é igual à diferença entre o somatório de entradas e saídas (Fernandes *et al.*, 2021), como mostra a Eq. 1. Esse cálculo é feito em todas as áreas de uma bacia hidrográfica, determinando quais são as zonas

erosivas, onde há variação negativa no armazenamento (ΔAr negativo), e quais são as zonas deposicionais, com variações positivas (ΔAr positivo) (Fernandes *et al.*, 2021).

$$\Delta Ar = \sum(\text{entradas}) - \sum(\text{saídas}) \quad (1)$$

De acordo com os autores, a topografia de um local em um determinado momento resulta da combinação de processos tectônicos (U) e erosivos (E), os quais são considerados através de taxas de soerguimento [LT^{-1}] e taxas de erosão [LT^{-1}], respectivamente. Essa relação é demonstrada através da Eq. 2.

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = U - E \quad (2)$$

onde a diferença da elevação (z) [L] ao longo do tempo (t) [T] é o resultado da diferença entre o ganho de massa pelos processos tectônicos e a retirada dela através dos processos erosivos. Esse “jogo de forças” é definido como a Equação Geral da Evolução do Relevo e serve como referência para o funcionamento dos LEMs. Os LEMs geralmente costumam dividir e modelar os processos erosivos separadamente, entre processos de encosta e fluviais (Fernandes *et al.*, 2021). Ainda segundo os autores, a combinação dessas equações de transporte simuladas resulta em uma equação diferencial parcial complexa que são solucionadas através de métodos numéricos – um dos componentes essenciais de um LEM (Tucker e Hancock, 2010). As principais equações diferenciais e suas resoluções são amplamente discutidas em Pelletier (2013) e Chen *et al.* (2014).

3.2 Principais Leis de Transporte

Um dos primeiros trabalhos a desenvolver e explorar leis de transporte geomórfico foi Culling (1960), o qual faz uma adaptação da lei de fluxo de calor em sólido aplicando os mesmos pressupostos para calcular o transporte de sedimentos em encostas. Segundo o autor, a partir da lógica da lei de fluxo de calor, por mais que uma relação inteiramente linear seja improvável, é possível pressupor que o fluxo de sedimentos seja proporcional ao gradiente da superfície. Outro autor protagonista no estudo das leis de transporte geomórfico foi Kirkby (1971), o qual propõe leis de transporte que distinguem processos difusivos de advectivos. Kirkby (1971) também introduz o conceito de “forma característica” do relevo. Segundo o autor, diferentes processos de transporte dos sedimentos possuem mais controle da forma atual do perfil das encostas do que as condições iniciais em que elas foram expostas aos agentes da natureza. Além disso, as formas características do relevo podem ser convexas, resultantes do

processo de rastejo, côncavas, resultantes do escoamento superficial com ocorrência de voçorocas, e convexo-côncava, resultante do processo de rastejo e escoamento superficial combinados sem a ocorrência de voçorocas (Kirkby, 1971).

A partir disso, Fernandes e Dietrich (1997) combinam tais pressupostos com o princípio da conservação de massa. Dessa forma, assumindo uma constante de proporcionalidade (D), os autores propõem uma equação que descreve um fluxo difusivo de sedimentos ao longo das encostas (Eq. 3).

$$\frac{\partial z}{\partial t} = D \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (3)$$

onde t é o tempo e D [L^2T^{-1}] é denominada como difusividade. A partir da Eq. 3 é possível entender que as mudanças na elevação ao longo do tempo são proporcionais à curvatura da encosta (Fernandes e Dietrich, 1997). Ainda segundo os autores, essa equação é satisfatória apenas para encostas com um manto de solo homogêneo, sem variações significativas na geologia, na cobertura vegetal e no uso do solo. A equação de transporte por processos difusivos possui outras limitações, como por exemplo: ela não engloba o fluxo de material provenientes do escoamento superficial e dos deslizamentos, por não serem processos lineares (Fernandes *et al.*, 2021). Além disso, a equação também não considera a importância da profundidade do solo e não se aplica a paisagens que apresentem encostas com declividade acima de 20% (Dietrich *et al.*, 2003).

A partir das limitações da Eq. 3, Roering *et al.* (1999) propõem uma equação (Eq. 4) buscando representar outros tipos de transporte (*e.g.* deslizamentos translacionais) onde a taxa de erosão não varia de maneira linear com o gradiente de uma encosta.

$$q_s = \frac{D \nabla z}{1 - (|\nabla z|/S_c)^2} \quad (4)$$

A equação considera o processo de difusão linear para gradientes baixos, porém indica que o fluxo de sedimentos aumenta exponencialmente ao chegar próximo de uma declividade considerada crítica (S_c) e tende ao infinito quando esse valor é alcançado (Roering *et al.*, 1999).

Além de processos de encosta, também é possível analisar e quantificar os processos fluviais para transporte de sedimentos através de suas leis e equações. A principal equação utilizada para quantificar as taxas de transporte de sedimentos por processos fluviais (Eq. 5) é conhecida como modelo *stream-power* ou “potência fluvial” (Peifer *et al.*, 2022). A equação de potência fluvial leva em consideração que as taxas de transporte de sedimentos são uma

resultante do gradiente (S), da área de contribuição a montante (A) [L^2] e do coeficiente de erodibilidade do (K) [$T^{-1}L^{(1-2m)}$] (Howard, 1994), além dos parâmetros de calibração m e n , referentes aos principais processos de incisão fluvial da área investigada (Whipple e Tucker, 1999; Whipple, 2002).

$$q_s = K A^m S^n \quad (5)$$

O parâmetro K é definido e varia de acordo com os processos de erosão fluvial que estão representados nele (Peifer *et al.*, 2022). A erodibilidade é controlada não só pelo tipo de material subjacente, mas também pelo regime de chuvas da área de interesse. Por exemplo, em um cenário que apresente rochas mais resistentes (como granitos ou gnaisses de alta textura) juntamente a um clima com chuvas pouco intensas vão acabar resultando em uma menor erodibilidade do leito, e a mesma lógica é aplicada a áreas com rochas menos resistentes e um regime de chuvas intensas.

Uma das maiores vantagens do modelo de potência fluvial está em sua simplicidade, atrelada à capacidade de levar em consideração todos os processos de incisão fluvial para assim poder calcular o fluxo de sedimentos mobilizado por uma rede de drenagem ao longo de sua evolução no tempo. O modelo de potência fluvial, apesar de ser o mais usado para quantificar taxas de incisão fluvial, também possui suas limitações. Peifer *et al.* (2022) listam algumas de suas atuais limitações, dentre elas está o fato de o modelo não contabilizar as mudanças nos divisores de drenagem, alterando diretamente o valor da área de contribuição a montante de cada ponto do canal fluvial.

Além das leis de transporte geomórfico aqui apresentadas, existem outras leis que representam diversos processos físicos que ocorrem na natureza. Dietrich *et al.* (2003), Tucker e Hancock (2010) e Fernandes *et al.* (2021) fazem uma ampla apresentação e discussão de todas as equações que simulam esses processos.

3.3 Principais Modelos de Evolução do Relevo Implementados em Áreas de Mineração

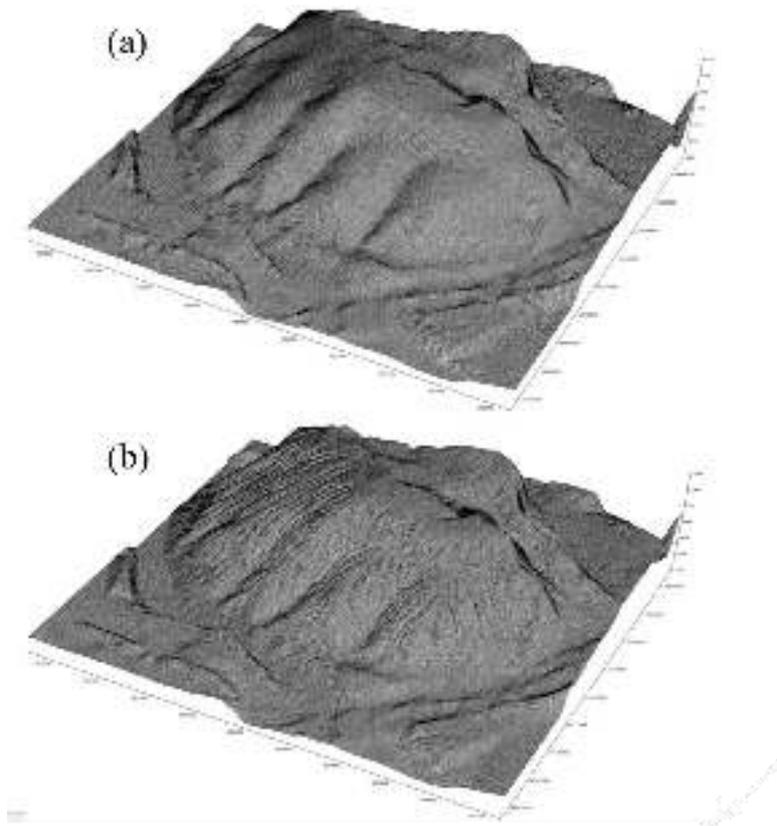
Esta seção se propõe a abordar alguns dos principais modelos de evolução do relevo que vem sendo utilizados nos últimos anos (SIBERIA, CAESAR-Lisflood, SSSPAM e LANDLAB). Os modelos SIBERIA, CAESAR-Lisflood e SSSPAM discorridos aqui são entendidos como os mais utilizados em trabalhos que buscam simular a evolução do relevo em áreas degradadas pela mineração, enquanto o LANDLAB será revisado com mais detalhes aqui

para um melhor entendimento do conjunto de ferramentas que será implementado neste trabalho. Além desses, existem diversos outros LEMs que foram amplamente utilizados nas últimas décadas, como o CHILD (Tucker e Bras, 2000), por exemplo. Para mais informações sobre os modelos de evolução do relevo existentes hoje em dia, consultar o trabalho de Fernandes *et al.* (2021).

3.3.1 SIBERIA

Na mesma época do surgimento dos LEMs, Willgoose *et al.* (1991a, 1991b) propuseram o SIBERIA, um modelo que simula a evolução de bacias hidrográficas no longo tempo, possibilitando a visualização (Figura 3) e quantificação sobre as mudanças nas redes de drenagem e nos valores de elevação tanto das encostas, como dos leitos fluviais. Ou seja, o SIBERIA é um modelo de evolução do relevo que ajuda na análise do efeito dos processos de transporte sobre o relevo das bacias hidrográficas, sendo implementado principalmente em formas de relevo pós mineração (como em Evans *et al.* (2000); Hancock *et al.* (2002); Lowry *et al.* (2004); Hancock *et al.* (2016); Atchley *et al.* (2019); entre outros.).

Figura 3 – (a) Exemplo de um relevo reconstruído pós-mineração e (b) sua simulação para evolução do relevo no período de 1000 anos. O exemplo acima mostra o modelo digital de elevação com os valores atualizados para o relevo simulado, possibilitando visualizar e identificar assinaturas da erosão na área.



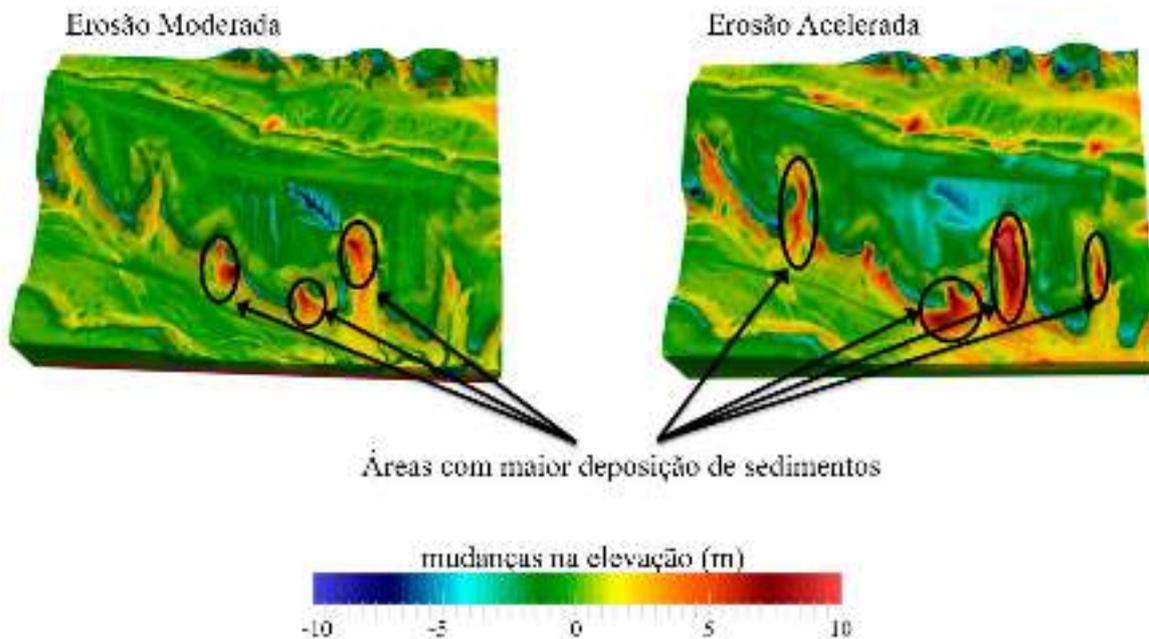
Fonte: Modificado de Hancock *et al.* (2019).

O SIBERIA leva em consideração o princípio da conservação de massa, e sua equação governante (Eq. 6) mostra que o transporte de sedimentos (q_s) em uma bacia hidrográfica é controlada pela soma da taxa de transporte por processos de encostas (q_{sd}) e com a taxa de transporte por processos fluviais (q_{sf}) – todos os termos são calculados em $M^3T^{-1}M^{-1}$.

$$q_s = q_{sf} + q_{sd} \quad (6)$$

O SIBERIA utiliza como dado de entrada um modelo digital de elevação para extrair os parâmetros topográficos e determinar as características hidrológicas do relevo (Hancock *et al.*, 2002). A partir das simulações realizadas, o SIBERIA calcula o resultado da relação erosão-deposição para toda a área modelada (Figura 4) e assim atualiza os valores de elevação do modelo digital de elevação para cada escala de tempo determinada. Apesar do SIBERIA ser um modelo muito usado nos últimos anos, ele também possui algumas limitações como a incapacidade de simular os efeitos da cobertura do solo e do intemperismo na evolução do perfil do solo e no controle que eles exercem nas mudanças das taxas de transporte de sedimentos (Welivitiya *et al.*, 2021).

Figura 4 – Simulações com diferentes cenários erosivos (erosão moderada e erosão acelerada) para um período de 10^4 anos em uma área de rejeitos nucleares nos EUA.



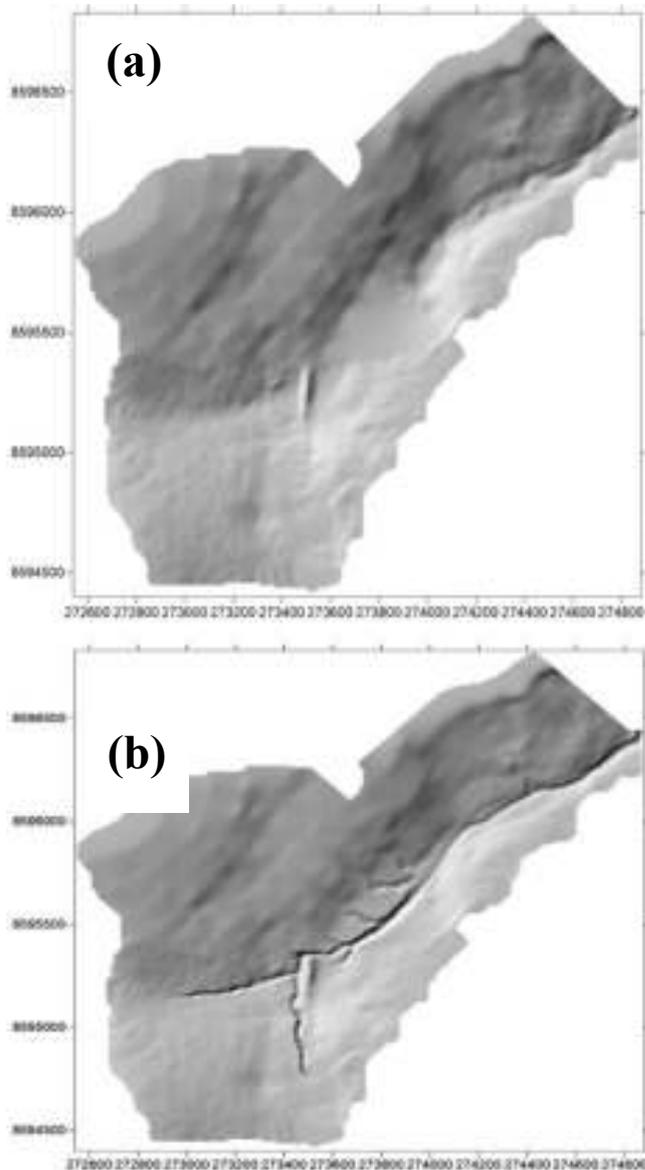
Fonte: Modificado de Atchley *et al.* (2019).

3.3.2 CAESAR-Lisflood

O CAESAR (Coulthard *et al.*, 2002) é um modelo de evolução do relevo o qual pode simular processos de encosta (*e.g.* rastejo), além de processos de erosão/deposição e roteamento de fluxo de um canal fluvial. A partir de um MDE e dados iniciais como granulometria de cobertura vegetal, o CAESAR será capaz de simular os processos mencionados acima e gerar dados de saída como valores de elevação, distribuição dos sedimentos ao longo da área simulada, além de taxas de fluxo de sedimentos (Van De Wiel *et al.*, 2007). Segundo os autores, o modelo pode ser executado de duas formas diferentes: A primeira é em “modo de bacia hidrográfica”, onde não existem fluxos externos além da chuva. A segunda forma é em modo de alcance, onde existem um ou mais pontos através dos quais água e sedimentos podem entrar no sistema. O modelo armazena as informações dentro de um grid, onde cada célula terá valores de granulometria, descarga, níveis de vegetação e parâmetros hidrológicos locais.

Coulthard *et al.* (2013) atualizaram o CAESAR combinando-o com um modelo hidrodinâmico chamado LISFLOOD-FP, dessa forma foi elaborado o CAESAR-Lisflood. De maneira geral, essa combinação permitiu um avanço no módulo para roteamento de fluxo, permitindo assim que diversos processos hidrodinâmicos sejam representados no LEM. Além disso, outra característica que diferencia o CAESAR de modelos como o SIBERIA é a sua capacidade de simular eventos e os processos erosivos associados em uma escala de tempo mais curta, que pode ir de horas (simulando eventos únicos) a milhares de anos. Existem diversos trabalhos que aplicam o CAESAR em paisagens pós-mineração (*e.g.* Hancock *et al.* (2010); Hancock *et al.* (2015); Lowry *et al.* (2019); Lowry *et al.* (2020)). A figura 5 mostra o exemplo de resultados do modelo nesse tipo de paisagem. Para mais informações sobre o modelo, consultar Coulthard *et al.* (2002), Van De Wiel *et al.* (2007) e Coulthard *et al.* (2013).

Figura 5 – Simulações com diferentes cenários erosivos (erosão moderada e erosão acelerada) para um período de 10^4 anos em uma área de rejeitos nucleares nos EUA.



Fonte: Hancock *et al.* (2017).

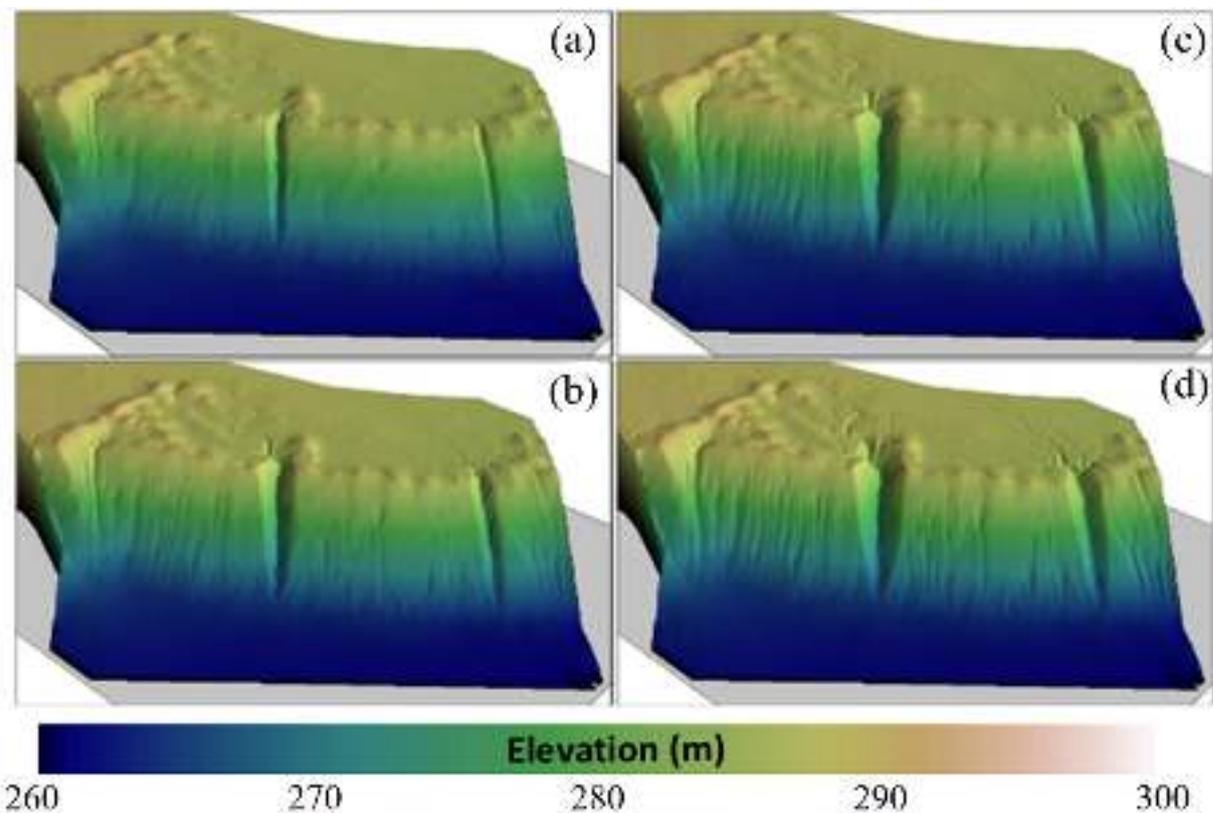
3.3.3 SSSPAM (State Space Soil Production Assessment Model)

A partir das limitações do SIBERIA, CAESAR-Lisflood e outros modelos, o SSSPAM (Welivitiya, 2016; Welivitiya et al., 2021) é proposto como um modelo numérico capaz de simular a evolução de todo o perfil do solo de um relevo enquanto o próprio relevo está evoluindo (Welivitiya et al., 2021). Nesse contexto, o SSSPAM consegue simular os processos de pedogênese, erosão por processos difusivos, incisão fluvial, deposição de sedimentos e intemperismo (Welivitiya et al., 2021). Trabalhos como o de Welivitiya and Hancock (2022), implementaram o modelo SSSPAM para simular a formação e evolução de voçorocas em um

ambiente pós-mineração (Figura 6). O SSSPAM também possui módulos que simulam o intemperismo físico usando um mecanismo de fragmentação, a blindagem do solo, e a distribuição granulométrica ao longo do perfil do solo. Para mais informações sobre esses módulos, consultar Welivitiya et al. (2021).

O SSSPAM também possui algumas limitações, pois ainda não foram incorporados outros processos que contribuem tanto para a evolução do relevo, como para a evolução dos perfis de solo. Alguns exemplos desses processos são o desenvolvimento da vegetação, a quantidade de carbono no solo e o intemperismo químico (Welivitiya *et al.*, 2021). Os autores frisam que é importante construir modelos que consigam representar esses processos de maneira simplificada. Além disso, também é importante que exista dados suficientes para calibração do SSSPAM, principalmente em parâmetros referentes aos processos que controlam a evolução dos perfis de solos.

Figura 6 – Visualização da evolução de uma forma erosiva (voçoroca) em uma área pós mineração após (a) 1.5 anos; (b) 3 anos; (c) 4.5 anos; (d) 6 anos.



Fonte: Welivitiya e Hancock (2022).

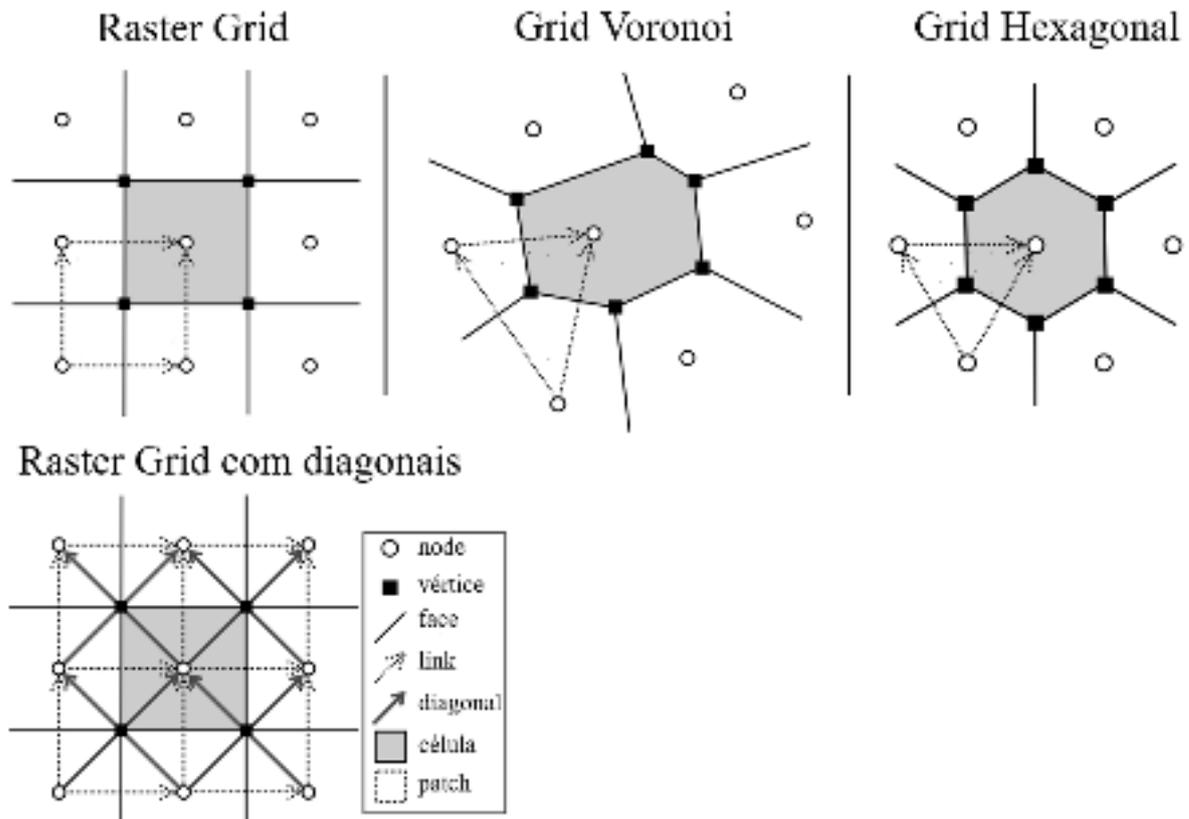
3.4 Landlab

O Landlab, segundo os seus desenvolvedores (Hobley *et al.*, 2017; Barnhart *et al.*, 2020a), é uma biblioteca de funções em linguagem Python que possibilita a criação e incorporação de modelos numéricos que simulam processos espacialmente distribuídos na superfície terrestre. O objetivo dessa biblioteca é criar um ambiente de modelagem amigável que forneça aos cientistas as ferramentas necessárias para modelar as dinâmicas da superfície terrestre (Hobley *et al.*, 2017). Ainda segundo os autores, sua estrutura aproveita o fato de que diversos modelos de evolução da paisagem compartilham um conjunto de elementos comuns, apesar da ampla gama de processos e escalas que eles abrangem.

O Landlab é essencialmente composto por 3 elementos: um módulo de grids, uma biblioteca de componentes que representam processos, e um conjunto de ferramentas que servem de suporte para plotagem e visualização de dados e resultados (Hobley *et al.*, 2017). Um grid é representado como um objeto na linguagem python que representam um domínio computacional (Barnhart *et al.*, 2020a), e cada grid contém informações que descrevem sua geometria. Além disso, existe uma variedade de funções que podem ser realizadas para gerenciar os dados contidos nos grids (Hobley *et al.*, 2017).

Um grid é composto por diversos elementos (nodes, links, patches, vértices, faces, células e diagonais) que fornecem informações sobre a conectividade entre eles (Figura 7) (Barnhart *et al.*, 2020a). Os grids podem estar armazenando um conjunto de dados (*e.g.* valores de elevação), que é representado por cada node. Os links conectam um node ao outro e são usados para calcular o gradiente entre eles, além de carregar fluxos (*e.g.* fluxos de sedimentos). As células correspondem à localização do node, enquanto os vértices são os pontos de contato entre cada face (Hobley *et al.*, 2017; Barnhart *et al.*, 2020a). Como pode-se observar, o Landlab permite criar grids com diferentes geometrias (raster grids, grids hexagonais e grids em malha Voronoi), e cada grid é específico para um tipo de aplicação (Hobley *et al.*, 2017). Os grids em formato raster, por exemplo, possuem uma maior compatibilidade com dados de modelos digitais de elevação, permitindo a otimização de funções numéricas (Hobley *et al.*, 2017).

Figura 7 – Tipos de Grid com diferentes geometrias para implementação no Landlab. O tipo Raster com diagonais foi disponibilizado somente na versão 2.x do Landlab, permitindo a passagem de mais fluxos tanto de entrada como de saída da célula.



Fonte: Modificado de Hobley *et al.* (2017) e Barnhart *et al.* (2020a).

Também é importante definir quais são as condições de contorno em cada grid. O Landlab permite definir as condições nos nodes de contorno (*boundary nodes*), onde os links entre eles podem ser ativos, fixos ou inativos. Um link ativo permite que o fluxo passe por ele, um link fixo permite fluxo, porém é um fluxo de valor fixo, e o link inativo não permitirá a passagem de fluxo por ele (Hobley *et al.*, 2017). Para mais informações sobre como interagir com as condições de contorno no Landlab, consultar a seção 3.1.4. de Hobley *et al.* (2017).

Os componentes (*components*) são objetos python que simulam processos dentro do Landlab (Hobley *et al.*, 2017), tais processos são simulados numericamente e podem ser aplicados em conjuntos em um único grid. Ou seja, é possível juntar diferentes componentes (que representam diferentes tipos de processos físicos) dentro de um modelo de evolução do relevo. Essa “personalização” dos modelos (Hobley *et al.*, 2017) é uma das vantagens de se

implementar o Landlab, com uma fácil e rápida acoplagem dos componentes durante a etapa de modelagem da superfície terrestre. A interface do Landlab já facilita o uso e a acoplagem dos componentes, sendo possível inseri-los no modelo com apenas 1 linha de código em python. Além disso, existe um repositório do Landlab (constantemente atualizado) com diversos componentes que podem ser implementados e acoplados nos modelos, além disso, no mesmo repositório é possível ver uma revisão com os princípios físicos de cada componente e como acoplá-los na modelagem dentro do Landlab, com alguns exemplos (consultar Barnhart *et al.* (2020a)).

Por último, o Landlab oferece uma diversidade de ferramentas para que seja possível operar modelos, dados de saída e resultados com outros programas de análise de dados e visualização de gráficos e mapas (Hobley *et al.*, 2017). Essa também é uma vantagem do Landlab pois oferece diversas compatibilidades com outras plataformas, como os sistemas de informação geográfica (*e.g.* ArcGIS). Para mais informações, consultar Hobley *et al.* (2017) e Barnhart *et al.* (2020a).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente projeto propõe a implementação de um modelo de evolução do relevo (LEM) em uma paisagem pós-mineração. Esse modelo foi usado para simular como a topografia vai evoluir ao longo de 10000 anos tanto em uma bacia que passou pelo processo de mineração, quanto em uma bacia análoga não minerada, a método de comparação. Além disso, foram simuladas e comparadas as taxas de erosão média, amplitude de relevo e mapas de profundidade de erosão para as bacias minerada e não minerada, além das cavas das minas e das pilhas de estéreis nos seguintes tempos simulados: 100, 500, 1000, 5000 e 10000 anos. Os modelos foram parametrizados e implementados da mesma forma para as 2 bacias, com o objetivo de investigar e quantificar o papel que a topografia típica de estruturas minerárias possui no controle evolução do relevo na bacia em que elas estão inseridas.

4.1 Áreas de Estudo

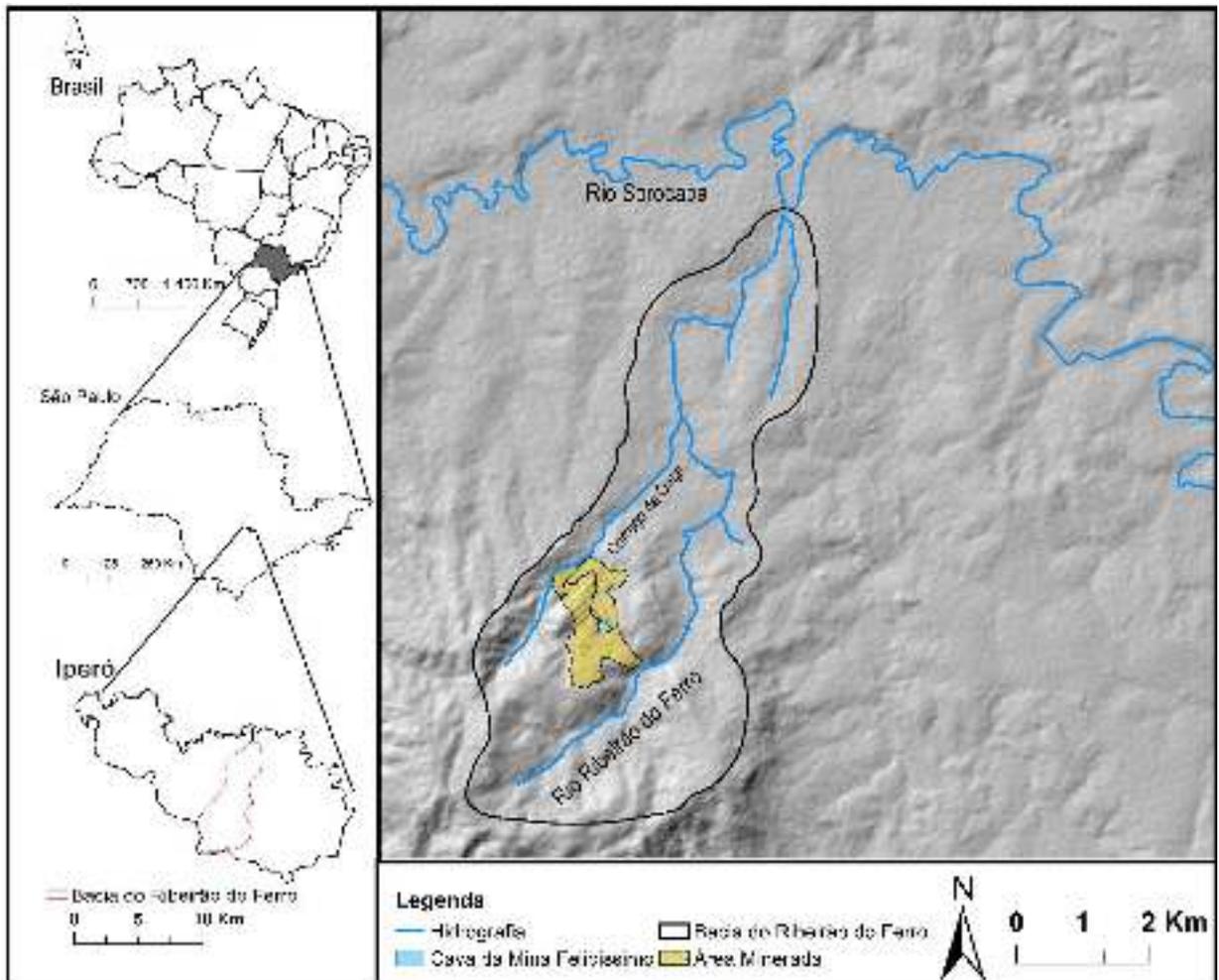
Neste trabalho foram analisadas 2 bacias análogas, a primeira onde ocorreu um processo de mineração no passado e hoje se encontra revegetada, referida aqui como B1, e a segunda a qual não houve nenhum processo minerário registrado, referida como B2. As bacias estão

inseridas em contextos climáticos e geológicos similares, além de apresentar valores de declividade média das encostas e amplitude de elevação próximos.

4.1.1 Bacia Minerada

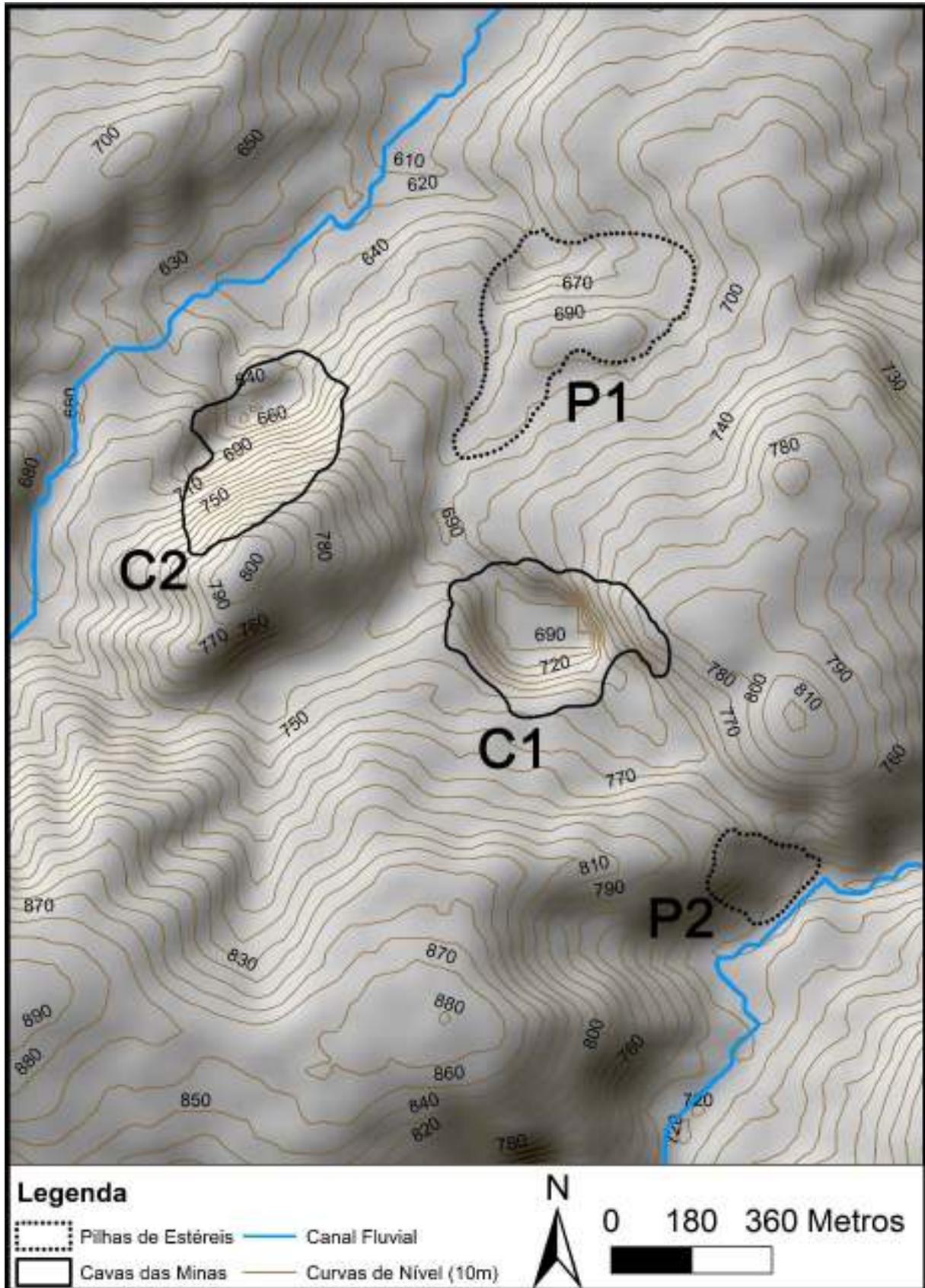
A área de estudo deste trabalho compreende as minas de calcário Ipanema e Felicíssimo. Essas minas estão localizadas na Floresta Nacional de Ipanema, no município de Iperó/SP (Figura 8), a 15 km de Sorocaba e a 120 km de São Paulo. A área de estudo está situada dentro da bacia do rio Ribeirão do Ferro, afluente do rio Sorocaba, a partir de agora essa bacia será referida no texto como B1. A bacia B1 possui diversas estruturas, porém nesse trabalho foi analisada a evolução geomórfica das cavas da bacia minerada e das pilhas de estéril mais importantes as quais serão referidas a partir de agora como C1, C2, P1 e P2 respectivamente (Figura 9). As minas de Ipanema e Felicíssimo foram ativadas na década de 1950, contudo, a partir da criação da Floresta Nacional de Ipanema em 1992 começou a ser concebido um projeto de recuperação da área minerada (Sánchez e Neri, 2013). Nesse contexto, iniciou-se a implementação do plano de fechamento da mina, com a conclusão da revegetação da área sendo realizada em 2011 (Sánchez e Neri, 2013). Atualmente, no Plano de Manejo da bacia do rio Sorocaba, as áreas exploradas pela mineração de calcário são classificadas como Zona de Recuperação. Conforme o documento (ICMBio, 2017), a Zona de Recuperação engloba áreas consideravelmente antropizadas, e um de seus objetivos é recuperar regiões afetadas pelos processos erosivos e degradação devido à mineração. A bacia minerada (B1) tem área total de 29,5 km², possui altitude mínima de 529 metros e máxima de 976 metros, além de ângulos de encosta que chegam até 44° (Figura 10). Em relação aos aspectos climáticos, segundo a classificação de Koeppen, a área está inserida em dois tipos de condições climáticas: Cfa e Cwa. A classificação Cfa representa clima subtropical quente, constantemente úmido, com inverno menos seco, enquanto Cwa representa clima subtropical quente, com inverno mais seco (Albuquerque e Rodrigues, 2000; ICMBio, 2017). A precipitação média anual é de 1.400 mm, com mínimo de 800 mm e máximo de 2.200 mm (ICMBio, 2017).

Figura 8 – Localização da área minerada, ocupada pelas minas Felicíssimo e Ipanema. A área está dentro da bacia do rio Ribeirão do Ferro, entre o rio Ribeirão do Ferro e o córrego da Onça.



A soma das áreas de C1, C2, P1 e P2 chega ao total de 0.4 km², representando 1.35% da área total da bacia, sendo importante destacar que tais estruturas foram submetidas ao processo de recuperação ambiental entre 2000 e 2008 (Nepomuceno, 2019) (Figuras 11, 12 e 13). Com o objetivo de alcançar a estabilidade física desses taludes, P1 e P2 passaram pelo processo de conformação topográfica e recomposição vegetal, com a plantação de mais de 90 mil mudas de diversas espécies nativas da mata atlântica (Nepomuceno, 2019). Além disso, as faces dos taludes foram cobertas com uma camada de matéria orgânica (compostagem) para o favorecimento do crescimento da vegetação e controle erosivo (Nepomuceno, 2019).

Figura 9 – Localização das Cavas das Minas e pilhas de estêreis que foram investigadas nesse trabalho. As estruturas estão sobrepostas no relevo sombreado com as curvas de nível intervaladas em 10 metros.



Fonte: Nepomuceno (2015).

Figura 10 – Mapa de ângulo das encostas das estruturas minerárias e de seu entorno. Nota-se que os maiores ângulos de encosta se encontram justamente dentro das cavas C1 e C2.

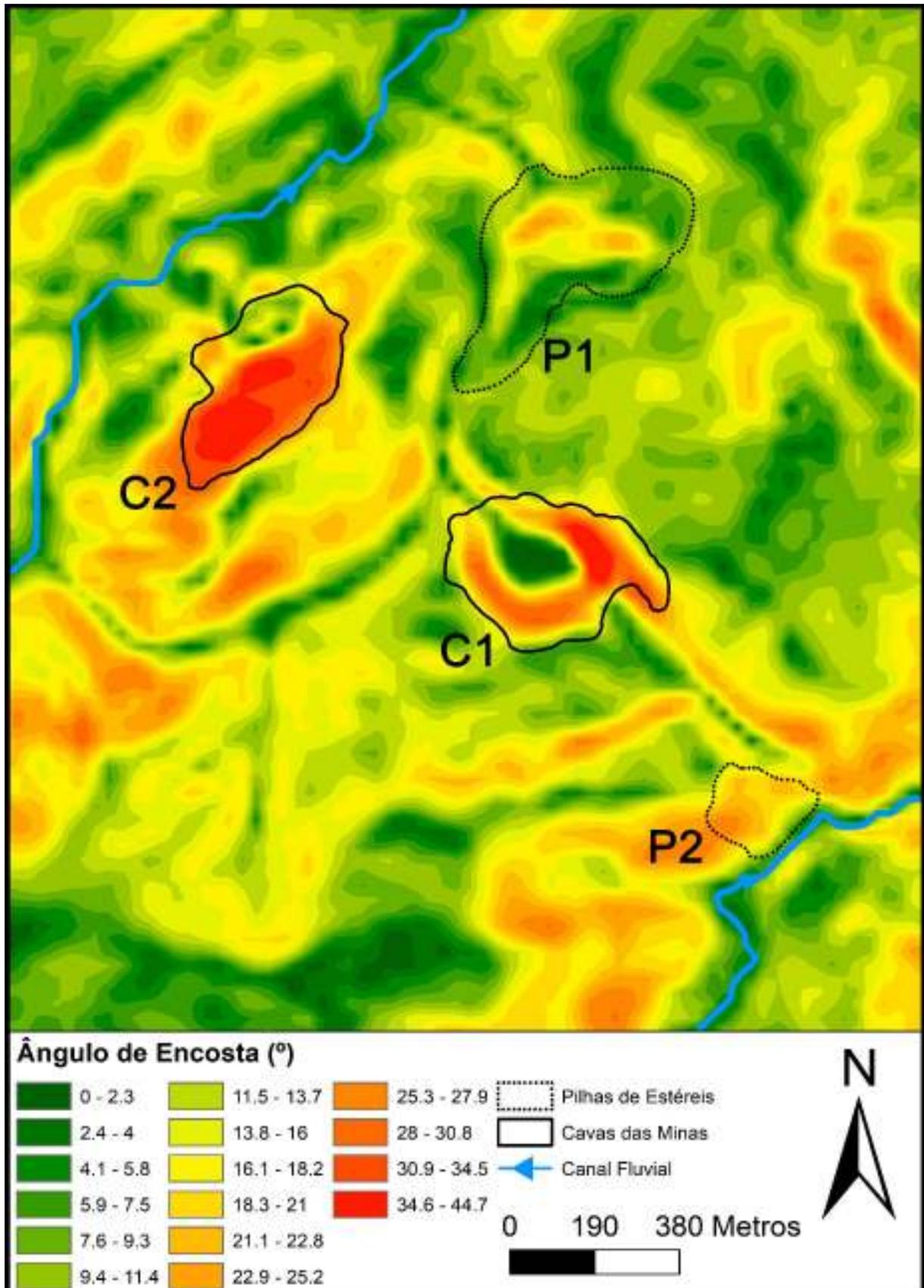
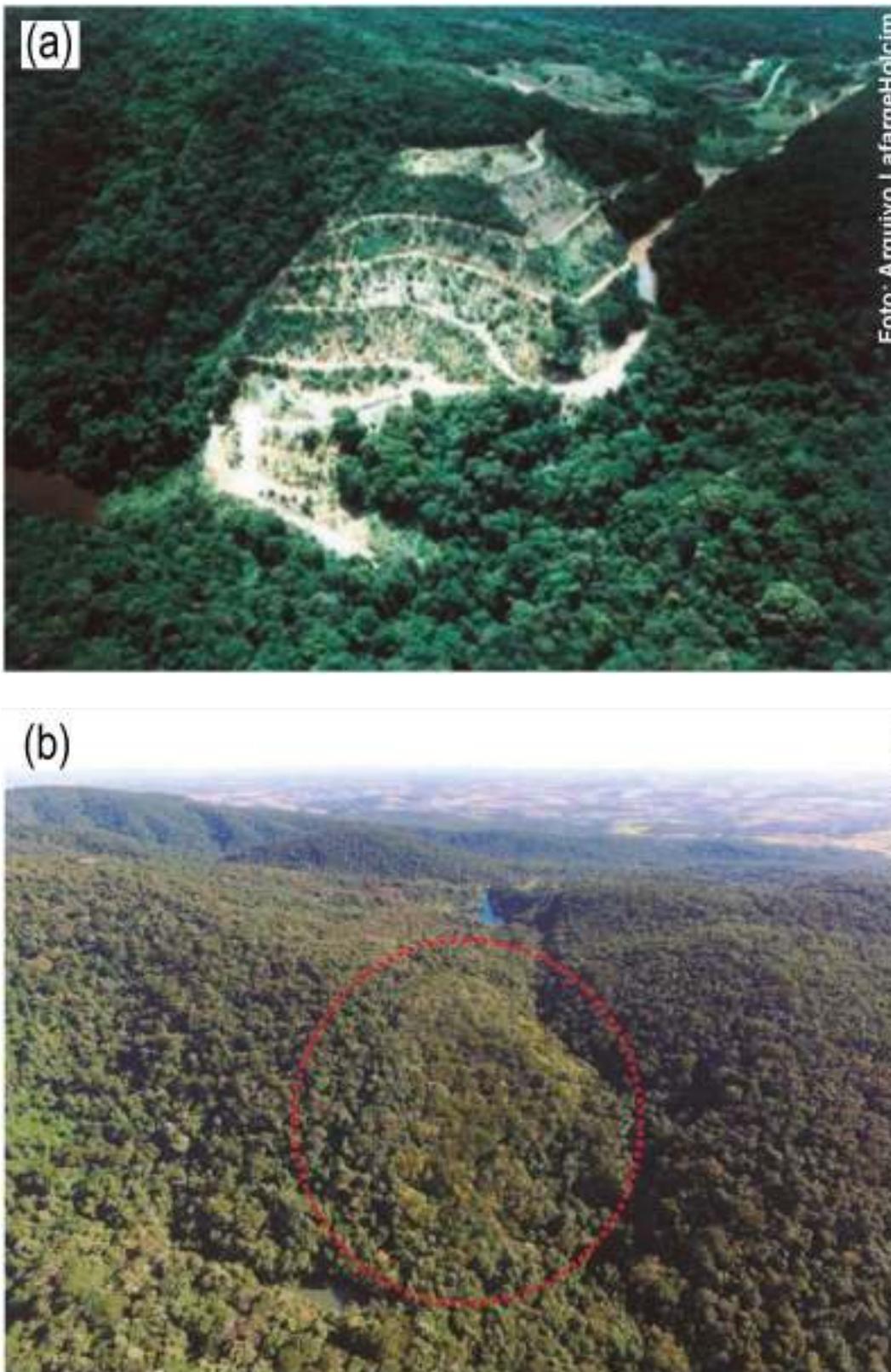


Figura 11 – (a) Cava C1 em funcionamento no ano de 1983 e (b) a mesma área em 2017, após passar pelo processo e recuperação ambiental. Nota-se a revegetação completa da área e a criação de um lago na cava da mina.



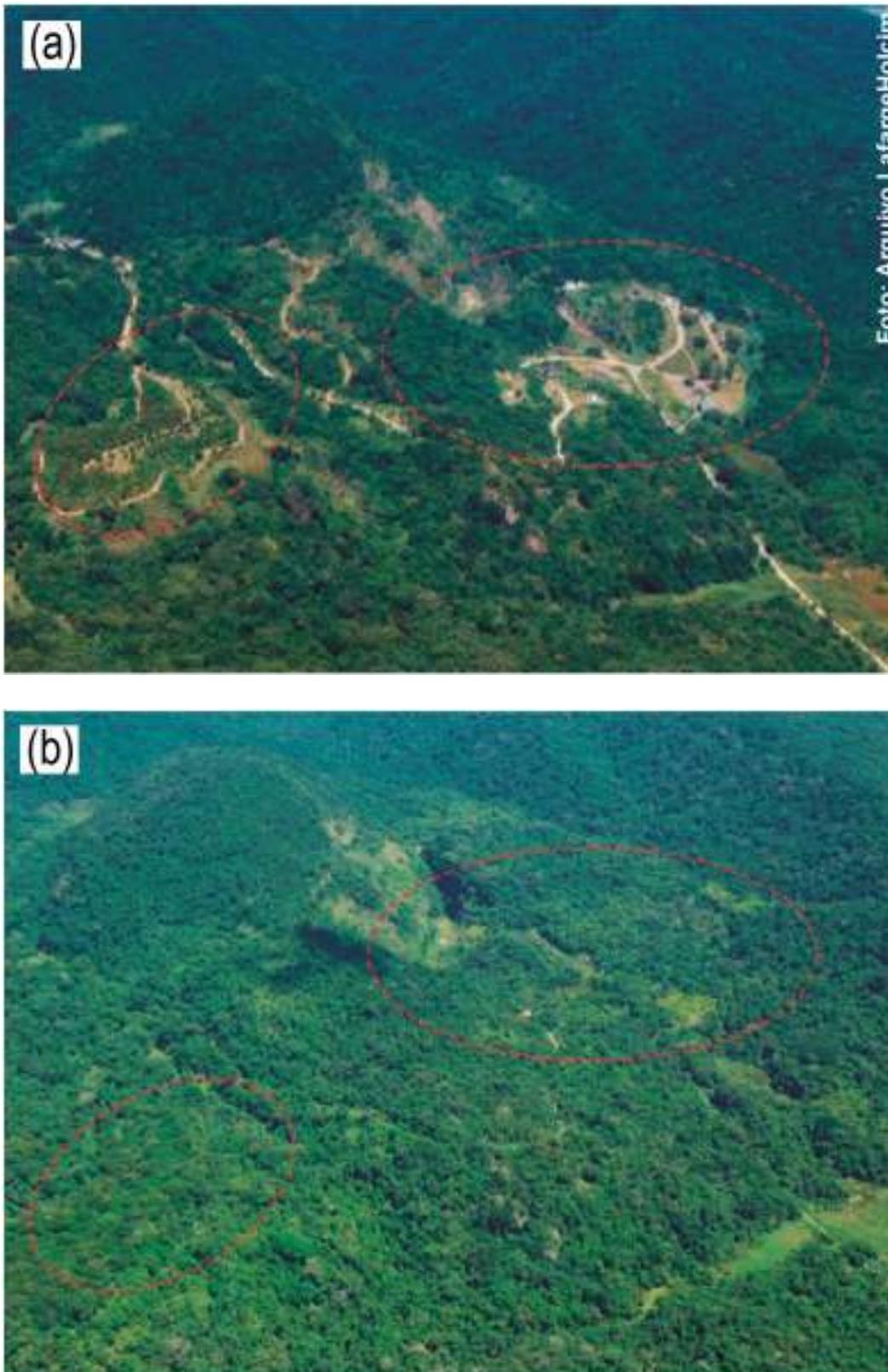
Fonte: Nepomuceno (2019).

Figura 12 – (a) Pilha de estéril P2 durante o processo de revegetação em 2002 e (b) o mesmo local em 2017, 15 anos após o final da revegetação da área.



Fonte: Nepomuceno (2019).

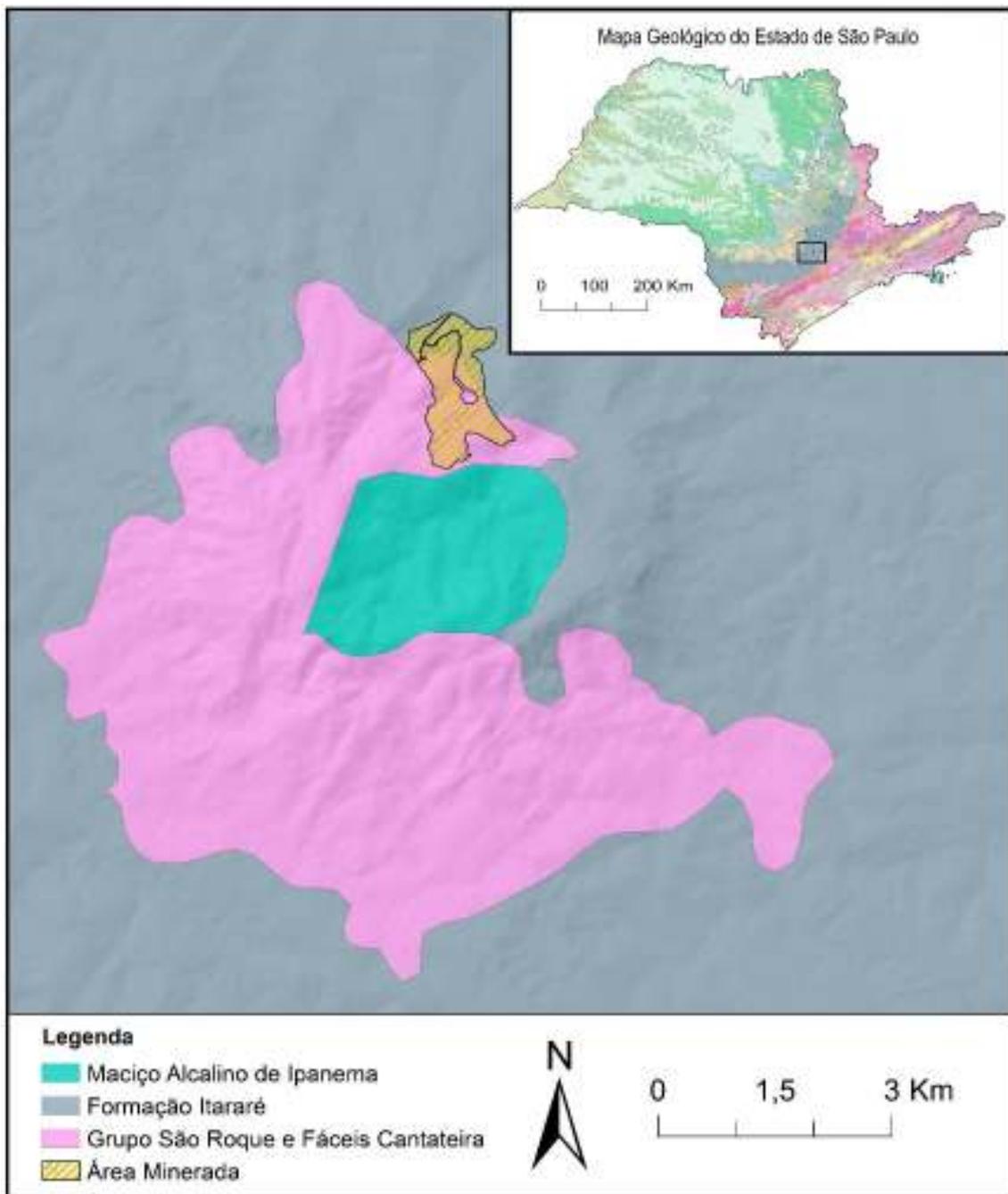
Figura 13 – (a) Pilha de estéril P1 (círculo vermelho esquerdo) e a área de britagem da mina (círculo vermelho direito) durante o processo de revegetação em 2005 e (b) o mesmo local em 2017, 12 anos após o final da revegetação da área.



Fonte: Nepomuceno (2019).

As minas de Felicíssimo e Ipanema estão localizadas na borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná, mais especificamente na Serra de Ipanema (ou Serra de Araçoiaba). A geomorfologia local é caracterizada por colinas e morros altos (ICMBio, 2017) e marcada pelo relevo dômico de Araçoiaba, estruturado pelo afloramento de intrusões alcalinas (composta por fenitos, piroxenitos e carbonatitos) datadas do mesozoico (123 Ma) formando hoje o maciço alcalino de Ipanema (Figura 13), o qual faz parte do Cinturão Orogênico do Atlântico (Davino, 1975). A sucessão de eventos que marcaram a abertura do oceano atlântico também foram responsáveis por um soerguimento do embasamento cristalino que hoje circunda as intrusões alcalinas (Davino, 1975). O embasamento cristalino é datado do pré-cambriano (1000 – 570 Ma), sendo constituído pelo Grupo São Roque e pelas Fácies Cantareira, o Grupo São Roque é formado principalmente por filitos, xistos, anfíbolitos e calcários, enquanto as Fácies Cantareira são formadas por granitos (ICMBio, 2017). Tanto o maciço alcalino de Ipanema, como o embasamento cristalino estão aflorados na Formação Itararé, datada do permocarbonífero (~300 Ma) e formada principalmente por rochas sedimentares como arenitos e conglomerados (ICMBio, 2017). Essa configuração geológica estrutura o contraste geomorfológico que se vê entre a Serra de Ipanema e a Depressão Paulista da Bacia do Paraná. Próximo à área de estudo também é possível encontrar depósitos aluvionares dos rios Iperó, Ipanema e Sorocaba datados desde o cenozoico (65 Ma) (ICMBio, 2017).

Figura 14 – Mapa geológico da área de estudo e seu contexto regional (canto superior direito). A área de estudo está localizada na borda leste da bacia sedimentar do Paraná.



Fonte: CPRM (2006).

4.1.2 Bacia Não Minerada

A bacia não minerada (B2) investigada por este trabalho se localiza na cidade de Atibaia, próximo à porção leste da Serra de Atibaia (ou Serra de Itapetinga), sendo uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Atibaia (Figura 15). A bacia B2 foi escolhida aqui para servir como referência de uma bacia hidrográfica análoga à bacia B1, porém, sem possuir alterações na topografia advindas da mineração. B2 se localiza dentro do Parque Estadual de Itapetinga, com a vegetação sendo composta principalmente de florestas secundárias, porém com a presença de algumas áreas de pastagens (Fundação Florestal, 2018). A bacia não minerada (B2) se situa no planalto atlântico, mais especificamente na face ocidental da serra da Mantiqueira, e seu relevo é caracterizado por morros altos (Fundação Florestal, 2018). Além disso, a área possui elevação máxima e mínima de 1139 e 753 metros, respectivamente, além de ângulos de encosta que variam de 7° a 43°. A tabela 1 mostra a comparação entre os aspectos topográficos das bacias minerada e não minerada. Em relação ao contexto climático, segundo a classificação de Koeppen, a região de Atibaia apresenta um clima intermediário entre Cwa e Cwb (clima tropical de altitude), com precipitação média anual de 1348 mm (Carvalho *et al.*, 1975). O contexto geológico local é composto por rochas graníticas (Granito Atibaia) datadas do Neoproterozóico (1000 – 570 Ma), intrusivas em metassedimentos (Anfibolitos) do Mesoproterozoico (1600 – 1000 Ma), além de xistos e gnaisses migmatíticos também formados no Neoproterozóico (CPRM, 2006).

Figura 15 – Delimitação da bacia não minerada, com o relevo sombreado e as curvas de nível definidas em 15 metros. A bacia em questão é uma sub-bacia do rio Atibaia, este que flui na direção nordeste, sendo um afluente do rio Piracicaba.

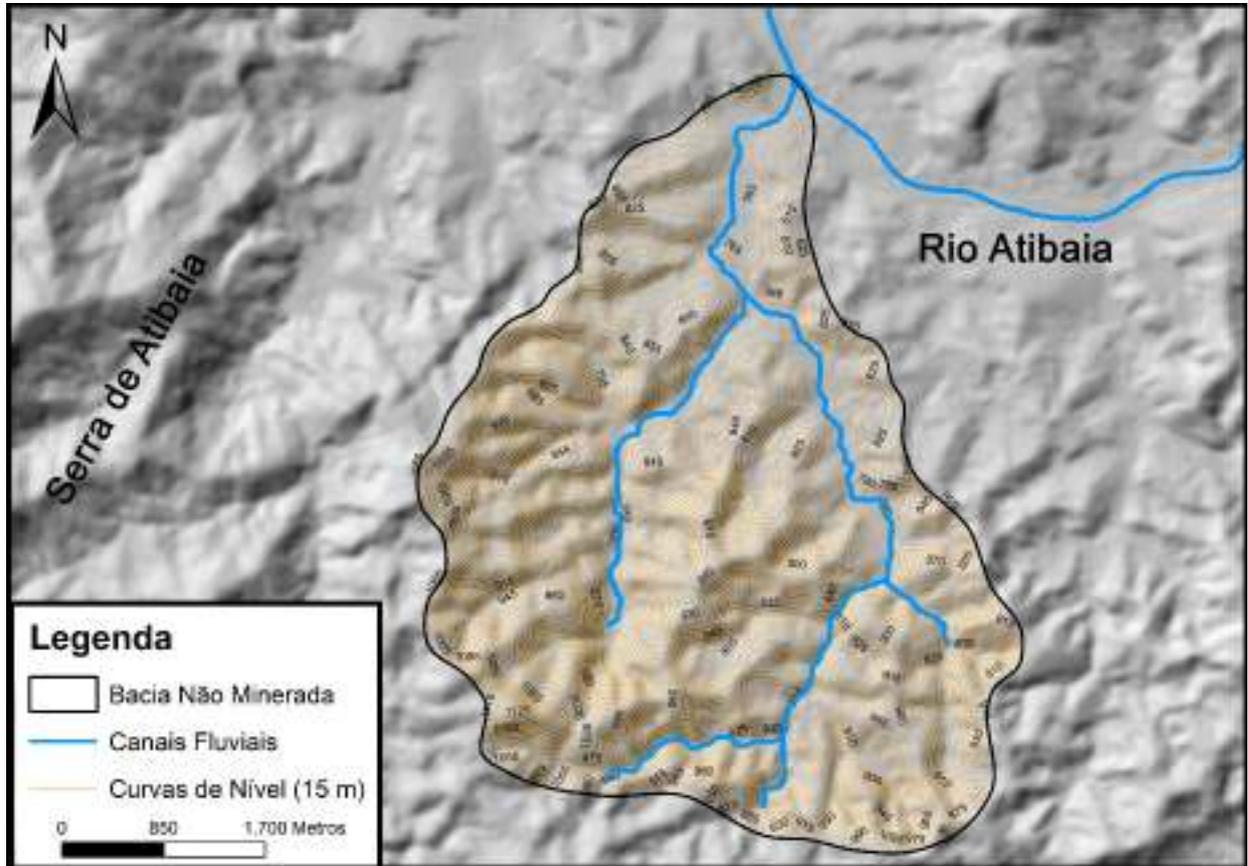


Tabela 1 – Comparativo entre os máximos, mínimos, média e amplitude dos valores de elevação e ângulo de encosta para as bacias minerada e não minerada.

Parâmetros	Bacia Minerada	Bacia Não Minerada
Elevação (m)	-	-
Máxima	976	1139
Mínima	529	753
Média	697	863
Amplitude	447	386
Ângulo de encosta (°)	-	-
Máximo	44	43
Mínimo	0	7
Média	6	14

4.2 Parametrização do Modelo

O modelo de evolução do relevo escolhido para ser aplicado nesse trabalho representa os processos de difusão não-linear e de incisão fluvial (pelo modelo Stream-Power) (Eq. 7) e foi implementado dentro do ambiente do Landlab. De acordo com a Eq. 7, é necessário que se obtenha um coeficiente de erodibilidade (K) específica para a área de estudo, valores da descarga (Q), do gradiente (S), um coeficiente de difusividade (D) e valores de elevação (n). Além disso, os expoentes m e n também são expoentes específicos para a área de estudo, os quais precisam ser apropriadamente estimados. Este trabalho considera a difusividade (D) e o coeficiente de erodibilidade (K) como constantes ao longo de toda área, assumindo que o solo é homogêneo, a litologia é uniforme, e não existem grandes variações de uso e cobertura do solo. Além disso, é importante salientar que o modelo utilizado não leva em consideração de maneira direta a influência da vegetação ou do intemperismo do manto rochoso como agentes controladores das taxas de erosão nessa paisagem.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -KQ^m S^n + \frac{D \nabla z}{1 - (|\nabla z|/S_c)^2} \quad (7)$$

Para se implementar o modelo de evolução do relevo, é necessário que se tenha como dado de entrada um modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo, assim é possível extrair parâmetros topográficos como descarga (Q), gradiente (S) e elevação (n). O MDE escolhido nesse trabalho foi o *COPERNICUS30*, com resolução de 30 metros. Foram simulados diferentes cenários erosivos, sendo eles: 1) erosão alta; 2) erosão moderada; e 3) erosão baixa (Tabela 2). Tais cenários foram simulados para 5 escalas de tempo diferentes, sendo analisados resultados para a evolução do relevo em 100, 500, 1000, 5000 e 10000 anos. Para isso, foi determinado um mesmo *timestep* de 50 anos para todos os cenários temporais. Além dos parâmetros topográficos e dos expoentes m e n , é preciso definir os valores dos coeficientes de difusividade e de erodibilidade. Nas últimas décadas diversos autores já estimaram coeficientes de difusividade (*e.g.* Fernandes e Dietrich (1997); Richardson *et al.* (2019)) e de erodibilidade (consultar Barnhart *et al.* (2020b) ao redor do mundo. Em relação aos processos tectônicos, existe a possibilidade e é plausível que sejam simulados cenários com pulsos tectônicos, entretanto, a taxa de soerguimento para todos os cenários neste trabalho foi definida como 0 mm/ano. O valores do coeficiente K e dos expoentes m e n foram retirados do trabalho de Stock e Montgomery (1999), enquanto os valores do coeficiente D foram extraídos a partir de

Richardson *et al.* (2019). Os valores utilizados para cada cenário erosivo são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Valores utilizados para a parametrização do modelo de evolução do relevo implementado neste trabalho. Os valores de taxas de soerguimento foram definidos como 0 mm/ano para todos os cenários. *valor retirado de Stock e Montgomery (1999) **valor retirado de Richardson *et al.* (2019).

Parâmetros	Erosão Baixa	Erosão Moderada	Erosão Alta
K ($m^{0.2}ano^{-1}$)	4×10^{-7} *	2×10^{-6} *	10^{-5}
A (m^2)	Copernicus 30m	Copernicus 30m	Copernicus 30m
S	Copernicus 30m	Copernicus 30m	Copernicus 30m
D (cm^2ano^{-1})	7.4×10^{-3} **	1.28×10^{-2} **	2×10^{-2}
S_c	0.4	0.4	0.4
m^*	0.4	0.4	0.4
n^*	1	1	1

5 RESULTADOS

Foram mapeados os focos de erosão ao longo do tempo dentro da bacia minerada (Figuras 16, 17 e 18). De forma geral, é possível entender que áreas convexas são dominadas por erosão, perdendo elevação ao longo do tempo. Enquanto isso, áreas côncavas do relevo são preenchidas pelos sedimentos mobilizados pelos processos erosivos, ganhando elevação ao longo do tempo. A assinatura da ação desses processos no relevo se dá pela diminuição de sua amplitude altimétrica, resultando no rebaixamento dos topos convexos, ganho altimétrico das áreas côncavas e encostas com menores ângulos de encosta. Ao analisar as estruturas minerárias, é possível observar que enquanto as cavas C1 e C2 apresentam as maiores diferenças de elevação em relação à topografia inicial ao longo do tempo, as pilhas de estéril seguem na mesma média da bacia (Figuras 16, 17 e 18). Além disso, os focos de erosão se localizam e deposição se localizam dentro das cavas, evidenciando que essa topografia típica da mineração possui um controle na intensificação dos processos erosivos. Por outro lado, as cavas também apresentam os maiores focos de erosão, indicando que os sedimentos mobilizados pelos processos erosivos são depositados dentro da mesma estrutura. Para o cenário de erosão baixa (Figura 16), alguns focos deposicionais começam a surgir em áreas côncavas do relevo as quais estão fora das estruturas minerárias. Ao simular os cenários de erosão moderada e alta, é de se esperar que os focos erosivos e deposicionais se intensifiquem

(Figuras 17 e 18), como por exemplo o aparecimento dos focos deposicionais nas áreas externas às estruturas minerárias antes dos 10000 anos

Figura 16 – Diferenças de elevação (Δh) entre os modelos digitais de elevação de cada cenário de tempo e o da topografia inicial para o cenário de erosão baixa. As diferenças de elevação mostram tanto as zonas predominante erosivas quanto as deposicionais. As cores que se aproximam do verde representam zonas deposicionais (Δh positivo), enquanto as cores que se aproximam do vermelho representam zonas erosivas (Δh negativo).

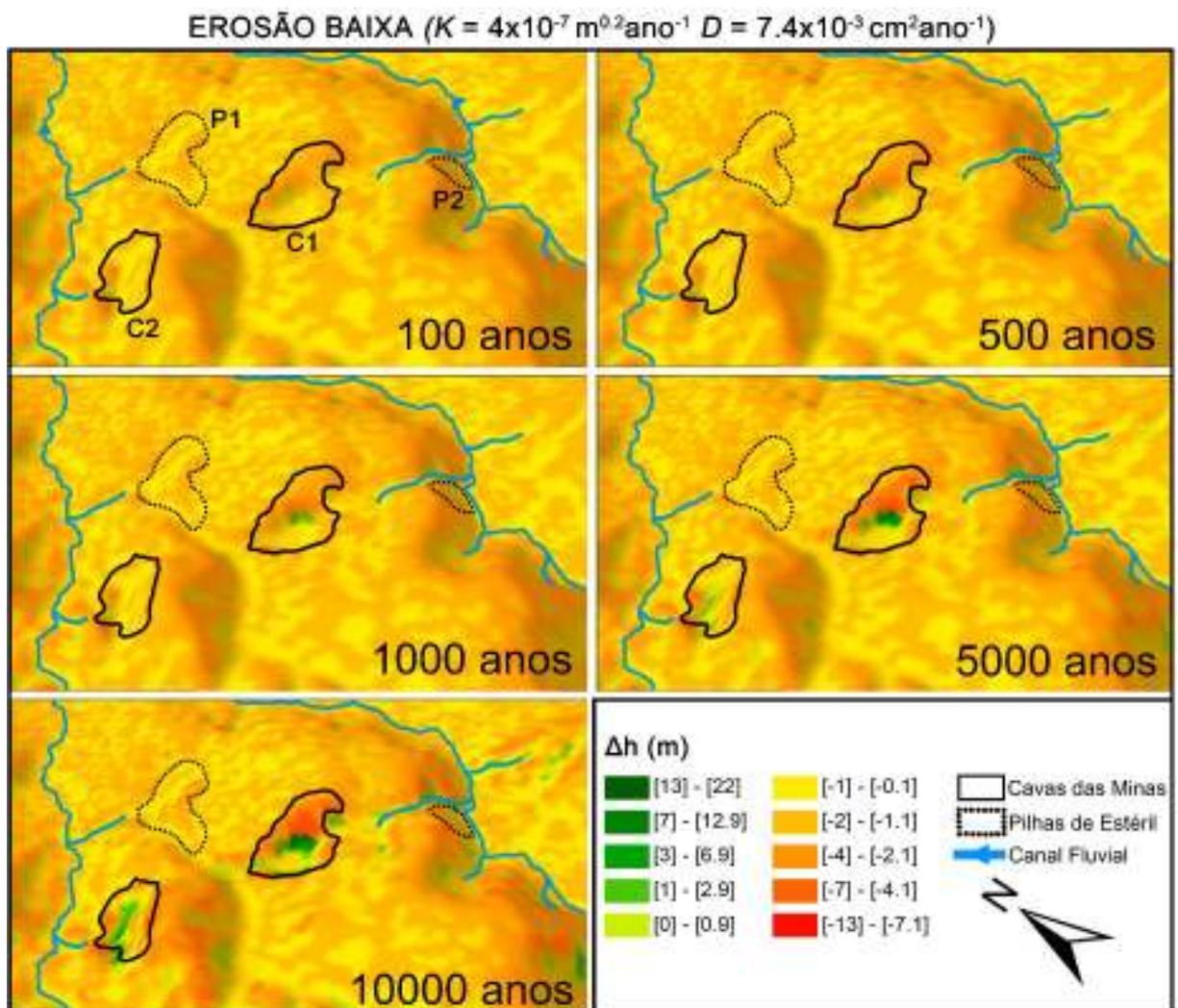


Figura 17 – Diferenças de elevação (Δh) entre os modelos digitais de elevação de cada cenário de tempo e o da topografia inicial para o cenário de erosão moderada.

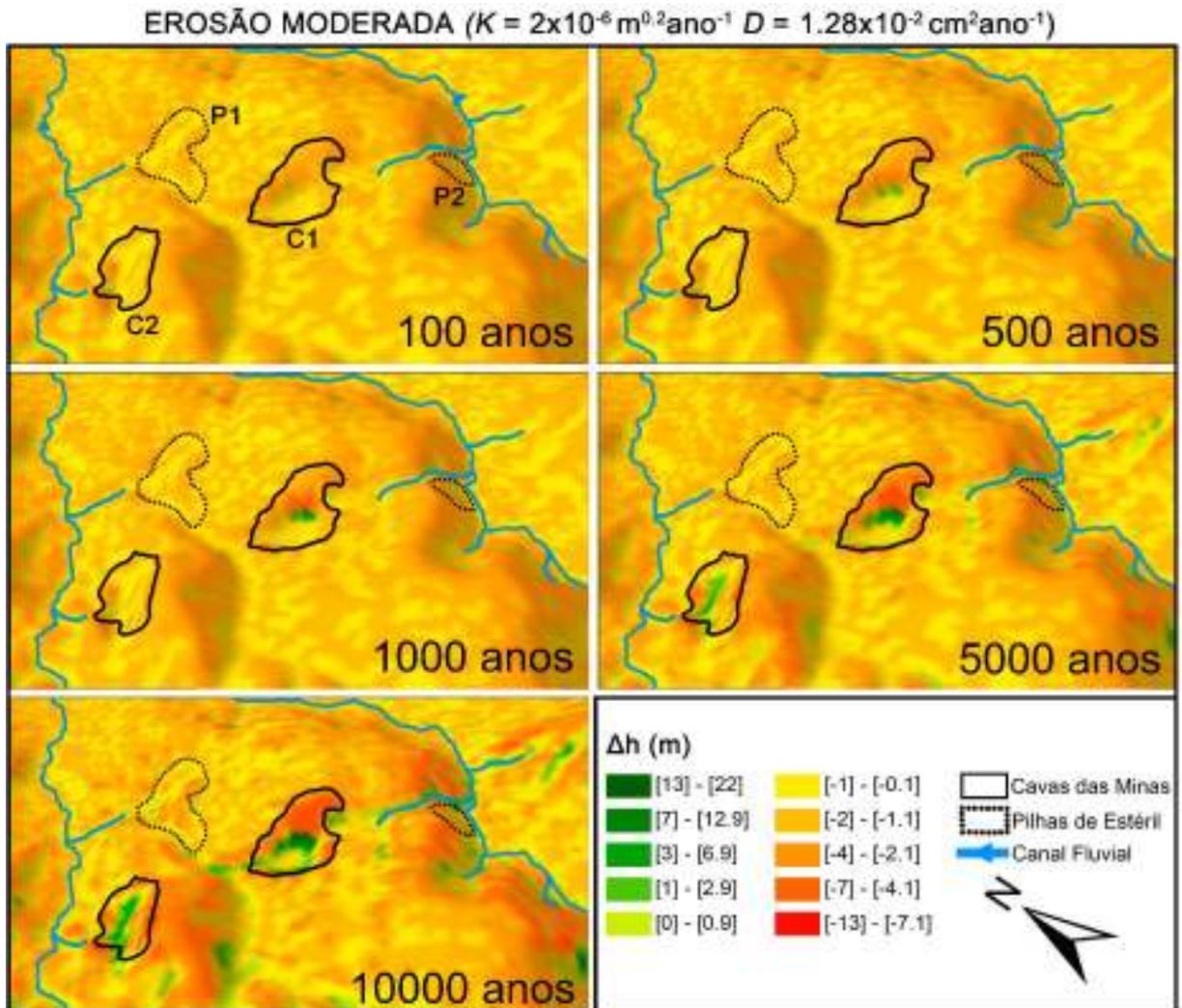
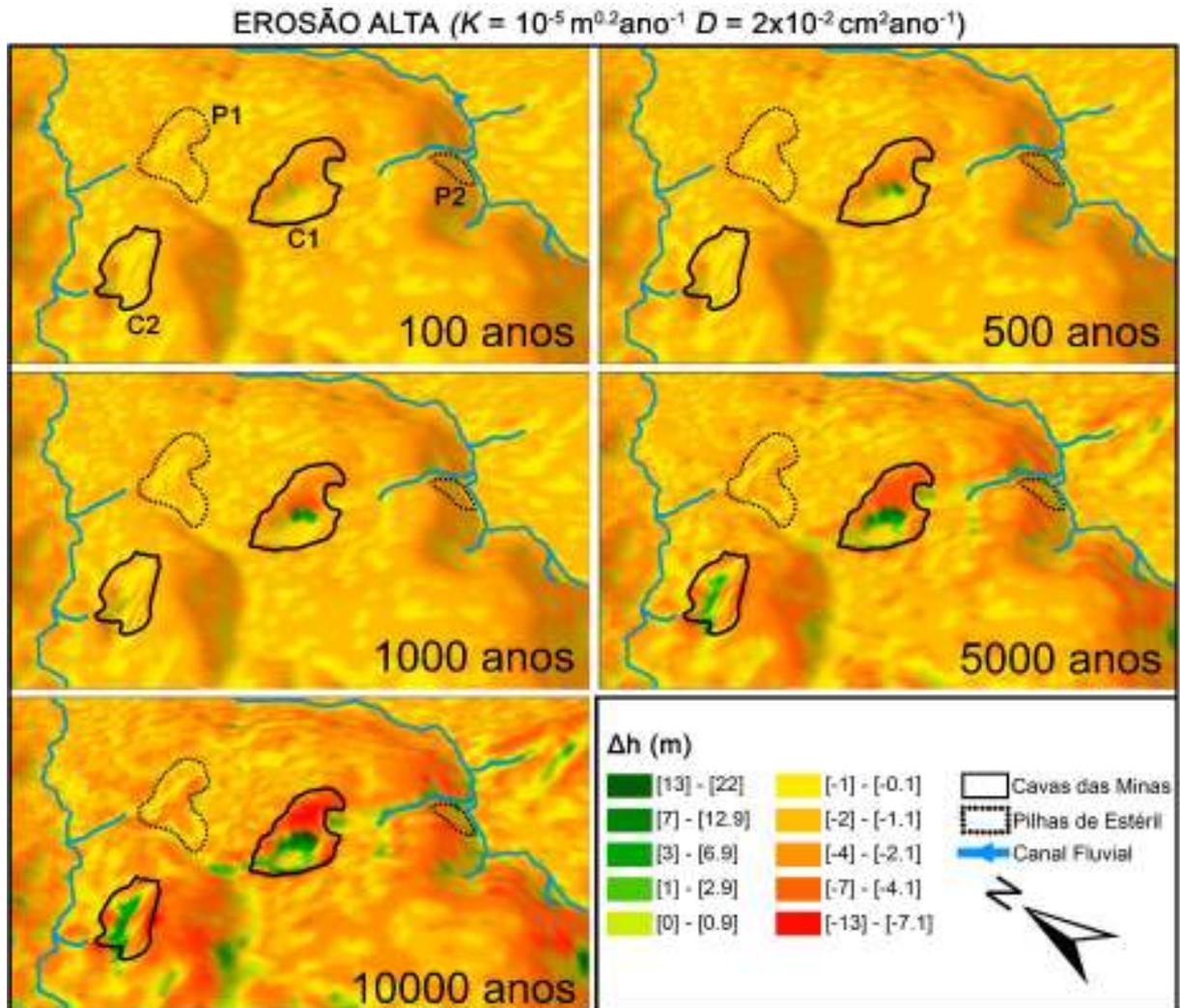


Figura 18 – Diferenças de elevação (Δh) entre os modelos digitais de elevação de cada cenário de tempo e o da topografia inicial para o cenário de erosão alta. Nesse cenário são encontrados os maiores valores de Δh justamente pelo maior valor atribuído aos parâmetros que definem a eficiência erosiva.



A partir da implementação da Eq. 7, foi possível simular e analisar a evolução do relevo das áreas de estudo deste trabalho. Em termos gerais, a simulação mostra que com a ação dos processos erosivos, o relevo tende a apresentar uma diminuição de sua amplitude altimétrica, além da diminuição dos ângulos de encosta e do aumento das profundidades erosivas ao longo do tempo. Para o cenário de erosão moderada e alta já é esperado que os valores de amplitude de elevação diminuam, enquanto as taxas médias de erosão e as profundidades máximas de erosão também aumentem para cada tempo simulado (Tabelas 4 e 5). Os resultados mostram que em todos os cenários de intensidade erosiva (Tabelas 3, 4 e 5), as bacia minerada (B1) e não minerada (B2) possuem taxas de erosão semelhantes para os tempos simulados. Além disso,

as taxas de erosão média estimadas neste estudo revelam que os valores para as cavas C1 e C2 e para as pilhas P1 e P2 são menores que a média da bacia minerada (B1). Dentre todas as taxas de erosão média, as pilhas de estéril P1 e P2 apresentam os menores valores estimados. Contudo, apesar das diferenças iniciais de taxas de erosão média, os valores calculados para todas as áreas tendem a se aproximar ao final dos 10000 anos simulados.

Ao analisar as profundidades máxima de erosão, as estimativas evidenciam que a B1 possui focos erosivos mais profundos em comparação com B2. É importante destacar que, em todo o tempo simulado, as maiores profundidades erosivas se localizam dentro das cavas C1 ou C2 (Tabelas 3, 4 e 5). Da mesma forma que as pilhas P1 e P2 apresentam as menores taxas de erosão, elas também apresentam valores menores de profundidade máxima de erosão, quando comparados com as bacias B1 e B2 e as cavas C1 e C2. No caso do cenário de baixa erosão (Tabela 3), ao final dos 10000 anos, as profundidades de erosão alcançaram um máximo de 2.8 e 1.7 metros nas P1 e P2, respectivamente. Nesse sentido, ao final dos 10000 anos simulados com parâmetros de erosão moderada (Tabela 4), a profundidade máxima de erosão para P1 e P2 atinge 3.9 e 2.8 metros, respectivamente. Por fim, para o cenário de alta erosão (Tabela 5) esses valores chegam a 5.3 e 4.6 metros para P1 e P2, respectivamente.

Tabela 3 – Cálculos de amplitude de elevação, taxa de erosão média por pixel e profundidade máxima de erosão a partir dos resultados das simulações considerando o cenário de erosão baixa ($K = 4 \times 10^{-7}$ e $D = 7.4 \times 10^{-3}$) para as bacias minerada e não minerada, cavas Felicíssimo e Ipanema, e Pilhas A e B.

Anos	Amplitude de Elevação (m)	Taxa de Erosão Média (mm/ano)	Ângulo de Encosta Máximo (°)	Profundidade Máxima de Erosão (m)
B1	-	-	-	-
(minerada)				
100	405.9	5.507	44	0.511
500	405.9	1.101	43	2.170
1000	405.8	0.550	42	3.631
50000	405.5	0.108	39	7.145
10000	405.0	0.053	38	7.252
B2 (não minerada)	-	-	-	-
100	375.9	5.543	43	0.105
500	375.9	1.108	43	0.506
1000	375.8	0.553	43	0.964
50000	375.1	0.105	40	3.502
10000	374.1	0.052	37	6.293
C1	-	-	-	-
100	98.3	5.190	44	0.511
500	95.9	1.038	43	2.170
1000	93.7	0.511	42	3.631
50000	85.7	0.117	38	7.145
10000	81.6	0.049	36	7.252
C2	-	-	-	-
100	150.9	5.000	40	0.059
500	150.8	0.982	40	0.297
1000	150.7	0.474	40	0.596
50000	149.0	0.082	39	2.874
10000	146.7	0.032	38	5.298
P1	-	-	-	-
100	64.9	4.539	24	0.046
500	64.8	0.907	24	0.226
1000	64.7	0.453	24	0.439
50000	63.7	0.090	24	1.760
10000	62.8	0.044	22	2.839
P2	-	-	-	-
100	65.9	4.166	26	0.021
500	65.9	0.833	26	0.106
1000	65.8	0.416	26	0.210
50000	65.3	0.083	26	0.973
10000	64.7	0.036	25	1.787

Tabela 4 – Cálculos de amplitude de elevação, taxa de erosão média por pixel e profundidade máxima de erosão a partir dos resultados das simulações considerando o cenário de erosão moderada ($K=2 \times 10^{-6}$ e $D=1.28 \times 10^{-2}$).

Anos	Amplitude de Elevação (m)	Taxa de Erosão Média (mm/ano)	Ângulo de Encosta Máximo (°)	Profundidade Máxima de Erosão (m)
B1	-	-	-	-
(minerada)				
100	405.9	5.747	44	0.877
500	405.9	1.149	42	3.351
1000	405.8	0.575	41	5.114
50000	405.1	0.116	38	7.465
10000	404.5	0.062	37	9.000
B2 (não minerada)	-	-	-	-
100	375.9	5.708	43	0.184
500	375.8	1.142	43	0.859
1000	375.7	0.570	42	1.585
50000	374.3	0.113	38	5.003
10000	372.6	0.063	35	8.083
C1	-	-	-	-
100	97.8	5.343	44	0.877
500	94.2	1.068	42	3.351
1000	91.3	0.503	41	5.114
50000	82.5	0.101	37	7.465
10000	78.5	0.052	34	8.000
C2	-	-	-	-
100	150.9	5.000	40	0.131
500	150.7	1.017	40	0.627
1000	150.4	0.416	40	1.187
50000	147.3	0.108	38	4.504
10000	143.1	0.039	37	9.000
P1	-	-	-	-
100	64.9	4.907	24	0.081
500	64.7	0.981	24	0.390
1000	64.5	0.484	24	0.739
50000	63.0	0.110	23	2.647
10000	61.7	0.057	21	3.964
P2	-	-	-	-
100	65.9	4.166	26	0.038
500	65.8	0.833	26	0.187
1000	65.7	0.416	26	0.369
50000	64.8	0.088	25	1.645
10000	63.7	0.041	23	2.890

Tabela 5 – Cálculos de amplitude de elevação, taxa de erosão média por pixel e profundidade máxima de erosão a partir dos resultados das simulações considerando o cenário de erosão alta ($K=10^{-5}$ e $D=10^{-2}$).

Anos	Amplitude de Elevação (m)	Taxa de Erosão Média (mm/ano)	Ângulo de Encosta Máximo (°)	Profundidade Máxima de Erosão (m)
B1	-	-	-	-
(minerada)				
100	405.9	6.578	43	1.373
500	405.8	1.331	42	4.653
1000	405.7	0.664	40	6.489
50000	404.9	0.161	37	7.901
10000	404.0	0.109	35	10.731
B2 (não minerada)	-	-	-	-
100	375.9	6.366	43	0.299
500	375.7	1.127	42	1.348
1000	375.4	0.639	41	2.408
50000	373.2	0.170	36	6.836
10000	370.5	0.119	33	9.551
C1	-	-	-	-
100	97.1	5.572	43	1.373
500	92.4	1.083	42	4.653
1000	89.1	0.580	40	6.489
50000	80.4	0.195	35	7.901
10000	76.2	0.141	32	7.473
C2	-	-	-	-
100	150.9	5.344	40	0.214
500	150.5	1.034	40	1.000
1000	149.9	0.568	39	1.859
50000	144.6	0.175	37	6.731
10000	138.3	0.114	35	10.731
P1	-	-	-	-
100	64.9	6.073	24	0.133
500	64.6	1.124	24	0.622
1000	64.3	0.607	24	1.152
50000	62.4	0.168	22	3.747
10000	61.1	0.115	20	5.386
P2	-	-	-	-
100	65.9	4.722	26	0.064
500	65.7	0.944	26	0.317
1000	65.5	0.472	26	0.620
50000	64.0	0.133	25	2.739
10000	62.7	0.115	24	4.683

Por fim, foram extraídos 4 perfis altimétricos (Perfis A, B, C e D) que mostram a evolução geomórfica de cada estrutura minerária em resposta à diferentes cenários de intensidade erosiva ao longo dos 10000 anos. Ao analisar o perfil A (cava C2), é possível observar que em todos os cenários erosivos (baixo, moderado e alto) ocorre, em maior ou menor intensidade, um rebaixamento gradativo do topo convexo da cava ao longo do tempo (Figura 19). A evolução geomórfica da C2 também evidencia que os sedimentos mobilizados pela erosão são depositados no fundo da cava, enquanto não há grandes mudanças de elevação na porção média das encostas dessa estrutura. O perfil B (Cava C1) (Figura 20) apresenta uma lógica similar à apresentada pelo perfil da estrutura anterior, onde as zonas erosivas ocorrem com maior intensidade nas porções da encosta que apresentam convexidades e maior ângulo. Enquanto isso o fundo da estrutura continua se mostrando como uma zona de deposição de sedimentos. O perfil B também evidencia que as encostas caminham para uma morfologia planar ao longo do tempo. A evolução geomórfica do perfil C (pilha P1) (Figura 21) revela que, apesar da estrutura não apresentar grandes mudanças de elevação ao longo do tempo, os topos convexos continuam sendo as zonas com maior foco de erosão. Nesse caso os sedimentos são depositados na base da encosta. O perfil D (Pilha P2) (Figura 22) possui a particularidade de estar próximo ao rio Ribeirão do Ferro. Essa é a estrutura minerária com menor mudanças de elevação ao longo do tempo, porém, é importante destacar que para os cenários de erosão baixa e moderada, o canal fluvial é preenchido com sedimentos vindo advindos da encosta. Contudo, ao aumentar a eficiência erosiva, essa situação é invertida, pois consequentemente o rio Ribeirão do Ferro vai apresentar uma maior potência fluvial. Isso se reflete no cenário de erosão alta do perfil D, com a gradativa perda de elevação do leito fluvial ao longo do tempo.

Figura 19 – Perfis altimétricos representando a evolução geomórfica da C2 para os 3 cenários erosivos simulados (baixo, moderado e alto). Cada linha representa um momento da evolução do relevo no local (topografia na condição inicial, aos 100, 500, 1000, 5000 e 10000 anos).

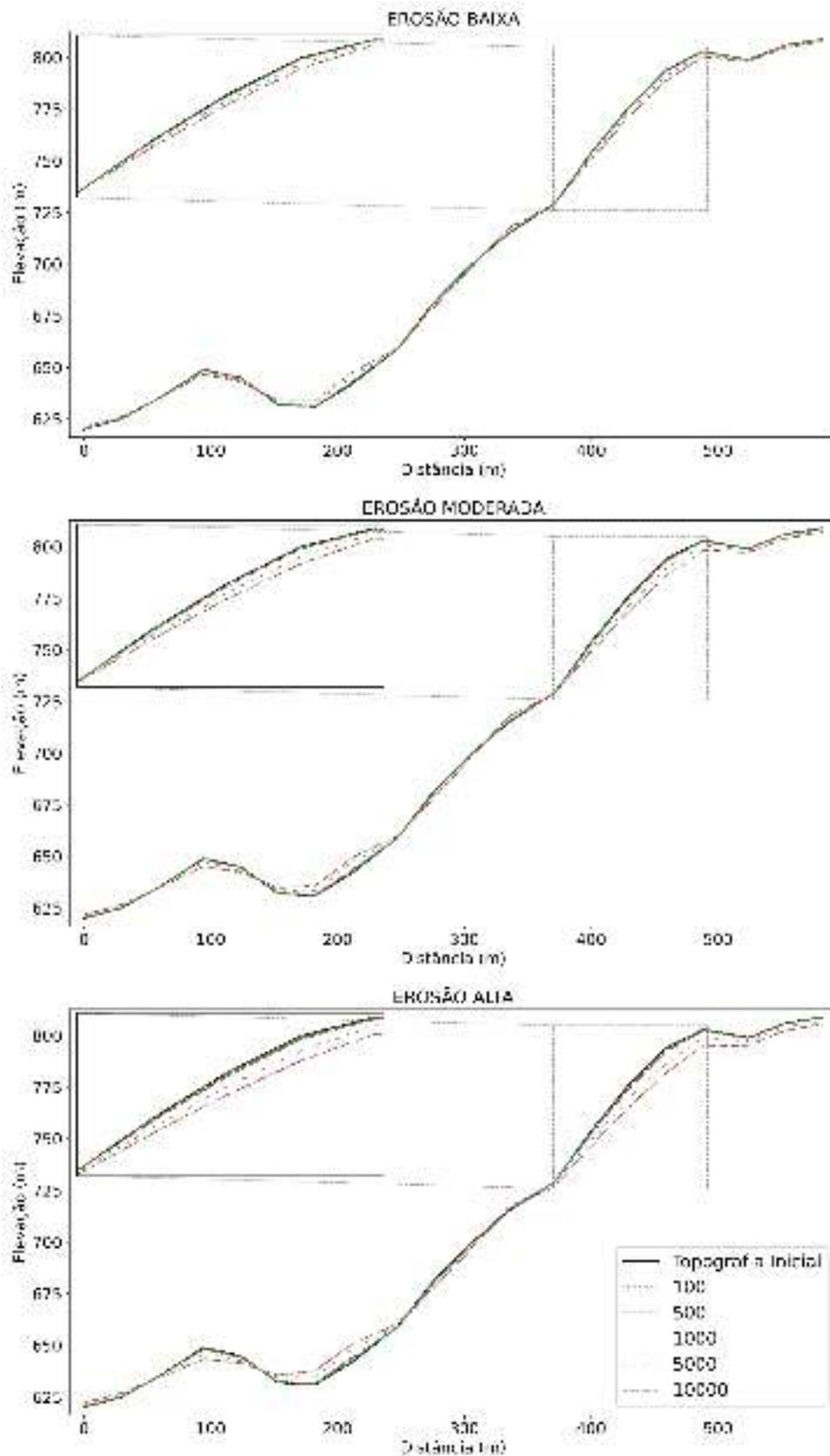


Figura 20 – Perfis altimétricos representando a evolução geomórfica da C1 para os 3 cenários erosivos simulados (baixo, moderado e alto) com destaque para o preenchimento gradativo do fundo da cava.

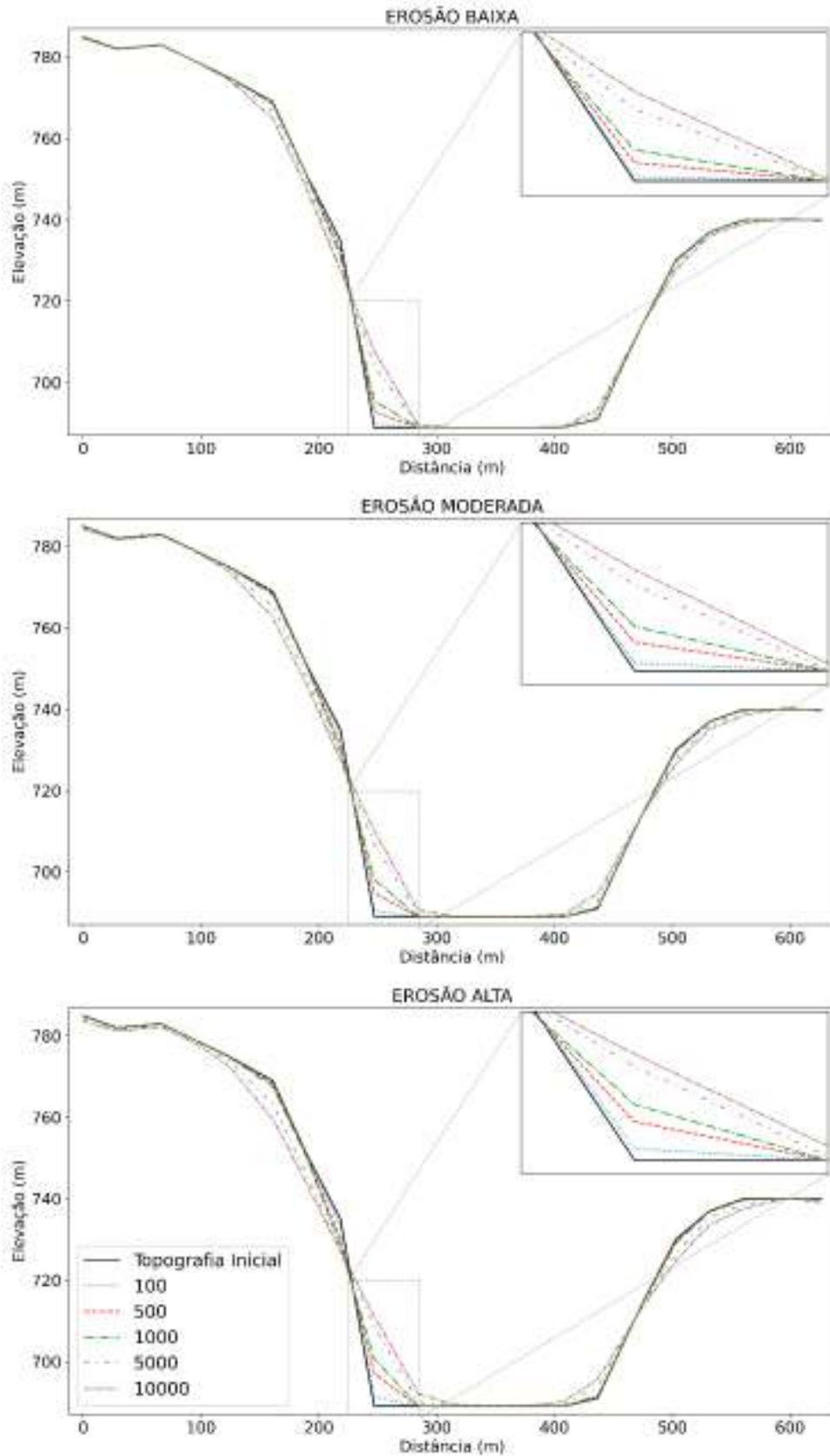


Figura 21 – Perfis altimétricos representando a evolução geomórfica da P1 para os 3 cenários erosivos simulados (baixo, moderado e alto).

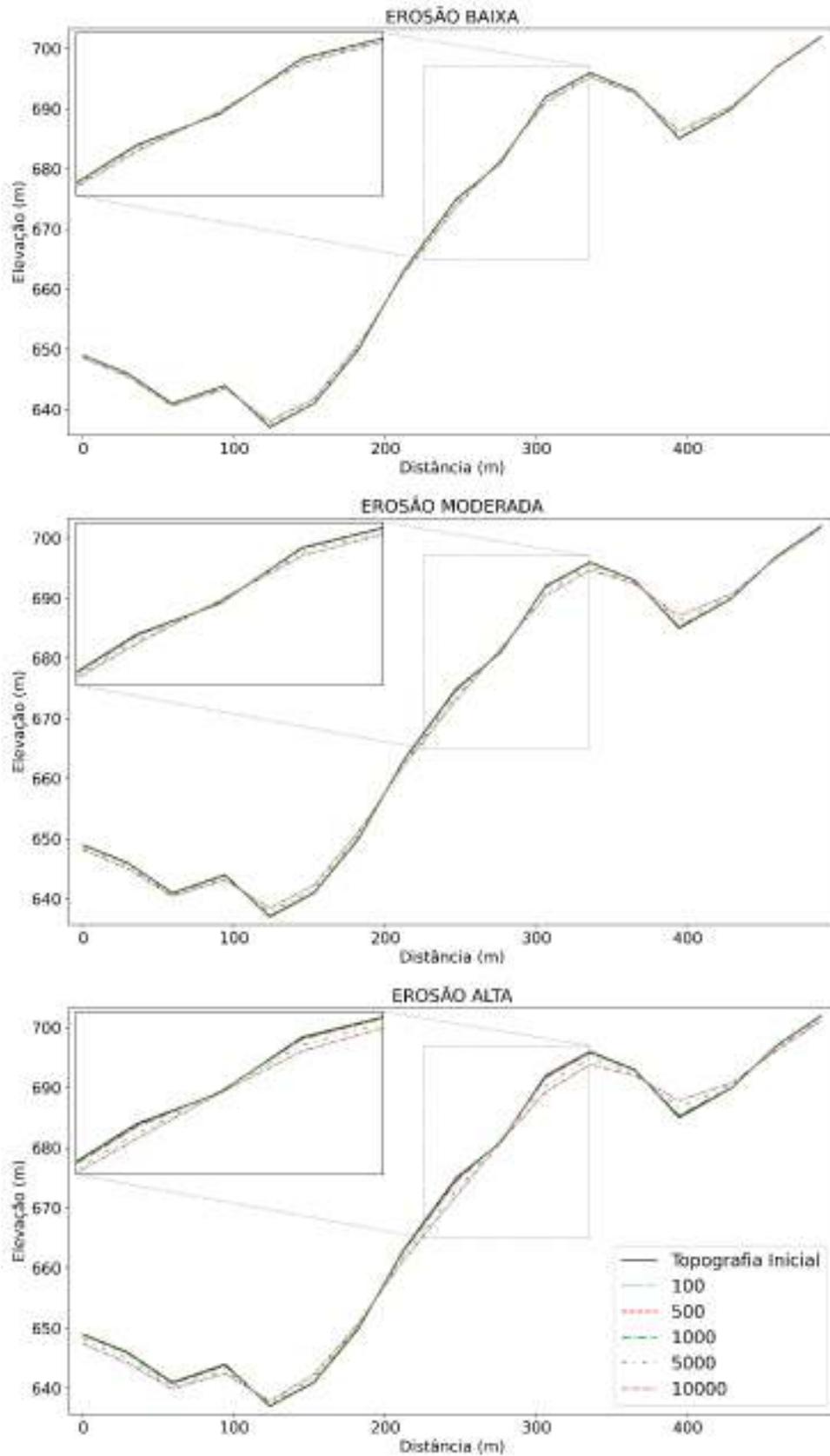
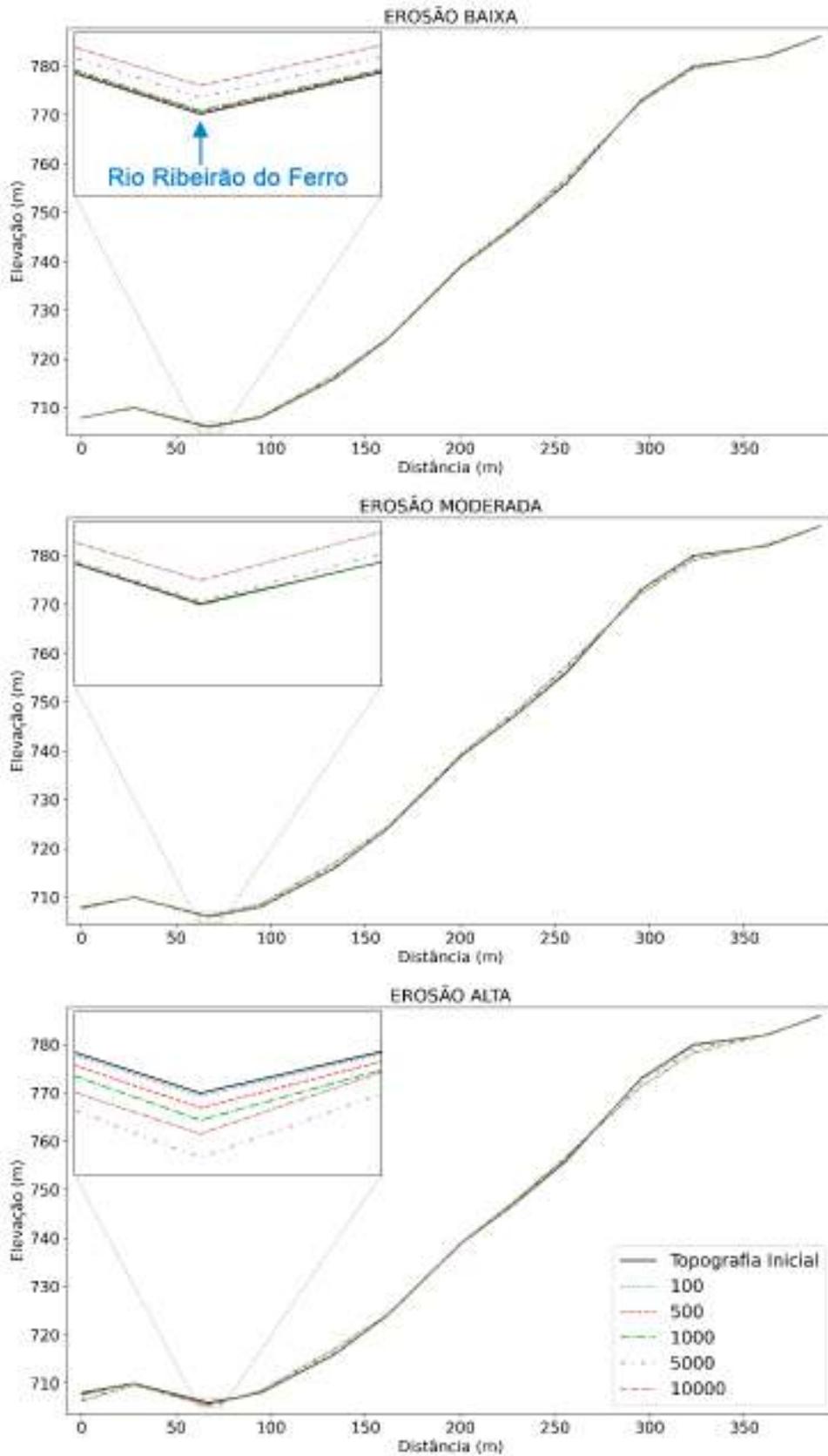


Figura 22 – Perfis altimétricos representando a evolução geomórfica da pilha P2 para os 3 cenários erosivos simulados (baixo, moderado e alto). A porção em destaque mostra com mais detalhes a evolução do leito fluvial do rio Ribeirão do Ferro.



6 DISCUSSÃO

Modelos de evolução do relevo possuem uma grande funcionalidade no apoio de projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração. As simulações deste trabalho permitiram a visualização e espacialização de focos erosivos, a avaliação da evolução geomórfica das encostas modificadas pela mineração, além do cálculo de taxas de erosão para as bacias e estruturas minerárias. Nas seções abaixo, os principais resultados são usados para discutir sobre a evolução geomórfica das áreas mineradas, destacando o controle que a topografia exerce sobre esse processo. Além disso, foi possível salientar o papel da vegetação e do clima no controle da evolução do relevo, e a partir das potencialidades e limitações dos modelos apresentados, apresentar possíveis questões para serem abordadas em trabalhos futuros que se dediquem à entender a evolução de paisagens perturbadas pela mineração, principalmente no contexto brasileiro.

6.1 Evolução Geomórfica das Áreas Mineradas

A partir das simulações realizadas para os cenários de alta, moderada e baixa erosão, os resultados indicam similaridades entre as taxas de erosão média da bacia minerada (B1) quando comparadas com a bacia não minerada (B2) durante todo o período de 10000 anos. Também foram comparados os padrões erosivos no relevo (Figuras 16, 17 e 18) com valores de ângulo de encosta apresentado na bacia B1 (Figura 10) e perfis altimétricos das estruturas minerárias (Figuras 19, 20, 21 e 22). A partir disso, observou-se que as cavas C1 e C2 apresentam os maiores focos erosivos e profundidades de erosão, indicando que os processos de transporte ocorrem com maior intensidade nessas áreas da B1. É importante ressaltar que as estruturas minerárias estão localizadas em áreas onde processos de encosta controlam a evolução do relevo, o que torna a análise dos perfis altimétricos útil para entender a evolução geomórfica dessas encostas. Nesse contexto, as estruturas minerárias nessa simulação evoluem principalmente de acordo com a equação do processo de difusão não-linear (Roering *et al.*, 1999). As partes das encostas de C1 e C2 que mostraram maiores profundidades de erosão, são as que apresentam ângulos acima do que é considerado crítico (S_c), o que de acordo com os pressupostos da Eq. 7, eleva exponencialmente o fluxo de sedimentos nessas áreas (Roering *et al.*, 1999). Enquanto isso, para ângulos menores que S_c , ocorre o processo de difusão linear (Fernandes e Dietrich, 1997), que produz menores fluxos de sedimentos e profundidades de erosão. A assinatura geomórfica dos processos representados dentro da Eq. 7 fica evidente nos perfis altimétricos das encostas, que evoluem para uma morfologia planar em áreas com ângulos

maiores que S_c , enquanto os perfis de encostas em áreas com ângulos menores que S_c mostram a suavização das convexidades, enquanto as concavidades do relevo são preenchidas nas duas situações.

Os resultados deste trabalho corroboram com evidências que as encostas modificadas costumam ser mais íngremes após a mineração e são suavizadas com a ação dos processos erosivos ao longo do tempo (Bower *et al.*, 2024). Isso indica que ocorrência de picos de taxas de erosão logo após a mineração também é impulsionada pela geomorfologia local. Neste trabalho, esse processo se dá principalmente nas cavas C1 e C2 que apresentam os maiores ângulos de encosta e as maiores profundidades de erosão, porém, elas não apresentam taxas de erosão acima da média da bacia. As cavas são consideradas depressões fechadas, morfologia que evita uma maior conectividade dessas estruturas com os canais fluviais e propicia a retenção dos sedimentos (Shobe *et al.*, 2024), evitando assim o aumento do fluxo de sedimentos para fora dessas estruturas. Nesse contexto, Bower *et al.* (2024) também mostram que bacias com maiores alterações nas taxas de erosão são as que possuem maior área de mineração relativa à área total da bacia. Isso pode explicar em parte a semelhança entre as taxas de erosão das bacias minerada (B1) e não minerada (B2), já que as áreas das estruturas mineradas somam aproximadamente 0.4 km², representando aproximadamente 1.35% da área da bacia (29.5 km²).

As pilhas de estéril, por sua vez, se mostram essencialmente importantes pois costumam ser construídas com materiais de maior erodibilidade (areias, cascalhos e blocos de rocha) (Martín-Moreno *et al.*, 2018). Isso torna essencial o trabalho de estimar suas taxas de erosão e evolução geomórfica ao longo do tempo (como também fizeram Hancock e Turley (2005), Martín-Moreno *et al.* (2018), Hancock e Martin Duque (2022)). As pilhas de estéril também são importantes na evolução de um relevo minerado por serem áreas fonte de sedimentos (muitas vezes contaminados com rejeitos químicos ou nucleares) que são entregues aos canais fluviais (Martín Duque *et al.*, 2015). Essa dinâmica pode ser representada pela figura 22, onde sedimentos da P2 são transportados até o leito do rio Ribeirão do Ferro, e são depositados ali ou transportados, a depender de sua potência fluvial. A partir de uma perspectiva geomorfológica, os resultados das simulações para as pilhas de estéril P1 e P2 demonstram que a diminuição dos ângulos de encosta das pilhas, resultado do projeto de conformação topográfica, resulta em taxas de erosão média e profundidades máximas de erosão menores que os valores da bacia minerada (B1). Isso corrobora com o fato de que a conformação topográfica é essencial para que se alcance uma determinada estabilidade física dessas estruturas (Martín-Moreno *et al.*, 2018; Hancock e Martin Duque, 2022). Entretanto, o ângulo de encosta não é o

único parâmetro topográfico que pode influenciar na evolução geomórfica da bacia. A curvatura e o comprimento das encostas também possuem papel importante no controle dos processos erosivos ao longo do tempo (Martín-Moreno *et al.*, 2018). Com isso, para que se alcance uma maior estabilidade física, inclusive diminuindo as profundidades de erosão (que podem chegar até 5.4 e 4.8 metros para P1 e P2, respectivamente), é necessário se atentar a esses outros parâmetros topográficos. Nesse contexto, a conformação topográfica das pilhas de estéril se mostrou eficaz para uma relativa redução nas taxas de erosão e profundidades máximas de erosão das pilhas de estéril analisadas aqui. Entretanto, muitas pilhas de estéril que contém contaminantes precisam ser encapsuladas com uma camada compacta, espessa e rica em argila (Martín Duque *et al.*, 2015). Sendo assim, é importante que haja a avaliação da evolução geomórfica dessas pilhas encapsuladas a partir do uso de modelos de evolução do relevo, pois assim será possível estimar se os processos erosivos podem ou não expor os contaminantes. Dessa forma, é necessário que se conheça a espessura da camada que está encapsulando o material, assim é possível melhorar o planejamento para a estabilização física e química dessas áreas.

Analisando, de forma geral, as diferentes morfologias das estruturas minerárias e sua evolução, se torna possível entender como diferentes projetos de reconstrução topográfica podem definir a atuação dos processos erosivos ao longo do tempo. Nesse contexto, existem diversos trabalhos que avaliam cenários de erosão a partir de topografias iniciais com diferentes morfologias (como em Hancock e Turley (2005), Hancock *et al.* (2016) e Hancock *et al.* (2019)). Os resultados das simulações para as pilhas de estéril P1 e P2, por exemplo, foram obtidos a partir de suas características topográficas, com baixos ângulos de encosta, além de perfil com fundos de vale côncavos, enquanto a porção média e o topo da encosta apresentam morfologia retilínea e convexa, respectivamente. Já foi evidenciado que encostas que apresentem um perfil convexo-côncavo (*S-shape*) podem ser consideradas perfis típicos de um relevo natural estável (Hancock *et al.*, 2019). Esse formato pode ser visualizado nos perfis das pilhas P1 e P2 (Figuras 21 e 22), indicando que as pilhas possuem um perfil que representa uma encosta estável ao longo do tempo. Já para as cavas C1 e C2, os altos ângulos de encosta que elas apresentam na topografia inicial, geram instabilidade, pois aumentam de maneira significativa a produção de sedimentos no local. Isso significa que, segundo os pressupostos do modelo implementado (Roering *et al.*, 1999), para que se alcance baixas profundidades erosivas, é preciso construir encostas que não possuam altos ângulos (geralmente $<25^\circ$). A partir disso, observa-se como os aspectos topográficos podem controlar a ação dos processos erosivos

em uma área pós-mineração, sendo essencial que diferentes cenários geomórficos sejam avaliados através da implementação de um modelo de evolução do relevo (Hancock *et al.*, 2019). Com esse objetivo, alguns trabalhos usam modelos de evolução do relevo para avaliar softwares que são capazes de reproduzir características de paisagens naturais estáveis (como densidade de drenagem, curvatura e ângulo das encostas etc.) (Martín Duque *et al.*, 2015; Hancock *et al.*, 2019). Isso resulta na diminuição dos processos erosivos e se torna uma importante alternativa para que se criem relevos pós mineração fisicamente estáveis.

6.2 Importância da Vegetação e do Clima

É importante compreender que a topografia não é o principal agente no controle da evolução de uma paisagem pós-mineração. Além de intervenções na topografia, a vegetação pode influenciar os padrões espaço-temporais de erosão (Bower *et al.*, 2024). O estágio da vegetação pode controlar o nível de erodibilidade desse tipo de paisagem, determinando assim, um maior ou menor grau de eficiência dos processos erosivos que atuam na superfície desses locais (Hancock *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015; Hancock *et al.*, 2016; Bower *et al.*, 2024). Isso se torna especialmente importante em áreas que passaram pelo processo de revegetação, como a que o presente trabalho investiga. Como já foi visto, analisando somente as mudanças topográficas e levando indiretamente em consideração influência da vegetação sobre o coeficiente de difusividade (D), as estimativas das taxas de erosão média entre as bacias minerada (B1) e não minerada (B2) se mostraram semelhantes em todos os cenários. Nesse contexto, a produção de sedimentos em uma área minerada pode se mostrar até menor comparada com uma área não minerada, porém, esse cenário é revertido quando se leva em consideração a porcentagem de vegetação recuperada na área minerada (Bower *et al.*, 2024). Diferentes estágios de recuperação da vegetação resultam em mudanças espaciais no coeficiente de erodibilidade (K) e mostram que quanto menor for a recuperação da vegetação, maiores serão as taxas de erosão ao longo do tempo (Bower *et al.*, 2024). Outros trabalhos como Hancock *et al.* (2015), Hancock *et al.* (2016) e Hancock e Martin Duque (2022) também mostram como a revegetação pode diminuir as taxas de erosão em paisagens mineradas. O presente trabalho não se propõe a avaliar o papel da vegetação como agente controlador da evolução do relevo, entretanto, próximos trabalhos que simularem a evolução de um relevo minerado devem levar isso como um de seus objetivos.

Além disso, alterações nos padrões de precipitação advindas das mudanças climáticas também podem ter uma influência significativa nas taxas de erosão de uma paisagem perturbada

pela mineração (Hancock *et al.*, 2017). Como visto, este trabalho considera os coeficientes de difusividade (D) e de erodibilidade (K), calibrados para padrões de chuva da atualidade, como constantes ao longo de toda a simulação. Porém já existem estudos projetando, para o ano de 2100, o aumento dos padrões de chuva no sudeste brasileiro (região em que a área de estudo está localizada), além da maior probabilidade de ocorrência eventos extremos, como períodos de chuva excessiva (Veiga *et al.*, 2023). Esse cenário se mostra importante pois o aumento da média anual de chuva pode ser relacionado diretamente com o coeficiente de erodibilidade (K) (Barnhart *et al.*, 2020b). Além disso, áreas que passaram pelo processo de mineração apresentam aumento das respostas hidrológicas a eventos de precipitação extrema, como tempestades (Negley e Eshleman, 2006), o que gera uma grande mobilização de sedimentos. Sendo assim, também se torna imperativo que próximos trabalhos que simulem a evolução do relevo em áreas pós-mineração levem diretamente em consideração o papel das mudanças climáticas na influência da produção de sedimentos ali.

6.3 Limitações do Trabalho

O modelo implementado neste trabalho faz uma série de suposições que podem negligenciar diversos agentes controladores da evolução do relevo, principalmente em uma paisagem pós-mineração. Como discutido anteriormente, a vegetação não é levada diretamente em consideração pelo modelo. Além disso, a precipitação também é assumida como constante ao longo dos 10000 anos simulados, porém, é necessário que próximos trabalhos incorporem os efeitos das mudanças climáticas na modelagem da evolução de relevos pós-mineração, já que as projeções existentes mostram alterações nos padrões de precipitação no sudeste brasileiro pelo menos até 2100. Ainda no contexto de mudanças climáticas, é importante que seja levado em consideração não só as mudanças nas médias anuais de precipitação, mas também o papel que os eventos estocásticos têm no controle da evolução da do relevo, como tempestades e movimentos de massa deflagrados pelo aumento da poro-pressão nos solos. Como a mineração foi implementada na área de estudo somente na década de 40, existem poucas informações e imagens aéreas que possibilitem reconstruir e caracterizar a topografia da área no período pré-mineração, o que não permitiu uma maior análise geomorfológica sobre o controle das mudanças da topografia sobre a evolução do relevo minerado. Por fim, para que se alcance resultados mais precisos, permitindo uma análise mais detalhada sobre a evolução das superfícies mineradas, são precisos dados topográficos com maiores resoluções, sendo o Copernicus 30m o digital de elevação com maior resolução disponível para uso no momento de realização do presente trabalho.

7 CONCLUSÕES

Esse trabalho se propôs a implementar um modelo de evolução do relevo em uma área pós-mineração para analisar, de maneira qualitativa e quantitativa, como se dará a evolução do relevo de uma bacia hidrográfica a qual passou pelo processo de mineração, em comparação com uma bacia análoga sem histórico minerário. Inicialmente foram feitos mapas representando as mudanças de elevação entre as topografias em cada cenário de tempo com a topografia inicial, para assim analisar a localização dos focos erosivos dentro da bacia minerada. Além disso, perfis altimétricos permitiram visualizar a evolução geomórfica das estruturas minerárias. Por fim, foram calculados valores de taxa de erosão média, ângulo de encosta máximo, amplitude de elevação e profundidade máxima de erosão para quantificar os padrões erosivos e suas relações com a topografia ao longo do tempo. Os principais resultados mostram que:

1. As taxas de erosão da bacia minerada se mostram similares as da bacia não minerada em todos os cenários simulados. Porém, a bacia minerada apresentou profundidades máximas de erosão maiores que a bacia não minerada, localizadas justamente nas cavas das minas.
2. Considerando somente as mudanças na topografia, o ângulo de encosta se mostra como um importante agente no controle dos processos erosivos, onde encostas com maiores ângulos apresentam as maiores profundidades de erosão.
3. As taxas de erosão das estruturas minerárias não determinaram um aumento nas taxas médias da bacia minerada. Elas se mantem menores que a média da bacia ao longo do tempo.
4. Na bacia minerada, os focos erosivos se concentram nas porções superiores das cavas, justamente por serem as encostas com maiores ângulos na bacia.
5. As pilhas de estéril, por terem passado pelos processos de conformação topográfica, apresentam taxas de erosão média e profundidades máximas de erosão menores que as apresentadas pelas cavas e bacia minerada.

A partir de tudo o que foi visto, foi possível entender que apesar da morfologia das encostas das estruturas minerárias apresentar um potencial maior de produção de sedimentos, a reconstrução topográfica dessas áreas pode ser uma grande aliada para a diminuição dos processos erosivos ali. A partir disso, é possível afirmar que são necessários mais estudos, principalmente no contexto brasileiro, que investiguem a evolução do relevo em paisagens pós-mineração, analisando como a reconstrução topográfica e diferentes projetos geomórficos

podem controlar os níveis de produção de sedimentos em escala de bacia, mas que também levem em consideração o papel da vegetação e das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ABNT. Elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 5.

ALBUQUERQUE, G. B.; RODRIGUES, R. R. A vegetação do Morro de Araçoiaba, Floresta Nacional de Ipanema, Iperó (SP). **Scientia Forestalis**, 58, p. 145-159, 2000.

ANM. Resolução ANM nº 68. **Ministério de Minas e Energia**, Agência Nacional de Mineração, pp. 1-5.

ATCHLEY, A. L.; BIRDSELL, K. H.; CROWELL, K.; MIDDLETON, R. S. *et al.* Simulating 10,000 years of erosion to assess nuclear waste repository performance. **Geosciences**, 9, n. 120, 3 2019.10.3390/geosciences9030120

AUSTRALIA. Environmental Requirements of the Commonwealth of Australia for the Operation of Ranger Uranium Mine. **Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water**, pp. 11.

AUSTRALIA. **Mining Rehabilitation: Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry**. Canberra: Department of Industry, Science and Resources, 2016. 76 p.

BAI, Z. G.; DENT, D. L.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. Proxy global assessment of land degradation. **Soil Use and Management**, 24, p. 223-234, 2008.

BARNHART, K. R.; HUTTON, E. W. H.; TUCKER, G. E.; GASPARINI, N. M. *et al.* Short communication: Landlab v2.0: a software package for Earth surface dynamics. **Earth Surface Dynamics**, 8, n. 2, p. 379-397, 2020a.10.5194/esurf-8-379-2020

BARNHART, K. R.; TUCKER, G. E.; DOTY, S. G.; SHOBE, C. M. *et al.* Inverting Topography for Landscape Evolution Model Process Representation: 3. Determining Parameter Ranges for Select Mature Geomorphic Transport Laws and Connecting Changes in Fluvial Erodibility to Changes in Climate. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 125, n. 7, p. 1-34, 2020b.10.1029/2018jf004961

BIERMAN, P. R.; MONTGOMERY, D. R. **Key Concepts in Geomorphology**. 2 ed. New York, NY: W. H. Freeman and Company, 2019. 586 p.

BLAIKIE, P.; BROOKFIELD, H. **Land degradation and society**. United Kingdom: Methuen, 1986. 323 p.

BOWER, S. J.; SHOBE, C. M.; MAXWELL, A. E.; CAMPFORTS, B. The uncertain future of mountaintop-top-removal-mined landscapes 2: Modeling the influence of topography and vegetation. **Geomorphology**, 2024.10.1016/j.geomorph.2023.108985

BRASIL. Decreto nº 24.642, de 10 de julho de 1934. Rio de Janeiro, Brasil, pp. 15.

BRASIL. Decreto-Lei nº 1985, de 29 de Março de 1940. Rio de Janeiro, Brasil, pp. 16.

BRASIL. Decreto-Lei nº 227, de 28 de Fevereiro de 1967. Brasília (DF), Brasil, pp. 27.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. Brasília (DF), Brasil, pp. 32.

BRASIL. Decreto Nº 97.632, de 10 de Abril de 1989. Brasília (DF), Brasil, pp. 1.

CARVALHO, A.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B.; VALADARES, J. *et al.* Levantamento Pedológico Semidetalhado do Município de Atibaia. **Bragantia**, 34, n. 1, p. 58, 1975.

CHEN, A.; DARBON, J.; MOREL, J.-M. Landscape evolution models: A review of their fundamental equations. **Geomorphology**, 219, p. 68-86, 2014.10.1016/j.geomorph.2014.04.037

COULTHARD, T. J.; MACKLIN, M. G. Modeling long-term contamination in river systems from historical metal mining. **Geology**, 31, n. 5, 2003.10.1130/0091-7613(2003)031<0451:Mcirs>2.0.Co;2

COULTHARD, T. J.; MACKLIN, M. G.; KIRKBY, M. J. A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, 27, n. 3, p. 269-288, 2002.10.1002/esp.318

COULTHARD, T. J.; NEAL, J. C.; BATES, P. D.; RAMIREZ, J. *et al.* Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, 38, n. 15, p. 1897-1906, 2013.10.1002/esp.3478

CPRM, 2006, **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/2966>.

CULLING, W. E. H. Analytical Theory of Erosion. **The Journal of Geology**, 68, n. 3, p. 336-344, 1960.

DAVINO, A. Geologia da Serra de Araçoiaba, Estado de São Paulo. **Boletim IG.** , 6, p. 129-144, 1975.

DIETRICH, W. E.; BELLUGI, D. G.; SKLAR, L. S.; STOCK, J. D. *et al.* Geomorphic Transport Laws for Predicting Landscape Form and Dynamics. **Geophysical Monograph Series**, 135, p. 103-132, 2003. Geophysical Monograph Series

DNPM. Portaria nº 237. **Ministério de Minas e Energia**, Departamento Nacional de Produção Mineral, pp. 2.

EUA. Surface Mining Control and Reclamation Act. Washington (DC), EUA, pp. 124.

EVANS, K. G.; SAYNOR, M. J.; WILLGOOSE, G. R.; RILEY, S. J. Post-Mining Landform Evolution Modelling: 1. Derivation of Sediment Transport Model and Rainfall-Runoff Model Parameters. **Earth Surface Processes and Landforms**, 25, p. 743-763, 2000.

FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. **Espaço Aberto**, 6, n. 1, p. 209-247, 2016.

FERNANDES, N. F.; DIETRICH, W. E. Hillslope evolution by diffusive processes: The timescale for equilibrium adjustments. **Water Resources Research**, 33, n. 6, p. 1307-1318, 1997.10.1029/97wr00534

FERNANDES, N. F.; PEIFER, D.; VAL, P. Modelos Numéricos de Evolução do Relevo e Sua Importância Para os Estudos de Evolução da Paisagem. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, p. 1-43, 2021.

FUNDAÇÃO FLORESTAL. **Plano de Manejo do Parque Estadual de Itapetinga**. : Junho, 2018, p. 181. 2018.

GOUDIE, A. **The Human Impact on the Natural Environment _ Past, Present, and Future**. 7th ed. John Wiley & Sons, 2013. 978-1-118-57658-8.

HANCOCK, G.; MARTIN DUQUE, J. Assessing the stability of a geomorphically reconstructed post-mining landscape: a case study of the Santa Engracia mine, Spain. *In: Mine Closure 2022: 15th Conference on Mine Closure, 2022*, p. 127-142. DOI: 10.36487/ACG_repo/2215_06.

HANCOCK, G. R. The use of landscape evolution models in mining rehabilitation design. **Environmental Geology**, 46, p. 561-573, 2004.10.1007/s00254-004-1030-3

HANCOCK, G. R.; DUQUE, J. F. M.; WILLGOOSE, G. R. Mining rehabilitation – Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands. **Ecological Engineering**, 155, 2020.10.1016/j.ecoleng.2020.105836

- HANCOCK, G. R.; DUQUE, J. M.; WILLGOOSE, G. R. Geomorphic design and modelling at catchment scale for best mine rehabilitation – The Drayton mine example (New South Wales, Australia). **Environmental Modelling & Software**, 114, p. 140-151, 2019.10.1016/j.envsoft.2018.12.003
- HANCOCK, G. R.; LOCH, R. J.; WILLGOOSE, G. R. The design of post-mining landscapes using geomorphic principles. 28, p. 1097-1110, 2003.10.1002/esp.518
- HANCOCK, G. R.; LOWRY, J. B. C.; COULTHARD, T. J. Catchment reconstruction - erosional stability at millennial time scales using landscape evolution models. **Geomorphology**, 231, p. 15-27, 2015.10.1016/j.geomorph.2014.10.034
- HANCOCK, G. R.; LOWRY, J. B. C.; COULTHARD, T. J. Long-term landscape trajectory — Can we make predictions about landscape form and function for post-mining landforms? **Geomorphology**, 266, p. 121-132, 2016.10.1016/j.geomorph.2016.05.014
- HANCOCK, G. R.; LOWRY, J. B. C.; COULTHARD, T. J.; EVANS, K. G. *et al.* A catchment scale evaluation of the SIBERIA and CAESAR landscape evolution models. **Earth Surface Processes and Landforms**, 35, n. 8, p. 863-875, 2010.10.1002/esp.1863
- HANCOCK, G. R.; TURLEY, E. Evaluation of proposed waste rock dump designs using the SIBERIA erosion model. **Environmental Geology**, 49, n. 5, p. 765-779, 2005.10.1007/s00254-005-0127-7
- HANCOCK, G. R.; VERDON-KIDD, D.; LOWRY, J. B. C. Soil erosion predictions from a landscape evolution model - An assessment of a post-mining landform using spatial climate change analogues. **Sci Total Environ**, 601-602, p. 109-121, Dec 1 2017.10.1016/j.scitotenv.2017.04.038
- HANCOCK, G. R.; WILLGOOSE, G. R. Predicting gully erosion using landform evolution models: Insights from mining landforms. **Earth Surface Processes and Landforms**, 46, n. 15, p. 3271-3290, 2021.10.1002/esp.5234
- HANCOCK, G. R.; WILLGOOSE, G. R.; EVANS, K. G. Testing of the SIBERIA landscape evolution model using the tin camp creek, Northern Territory, Australia, field catchment. 27, p. 125-143, 2002.10.1002/esp.304
- HENSELOWSKY, F.; RÖLKENS, J.; KELTERBAUM, D.; BUBENZER, O. Anthropogenic relief changes in a long-lasting lignite mining area ('Ville', Germany) derived from historic maps and digital elevation models. **Earth Surface Processes and Landforms**, 46, n. 9, p. 1725-1738, 2021.10.1002/esp.5103
- HOBLEY, D. E. J.; ADAMS, J. M.; NUDURUPATI, S. S.; HUTTON, E. W. H. *et al.* Creative computing with Landlab: an open-source toolkit for building, coupling, and

exploring two-dimensional numerical models of Earth-surface dynamics. **Earth Surface Dynamics**, 5, n. 1, p. 21-46, 2017.10.5194/esurf-5-21-2017

HOWARD, A. D. A detachment-limited model of drainage basin evolution. **Water Resources Research**, 30, n. 7, p. 2261-2285, 1994.10.1029/94wr00757

IBAMA. Instrução Normativa n° 4, DE 13 DE ABRIL DE 2011. Diário Oficial da União, Brasília (DF), pp. 4.

ICMBIO. **Revisão do Plano de Manejo da FLONA de Ipanema: Volume I - Diagnóstico**. Instituto Chico Mendes. Iperó/SP, p. 306. 2017.

ICMM. **Planning for Integrated Mine Closure: Toolkit**. London, UK: International Council on Mining and Metals 2008. 86 p. 978-0-9553591-8-7.

ICMM. **Tailings Management: Good Practice Guide**. London, UK: International Council of Mining Metals, 2021. 142 p.

KIRKBY, M. J. Hillslope process-response models based on the continuity equation. **Inst. Br. Geogr. Spec. Publ.**, 3, p. 15-30, 1971.

LOWRY, J.; COULTHARD, T.; SAYNOR, M.; HANCOCK, G. **A comparison of landform evolution model predictions with multi-year observations from a rehabilitated landform**. Supervising Scientist, Darwin. Internal Report 663, p. 27. 2020.

LOWRY, J.; MOLIÈRE, D. R.; BOGGS, G. S.; EVANS, K. G. **Application of landform evolution modelling to the Nabarlek minesite**. Supervising Scientist, Darwin. Internal Report 480, p. 49. 2004.

LOWRY, J. B. C.; NARAYAN, M.; HANCOCK, G. R.; EVANS, K. G. Understanding post-mining landforms: Utilising pre-mine geomorphology to improve rehabilitation outcomes. **Geomorphology**, 328, p. 93-107, 2019.10.1016/j.geomorph.2018.11.027

MACHADO, H. A.; HENRIQUES, R. J.; DE SOUZA, R. F. Mineração E Relevô Antropogênico, O Exemplo Da Extração De Esteatito Em Santa Rita, Ouro Preto, Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, 22, n. 81, p. 166-175, 2021.10.14393/rcg228155361

MARTÍN-MORENO, C.; MARTÍN DUQUE, J. F.; NICOLAU IBARRA, J. M.; MUÑOZ-MARTÍN, A. *et al.* Waste dump erosional landform stability – a critical issue for mountain mining. **Earth Surface Processes and Landforms**, 43, n. 7, p. 1431-1450, 2018.10.1002/esp.4327

MARTÍN DUQUE, J. F.; ZAPICO, I.; OYARZUN, R.; LÓPEZ GARCÍA, J. A. *et al.* A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain. **Geomorphology**, 239, p. 1-16, 2015.10.1016/j.geomorph.2015.02.035

MCA. **Mine Rehabilitation Handbook** 2ed. Dickson Act 2602: Minerals Council of Australia, 1998. 112 p. 909276 81 1.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3 ed. Blackwell, 2005. 316 p.

MOSSA, J.; JAMES, L. A. 13.6 Impacts of Mining on Geomorphic Systems. *In: Treatise on Geomorphology*, 2013. p. 74-95.

NEGLEY, T. L.; ESHLEMAN, K. N. Comparison of stormflow responses of surface-mined and forested watersheds in the Appalachian Mountains, USA. **Hydrological Processes**, 20, p. 3467-3483, 2006.10.1002/hyp.6148

NEPOMUCENO, L. C. B., 2015, LafargeHolcim. **Recuperação das Minas Ipanema e Felicíssimo (Apresentação)**. Disponível em:
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7486905/mod_resource/content/2/Recupera%C3%A7%C3%A3o%20Ambiental%20das%20minas%20Ipanema%20e%20Felic%C3%ADssimo%20%202017%20_2018%20LH%20ATUALIZADO.pdf.

NEPOMUCENO, L. C. B. Programas de Recuperação de Áreas Degradadas (Prads) em Licenciamentos Ambientais de Mineração. *In: IBAMA (Ed.). Programas de Recuperação de Áreas Degradadas (Prads) em Licenciamentos Ambientais de Mineração*. Brasília, DF, 2019. p. 41.

NMMMD. A Method for the Evaluation of Compliance With the Approximate Original Contour Requirements of CSMC **New Mexico Mining and Minerals Division**, pp. 11.

PEIFER, D.; CREMON, É. H.; VAL, P.; FERNANDES, N. F. Bases teóricas do modelo stream-power de incisão fluvial. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 23, n. 2, p. 1512-1523, 2022.10.20502/rbg.v23i2.2143

PELLETIER, J. D. Fundamental Principles and Techniques of Landscape Evolution Modeling. *In: Treatise on Geomorphology*, 2013. p. 29-43.

REED, M.; KITE, S. Peripheral gully and landslide erosion on an extreme anthropogenic landscape produced by mountaintop removal coal mining. **Earth Surface Processes and Landforms**, 45, n. 9, p. 2078-2090, 2020.10.1002/esp.4867

RICHARDSON, P. W.; PERRON, J. T.; SCHURR, N. D. Influences of climate and life on hillslope sediment transport. **Geology**, 47, n. 5, p. 423-426, 2019.10.1130/g45305.1

ROERING, J. J.; KIRCHNER, J. W.; DIETRICH, W. E. Evidence for nonlinear, diffusive sediment transport on hillslopes and implications for landscape morphology. **Water Resources Research**, 35, n. 3, p. 853-870, 1999.10.1029/1998wr900090

RUIZ, F.; SAFANELLI, J. L.; PERLATTI, F.; CHERUBIN, M. R. *et al.* Constructing soils for climate-smart mining. **Communications Earth & Environment**, 4, n. 1, 2023.10.1038/s43247-023-00862-x

SAINI, V.; GUPTA, R. P.; ARORA, M. K. Environmental impact studies in coalfields in India: A case study from Jharia coal-field. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 53, p. 1222-1239, 2016.10.1016/j.rser.2015.09.072

SÁNCHEZ, L. E.; NERI, A. C. **Guia para o Planejamento do Fechamento de Mina**. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2013. 978-85-61993-03-0.

SHOBE, C. M.; BOWER, S. J.; MAXWELL, A. E.; GLADE, R. C. *et al.* The uncertain future of mountaintop-removal-mined landscapes 1: How mining changes erosion processes and variables. **Geomorphology**, 445, 2024.10.1016/j.geomorph.2023.108984

STOCK, J. D.; MONTGOMERY, D. R. Geologic constraints on bedrock river incision using the stream power law. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 104, n. B3, p. 4983-4993, 1999.10.1029/98jb02139

TUCKER, G. E.; BRAS, R. L. A stochastic approach to modeling the role of rainfall variability in drainage basin evolution. **Water Resources Research**, 36, n. 7, p. 1953-1964, 2000.10.1029/2000wr900065

TUCKER, G. E.; HANCOCK, G. R. Modelling landscape evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, 35, n. 1, p. 28-50, 2010.10.1002/esp.1952

VAN DE WIEL, M. J.; COULTHARD, T. J.; MACKLIN, M. G.; LEWIN, J. Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. **Geomorphology**, 90, n. 3-4, p. 283-301, 2007.10.1016/j.geomorph.2006.10.024

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V. B. *et al.* Climate change over South America simulated by the Brazilian Earth system model under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. **Journal of South American Earth Sciences**, 131, 2023.10.1016/j.jsames.2023.104598

WELIVITIYA, W. D. D. P.; HANCOCK, G. R. Calibration and validation of the SSSPAM coupled soilscape-landform evolution model for simulating short-term gully development on a post-mining landform. **Earth Surface Processes and Landforms**, 47, n. 11, p. 2779-2795, 2022.10.1002/esp.5423

WELIVITIYA, W. D. D. P.; WILLGOOSE, G. R.; HANCOCK, G. R. Evaluating a new landform evolution model: A case study using a proposed mine rehabilitation landform. **Earth Surface Processes and Landforms**, 46, n. 11, p. 2298-2314, 2021.10.1002/esp.5175

WHIPPLE, K. X. Implications of sediment-flux-dependent river incision models for landscape evolution. **Journal of Geophysical Research**, 107, n. B2, 2002.10.1029/2000jb000044

WHIPPLE, K. X.; TUCKER, G. E. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 104, n. B8, p. 17661-17674, 1999.10.1029/1999jb900120

WILLGOOSE, G. **Principles of Soilscape and Landscape Evolution**. Cambridge University Press, 2018. 337 p.

WILLGOOSE, G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. A Coupled Channel Network Growth and Hillslope Evolution Model 2. Nondimensionalization and Applications. **Water Resources Research**, 27, p. 1685-1696, 1991a.

WILLGOOSE, G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 1. Theory. **Water Resources Research**, 27, n. 7, p. 1671-1684, 1991b.10.1029/91wr00935

WILLGOOSE, G.; RILEY, S. R. **Application of a catchment evolution model to the prediction of long-term erosion on the spoil heap at Ranger uranium mine: Initial analysis**. Supervising Scientist Report 132. 1998.

ZHANG, L.; WANG, J.; BAI, Z.; LV, C. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. **Catena**, 128, p. 44-53, 2015.10.1016/j.catena.2015.01.016

ŽIBRET, G.; GOSAR, M.; MILER, M.; ALIJAGIĆ, J. Impacts of mining and smelting activities on environment and landscape degradation—Slovenian case studies. **Land Degradation & Development**, 29, n. 12, p. 4457-4470, 2018.10.1002/ldr.3198