



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Análise espacial integrada de deslocamentos superficiais por InSAR: estudo de caso da Mina de Gongo Soco

Gabriel Galdino de Magalhães

Monografia da disciplina de Introdução
ao Geoprocessamento do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, ministrada pela Dr. Silvana
Amaral e Dr. Marcos Adami.

INPE
São José dos Campos
2023

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2-1 – Localização da cidade de Barão de Cocais e apresentação da cava da mina de Gongo Soco.....	2
Figura 6-1 – A) Resultado da análise de validade topológica de unidades. B) Localização do Quadrilátero Ferrífero em relação ao estado de Minas Gerais..	5
Figura 6-2 – Sequência de tratamentos feitos nos dados InSAR.....	5
Figura 6-3 – A) Nuvem de pontos LiDAR. B) Interpolação por krigagem para visualização 3D.	6
Figura 6-4 – Mapa de declividade da mina.	7
Figura 6-5 – Mapa geofísico (magnetometria) interpolado.....	7
Figura 6-6 – Fluxo de processamento para associação espacial de atributos. A) Dados de velocidade média InSAR. B) Litologias da área de estudo. C) Sobreposição de camadas. D) Produto da associação espacial, cada ponto recuperado pelo monitoramento InSAR é associado a um litotipo.	8
Figura 6-7 – A) Delimitação da grade para a mina. B) Grade sobreposta a aerogeofísica. C) Grade sobreposta a dados de declividade. D) Grade sobreposta a dados InSAR.....	9
Figura 7-1 – Histogramas de velocidade por litologias principais.....	10
Figura 7-2 – Velocidade média por ponto em relação à distribuição da unidade metassedimentar (metamarga).	11
Figura 7-3 – A) Grade com declividade. B) Grade com velocidade média.	12
Figura 7-4 – Análise bivariada da declividade e velocidade média por unidade estratigráfica.....	12
Figura 7-5 – Análise bivariada da declividade e velocidade média por unidade estratigráfica.....	13
Figura 7-6 – Análise bivariada da suscetibilidade magnética e velocidade média.	14
Figura 8-1 – Velocidade média de deslocamentos InSAR por litologia, diagrama de caixa.....	15
Figura 8-2 – Gráfico de calor dos resultados do teste de Wilcoxon.	16

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 7-1– Correlação de Pearson entre declividade e velocidade média por litologia.	13
Tabela 8-1– Resultados da análise de variância.	16

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ÁREA DE ESTUDO	2
3 OBJETIVOS.....	3
4 METODOLOGIA	3
5 BASES DE DADOS	4
6 PREPARAÇÃO DE DADOS	5
6.1 Pós-processamentos e integração	6
6.1.1 Declividade.....	6
6.1.2 Aeromagnetometria.....	7
6.1.3 Associação de litologias e velocidade média de PS	8
6.1.4 Associação de atributos por grades regulares	8
7 Análise exploratória de velocidades	9
8 Comparação Estatística de velocidades	14
9 CONCLUSÕES.....	17
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento e vigilância geotécnica de taludes de cavas de mineração são indispensáveis para garantia da continuidade operacional segura, ambientalmente correta e com respeito às comunidades adjacentes às áreas de mineração.

Planos de monitoramento robustos contam com uma diversidade de recursos tecnológicos, conhecimentos de contexto e ações de resposta (EBERHARDT *et al.*, 2020). Esse conjunto tem por finalidade última dirimir impactos ambientais e danos à vida humana em casos de eventos materiais indesejados (ICMM, 2015).

Dentre todo o espectro de recursos tecnológicos aplicáveis a esse contexto, a interferometria de imagens de RADAR orbital (A-DInSAR) destaca-se por permitir uma visão sinóptica dos deslocamentos superficiais, com capacidade de atingir precisão milimétrica (HARTWIG, 2014). Esse conjunto de características implica em grande aplicabilidade da técnica ao contexto de gestão de riscos geotécnicos em cavas de mineração.

No entanto, a compreensão do comportamento geomecânico de taludes deve levar em consideração uma abordagem holística de condições físicas que podem ser gatilho ou mesmo suporte na ocorrência de eventos de falha – e.g. episódios de chuva intensa (CARLÀ *et al.*, 2018) e as condições litoestruturais da área de estudo (FARINA *et al.*, 2020).

Além disso, conhecidas as eventuais limitações da técnica A-DInSAR na identificação preventiva de movimentos de massa (MORETTO, 2021) se faz necessário a integração com outros sistemas de monitoramento (OSASAN & AFENI, 2010; CARLÀ *et al.*, 2018). Nesse caso, a aplicação de recursos de geoestatística e análise espacial de dados são ferramentas capazes de orientar uma tomada de decisão mais assertiva acerca da caracterização do perigo geotécnico em cavas de mineração.

Diante disso, a presente monografia tem por finalidade a construção de análise exploratória para avaliação de relações entre variáveis geológico-geotécnicas e velocidades mensuradas via técnica A-DInSAR. Em especial, tem-se a

expectativa de que as velocidades se distribuam de forma heterogênea em diferentes litotipos.

Para viabilização das análises serão aplicadas técnicas de geoprocessamento e testes estatísticos. Espera-se que os resultados alcançados auxiliem na construção de percepções preliminares e orientadas a dados de como as variáveis analisadas se distribuem espacialmente e como se associam.

2 ÁREA DE ESTUDO

A mina de Gongo Soco, localizada na cidade de Barão de Cocais (Minas Gerais), à leste de Caeté e a aproximadamente 70km de Belo Horizonte (Figura 1), remonta seu histórico de exploração mineral aurífera ao século XIX (ALVES, 2014). Em 2019 a mina teve grande atenção da mídia, decorrente da expectativa de ruptura do talude norte da cava e seu potencial de gatilho à falha da barragem Sul Superior (OLIVEIRA, 2019).

Figura 2-1 – Localização da cidade de Barão de Cocais e apresentação da cava da mina de Gongo Soco.



Geologicamente, a área de estudo situa-se no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Entre as unidades litoestratigráficas descritas destacam-se rochas do grupo Nova Lima (metavulcanossedimentares); rochas metamáficas da suíte

Catas Altas da Noruega justapostas a litologias das Formações Batatal e Moeda (Grupo Caraça). Ainda são descritas rochas pertencentes ao Grupo Itabira, Formações Cauê (principal litologia do minério de ferro explorado) e Gandarela (ENDO *et al.*, 2020).

3 OBJETIVOS

O estudo se orienta pela avaliação de indicadores sobre a relação entre os deslocamentos superficiais medidos via interferometria de radar na cava de Gongo Soco e as variáveis geológico-geotécnicas distribuídas espacialmente. Nesse conjunto será investigado, principalmente, a distribuição orientada pelos litotipos.

Os objetivos específicos compreendem o desenvolvimento de fluxo de processamento padrão para os diferentes tipos de dados escolhidos. Além disso, busca-se definir estratégias para análise de qualidade das bases e métodos de processamento escolhidos.

4 METODOLOGIA

A metodologia será pautada por quatro fases essenciais: escolha da série temporal InSAR e base geológica; preparação e estruturação geoespacial das bases de dados; análise geoestatística para comparação de produtos; análise integrada e conclusões.

a. Seleção das bases de dados

A etapa será conduzida pela escolha da base de mapeamento geológico e da série temporal de referência InSAR;

b. Preparação das bases de dados

Etapa caracterizada pela sistematização de todas as bases de referência em um mesmo sistema de referência espacial e pela inserção de rótulos das unidades litoestratigráficas em cada *Persistent Scatter* referente ao monitoramento InSAR.

c. Análise geoespacial de velocidades

As distribuições de velocidade média de deslocamento serão avaliadas de forma agrupada por litotipo da mina. Além disso, os dados serão interpolados e clusterizados. Espera-se que os produtos gerem percepções acerca do comportamento geomecânico dos taludes da mina, sua relação com diferentes litotipos e a extensão espacial das diferentes direções de movimentação experimentadas na cava. A abordagem proposta é baseada nos testes estatísticos e associações espaciais conduzidas por Hartwig (2014) e Temporim *et al.* (2017).

d. Análise integrada e conclusões

Integração dos produtos e resultados e construção das conclusões do estudo.

5 BASES DE DADOS

Para o estudo serão contempladas as seguintes bases de dados:

- Pontos de velocidade média InSAR, produto da interferometria de imagens complexas de RADAR. Dados da constelação COSMO Sky-Med, resolução espacial de 3m adequada à precisão esperada para a escala do objeto de estudo (bermas e taludes de ordem métrica); período de dados considerados da série temporal de janeiro de 2018 a janeiro de 2019;
- Dados topográficos (modelo digital de superfície) coletados via sensor LiDAR acoplado a VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), com resolução espacial de 0,5m;
- Levantamento geofísico por magnetometria (campo anômalo corrigido do *International Geomagnetic Reference Field* – IGRF), espaçamento de ~40m entre linhas de produção e ~4m ao longo da linha de produção. As linhas de controle encontram-se espaçadas em aproximadamente 200 metros;

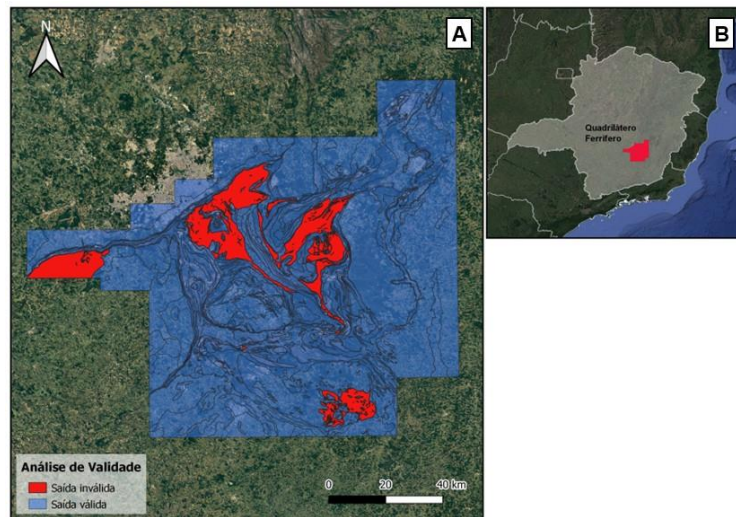
- Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil em escala 1:150.000 (Endo *et al.*, 2020).

Todo o estudo foi conduzido adotando-se por referência o Datum SIRGAS 2000 (UTM – Zona 23S).

6 PREPARAÇÃO DE DADOS

Cada conjunto de dados foi preparado conforme condições próprias de coleta e armazenamento. Primeiramente para os dados do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero foram realizadas análises topológicas. A Figura 6-1 indica o resultado de saídas válidas e inválidas.

Figura 6-1 – A) Resultado da análise de validade topológica de unidades. B) Localização do Quadrilátero Ferrífero em relação ao estado de Minas Gerais.



As geometrias inválidas foram processadas corrigidas com a finalidade de viabilizar a associação espacial das informações de litologia com os dados de deslocamentos.

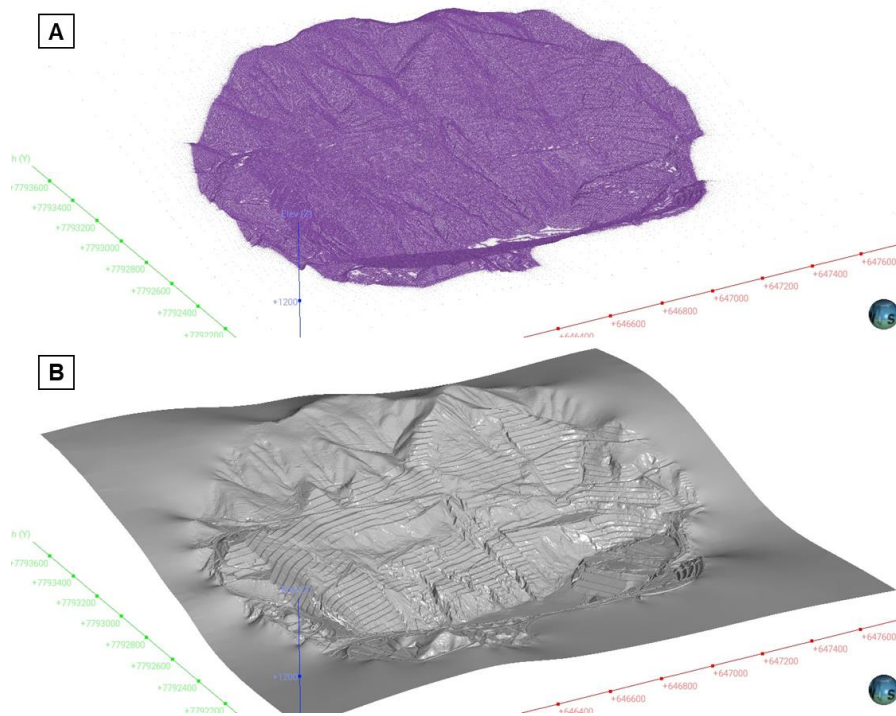
Os dados InSAR foram processados seguindo o pipeline da Figura 6-2:

Figura 6-2 – Sequência de tratamentos feitos nos dados InSAR.



Os dados topográficos LiDAR foram coletados em nuvem de pontos. Os dados foram rasterizados no software Cloud Compare para fins de análise espacial e interpolados também no software Leapfrog Geo para visualização 3D (Figura 6-3).

Figura 6-3 – A) Nuvem de pontos LiDAR. B) Interpolação por krigagem para visualização 3D.



6.1 Pós-processamentos e integração

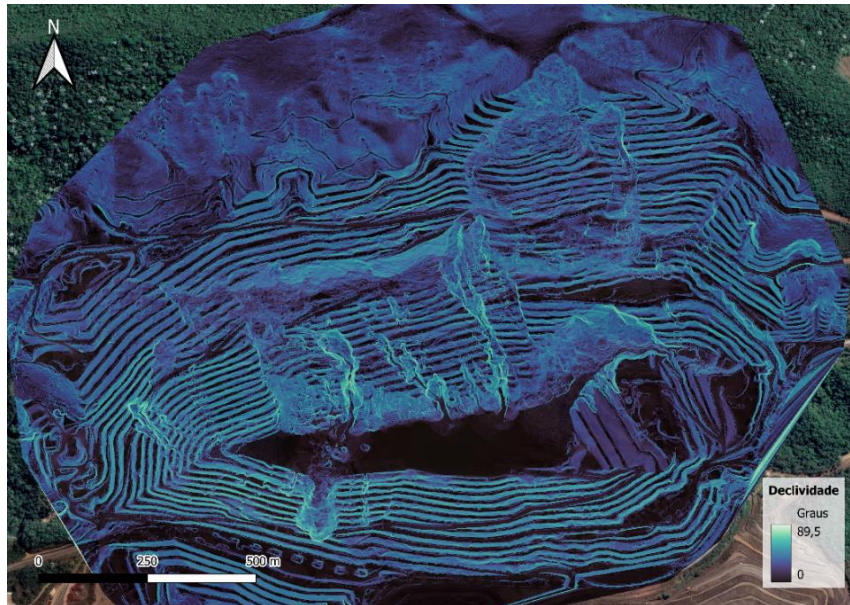
Os dados disponíveis, indicados na metodologia, foram pós-processados com finalidade de geração de produtos complementares dando robustez às análises conduzidas.

6.1.1 Declividade

O raster topográfico (levantamento LiDAR) foi utilizado para cálculo da declividade ao longo da mina. Entende-se que o parâmetro reflete tanto o ângulo interrampa quanto o ângulo geral da mina. Esses elementos são diretamente associados à estabilidade dos taludes, sendo inclusive parte do critério de aceitação do design de uma mina ao longo de toda sua vida (Read & Stacey, 2009). A Figura 6-4 apresenta o resultado, eventuais distorções são observadas

nas bordas, decorrentes do ajuste matemático do modelo – serão evitadas nas etapas seguintes.

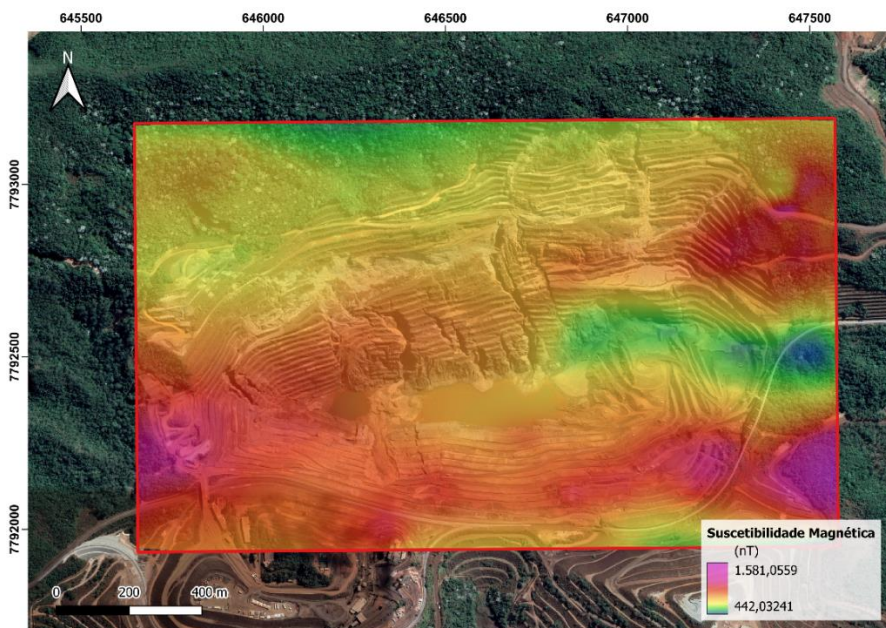
Figura 6-4 – Mapa de declividade da mina.



6.1.2 Aeromagnetometria

Os dados de magnetometria foram plotados e interpolados (Figura 6-5). Para interpolação utilizou-se a malha de triângulos irregulares (TIN), método escolhido essencialmente pela simplicidade e desempenho computacional.

Figura 6-5 – Mapa geofísico (magnetometria) interpolado.

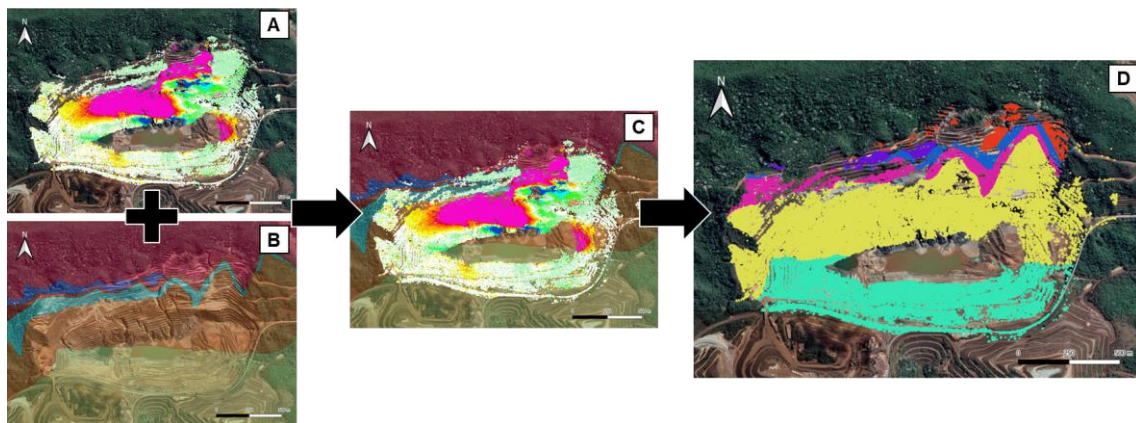


A aplicação dos dados de magnetometria tem por finalidade essencialmente a capacidade de refletir aspectos estruturas e litológicos em subsuperfície. Essas características não necessariamente são contempladas no mapeamento geológico superficial.

6.1.3 Associação de litologias e velocidade média de PS

Os atributos de litotipo e velocidade média atribuída a cada *persistent scatter* recuperado pelo monitoramento InSAR foram associados com fins na avaliação de relações entre os parâmetros. A Figura 6-6 apresenta a linha de processamento realizada.

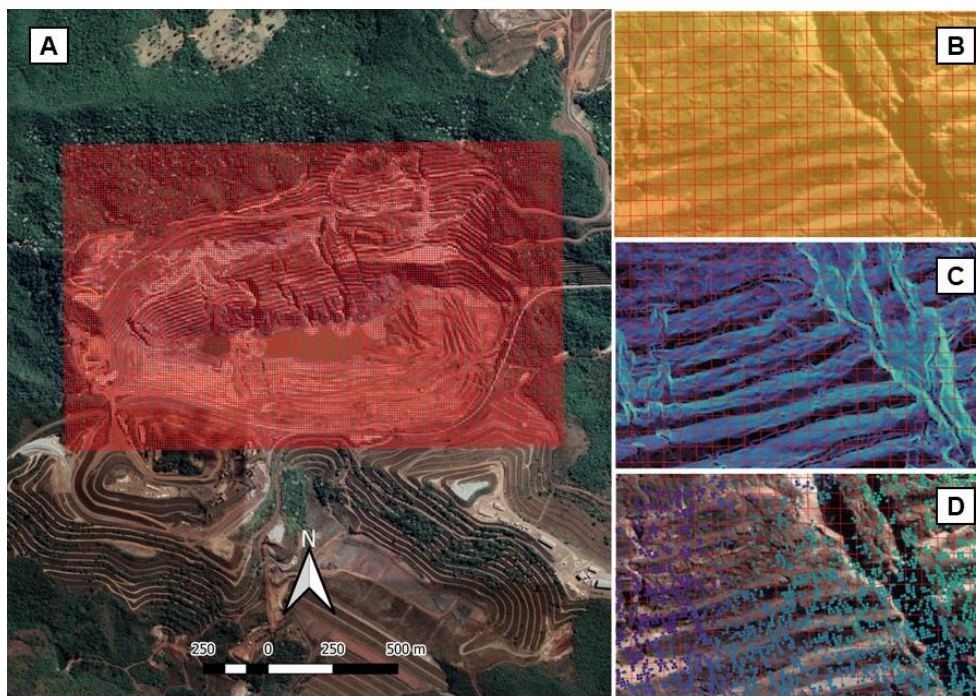
Figura 6-6 – Fluxo de processamento para associação espacial de atributos. A) Dados de velocidade média InSAR. B) Litologias da área de estudo. C) Sobreposição de camadas. D) Produto da associação espacial, cada ponto recuperado pelo monitoramento InSAR é associado a um litotipo.



6.1.4 Associação de atributos por grades regulares

O controle de granularidade dos dados é fundamental para viabilização de análises espaciais e estatística. Nesse sentido, foram criadas grades regulares 10x10m e posteriormente rotuladas com valores médios de cada unidade (Figura 6-7). Foram consideradas as camadas “litologia”, “declividade”, “velocidade média InSAR” e “magnetometria” e as ferramentas de associação por atributos e estatísticas zonais.

Figura 6-7 – A) Delimitação da grade para a mina. B) Grade sobreposta a aerogeofísica. C) Grade sobreposta a dados de declividade. D) Grade sobreposta a dados InSAR.



Para cálculo dos valores médios por área da grade foi construído código em linguagem python aplicando-se as bibliotecas PANDAS e numpy.

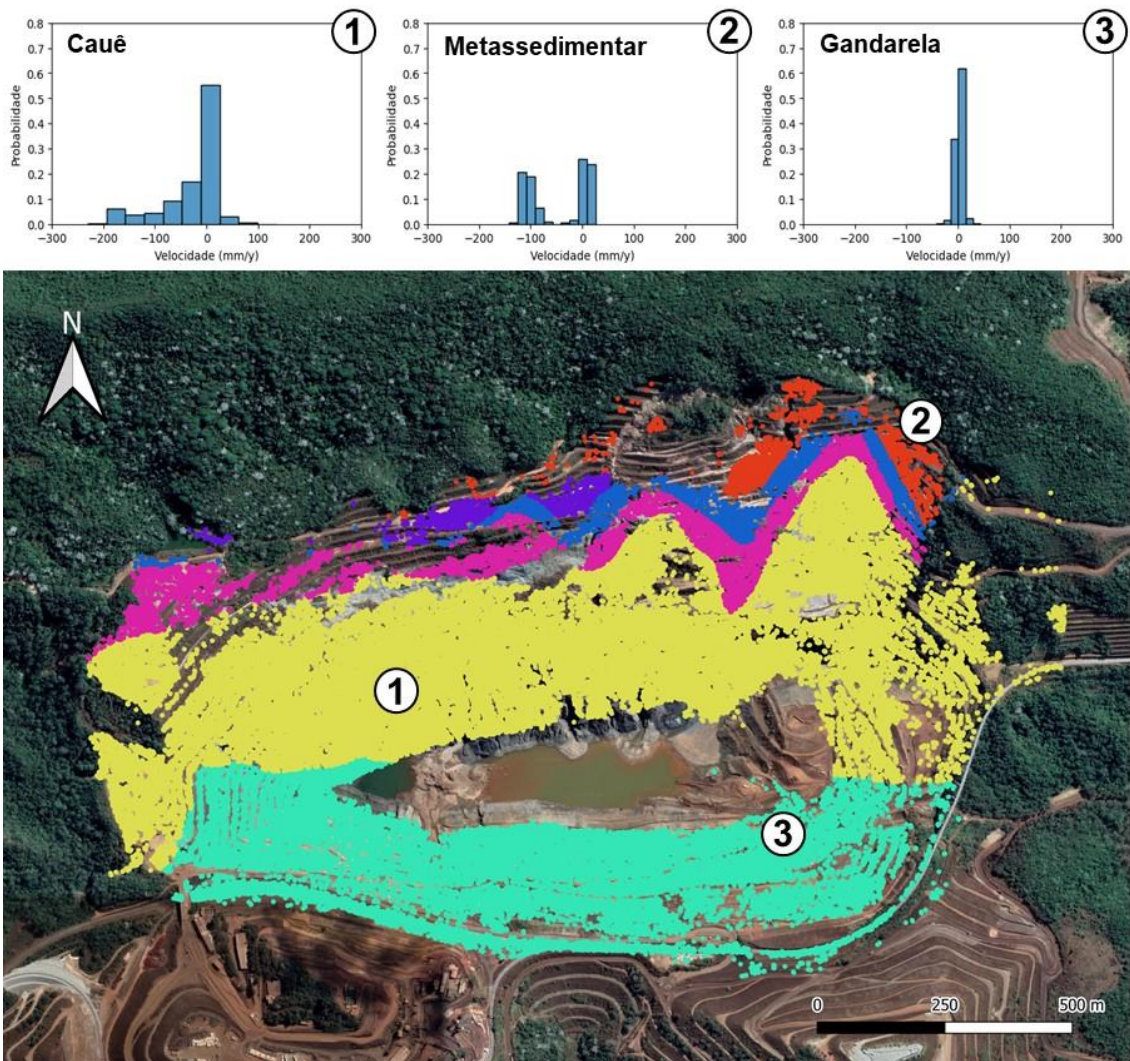
7 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE VELOCIDADES

As bases de dados e pós-processamentos apresentados foram utilizados como base para análises estatísticas. O presente tópico tem por finalidade apresentar e discutir esses resultados.

A primeira associação foi baseada na análise das distribuições de velocidades médias por categoria de litotipo. A Figura 7-1 apresenta as unidades compostas por e respectivos histogramas de velocidade para dados da visada ascendente.

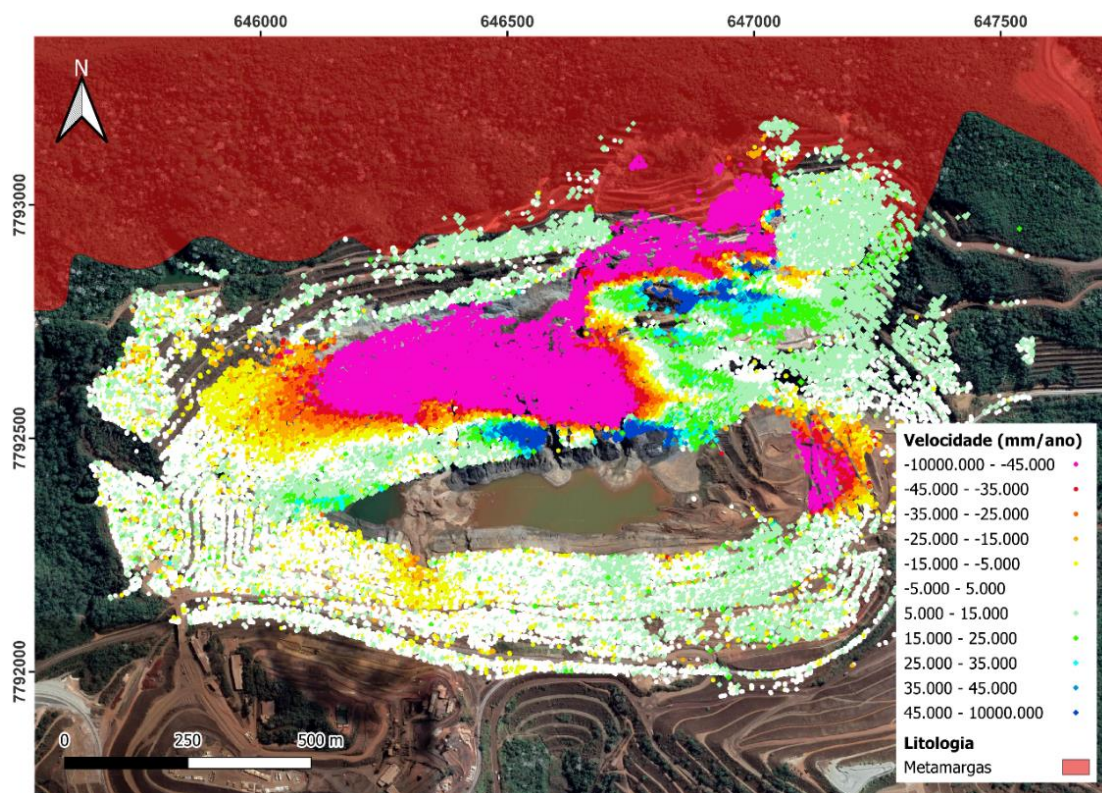
- (1) Itabiritos silicosos, dolomíticos e anfibolíticos, hematititos, mármore, mármore ferruginoso e filito ferruginoso. Localmente magnetititos, metajaspilitos e quartzitos ferruginosos (Fm. Cauê);
- (2) Metamargas, formações ferríferas da fácies carbonato e xistos carbonosos intercalados a metapelito, metagrauvas e metarenitos impuros, com turmalinitos e lentes de metaconglomerados, localmente, reconhecidos (Metassedimentar);
- (3) Mármore, mármore ferruginoso, itabiritos dolomíticos e silicosos. Localmente brechas ferruginosas e dolomíticas (Fm. Gandarela);

Figura 7-1 – Histogramas de velocidade por litologias principais.



Os dados indicam maior concentração relativa de valores discrepantes, ou seja, mais distantes da condição estacionária (velocidade = 0) nos itabiritos. Para a unidade metassedimentar observa-se bimodalidade na distribuição das velocidades. Essa condição reflete a dualidade de comportamentos observados para a unidade. A Figura 7-2 indica exclusivamente a porção da unidade litológica mencionada em relação ao perfil de velocidades médias.

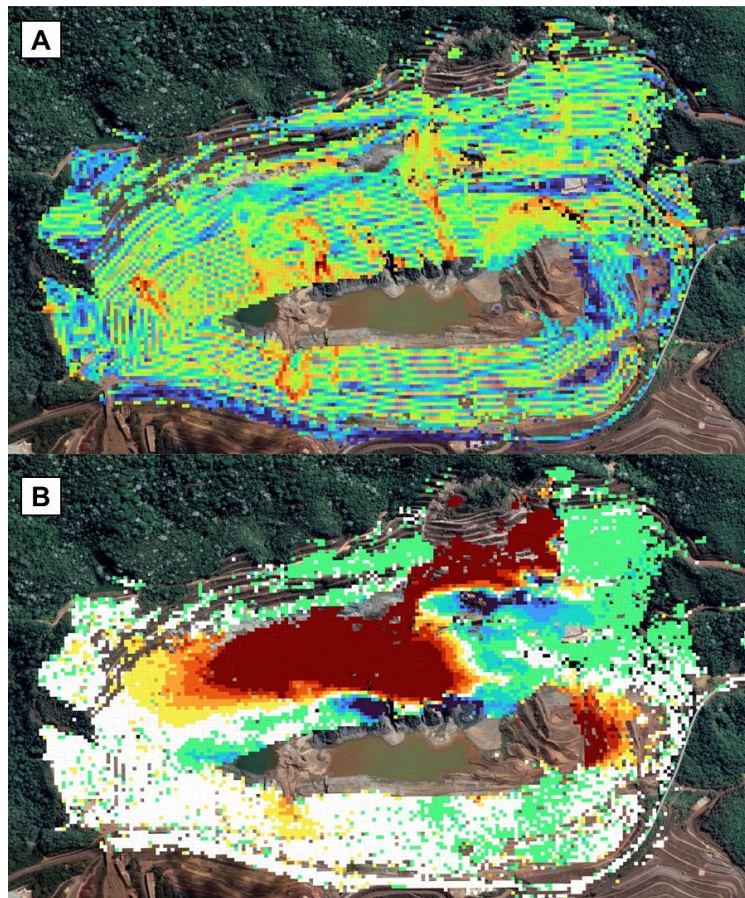
Figura 7-2 – Velocidade média por ponto em relação à distribuição da unidade metassedimentar (metamarga).



Os carbonados apresentaram, para o período avaliado, baixa dispersão da distribuição. Essa condição, de forma geral, pode ser associada a uma condição de estabilidade restrita essencialmente ao talude sul da cava. Cabe destacar que a análise puramente numérica, independente da litologia investigada, pode ser enviesada pela quantidade de dados recuperados por litotipo.

A segunda abordagem conduzida foi baseada na associação entre a velocidade e a declividade média. A adoção de dados mediados espacialmente tem por finalidade a compensação de erro posicional associado ao dado de radar. A Figura 7-3 apresenta o resultado da associação espacial dos dados. Cabe destacar que os dados foram filtrados, retirando-se onde as quadrículas onde ao menos uma entrada era nula.

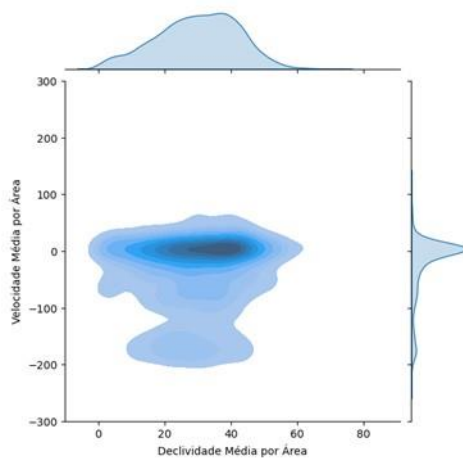
Figura 7-3 – A) Grade com declividade. B) Grade com velocidade média.



Além da visualização espacial em grades os dados foram avaliados estatisticamente. Os gráficos a seguir (Figura 7-4 a Figura 7-5) apresentam a dispersão dos dados e suas respectivas distribuições para cada uma das variáveis consideradas.

Figura 7-4 – Análise bivariada da declividade e velocidade média por unidade estratigráfica.

Fm. Cauê



Fm. Batatal

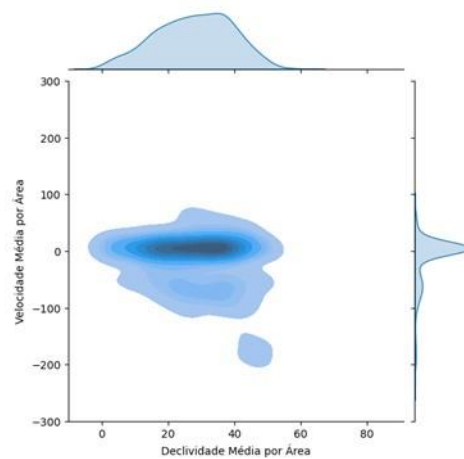
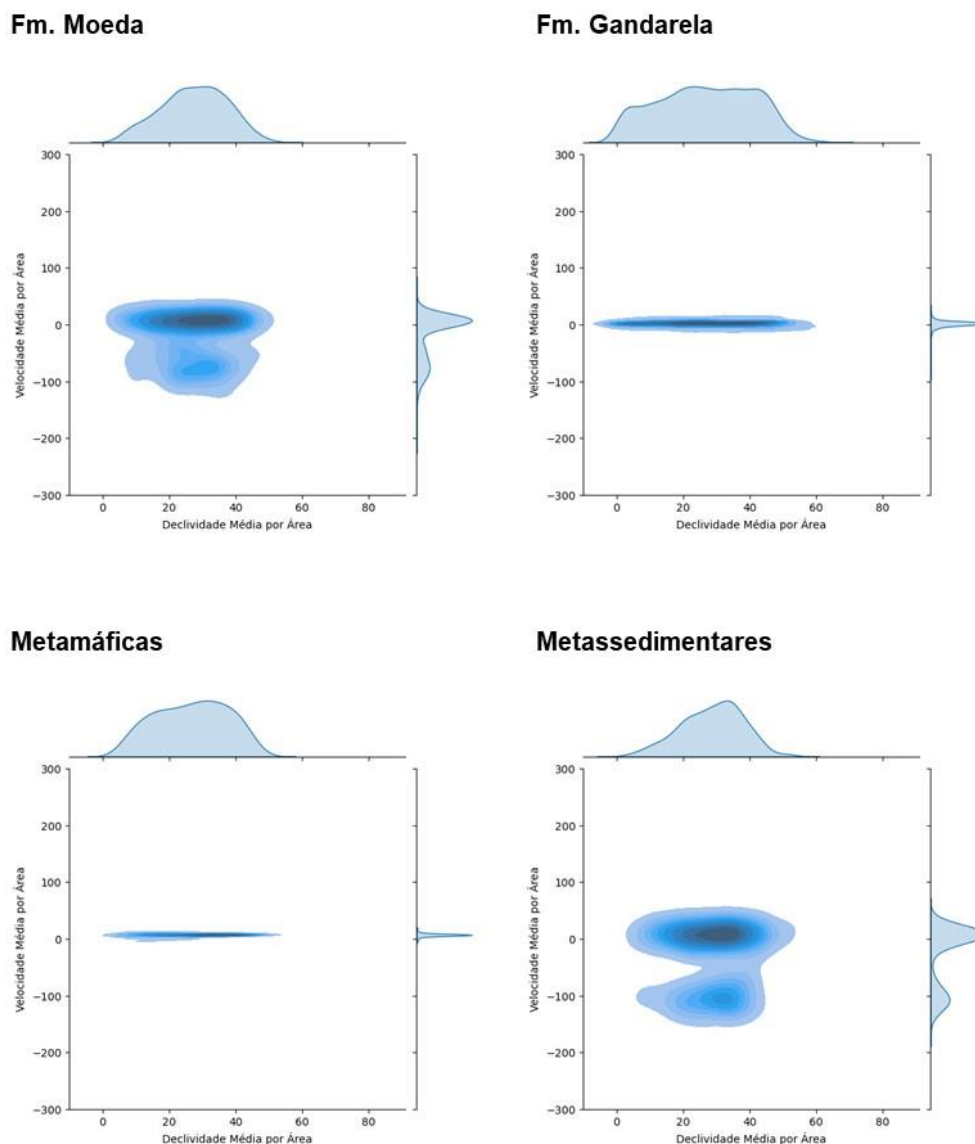


Figura 7-5 – Análise bivariada da declividade e velocidade média por unidade estratigráfica.



Foram calculadas as correlações de Pearson e Spearman (Tabela 7-1), além da construção dos gráficos de dispersão.

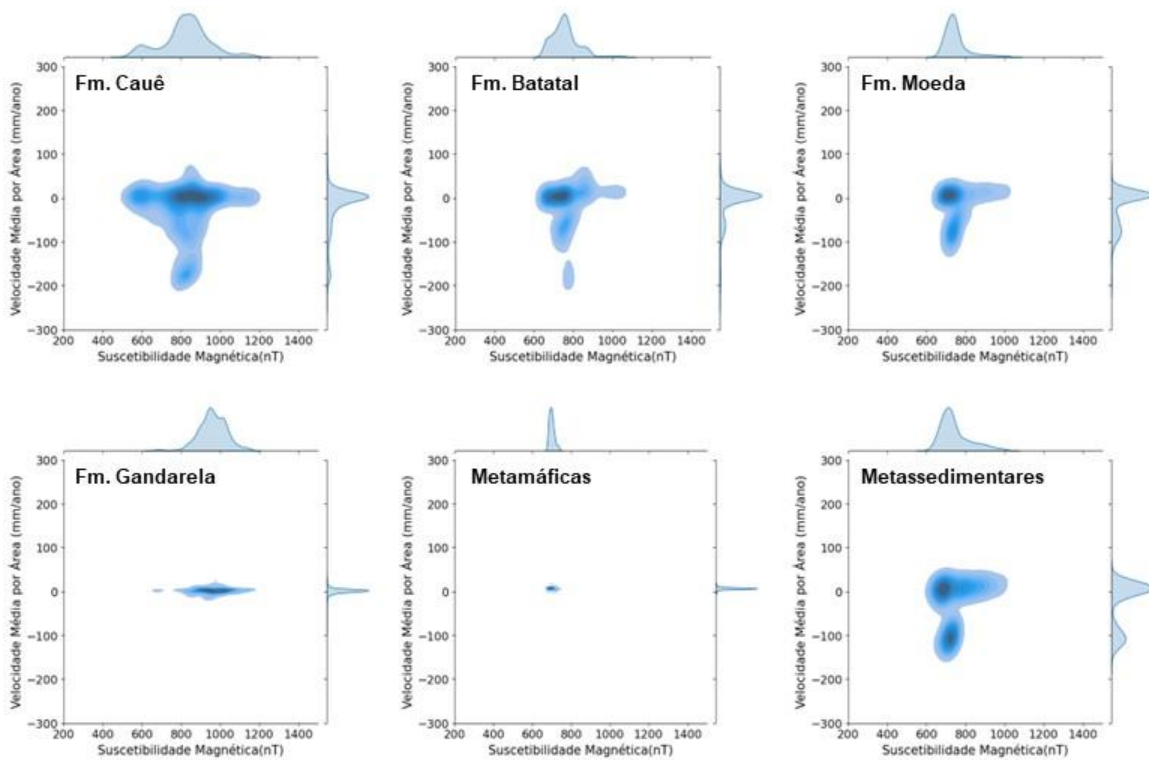
Tabela 7-1– Correlação de Pearson entre declividade e velocidade média por litologia.

Unidade	Correlação de Pearson	Correlação de Spearman
Fm. Cauê	0.0689	0.0898
Fm. Batatal	-0.1990	-0.0087
Fm. Moeda	-0.0591	0.0301
Fm. Gandarela	0.0143	-0.0040
Metamáficas	0.0696	0.0564
Metassedimentares	0.0107	0.0334
Geral (todas unidades)	-0.0025	0.0333

Os dados indicaram valores de correlação de Pearson próximos de zero, ou seja, não existe uma associação linear direta entre os dados de declividade e velocidade média medida pelo InSAR. O agrupamento por litologia indica melhoria significativa na correlação em relação ao agrupamento total dos dados, porém, se mantém a ausência de correlação.

Análise similar foi conduzida para os dados geofísicos em relação às velocidades médias (Figura 7-6). Para os dados geofísicos também não foram encontradas correlações fortes entre os dados.

Figura 7-6 – Análise bivariada da suscetibilidade magnética e velocidade média.



8 COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DE VELOCIDADES

Até o presente momento as avaliações foram pautadas pela aplicação de estatísticas uni a bivariadas, pautadas essencialmente pelas distribuições e correlações entre variáveis. No entanto, para garantir robustez à análise do quanto os dados de velocidade média se associam a determinado litotipo será conduzida uma ANOVA (Análise de Variância). Para implementação da ANOVA

e testes estatísticos associados, foram aplicadas funções nativas do *software* RStudio.

O teste estatístico proposto é um dos mais amplamente utilizados sendo aplicável em uma ampla gama de estruturas de experimentos (STÄHLE e WOLD, 1989). O teste baseia-se nas hipóteses:

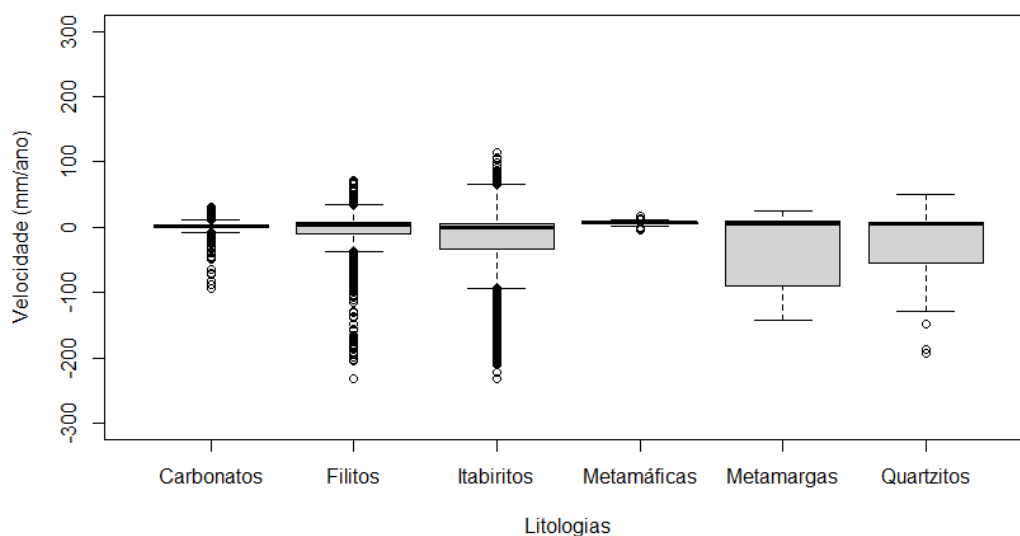
- **Hipótese nula:** as médias das populações são semelhantes;
- **Hipótese alternativa:** ao menos uma média é diferente;

Além disso, segue as mesmas premissas do teste t, sendo elas, observações aleatórias e independentes, normalidade para a distribuição e homecedasticidade (homogeneidade da variância). Dado o tamanho da amostra utilizada, os testes de normalidade tendem a convergir (p-valor muito baixo).

Para o presente estudo, entende-se que a hipótese nula se associaria a uma evidência estatística de que as velocidades mais elevadas não se associam a determinada litologia. A hipótese alternativa, por sua vez, indicaria discrepâncias entre as distribuições investigadas.

Primeiramente, foram construídos gráficos de caixa (*boxplot*) das velocidades por litologia (Figura 8-1).

Figura 8-1 – Velocidade média de deslocamentos InSAR por litologia, diagrama de caixa.



Observa-se a presença de grande quantidade de *outliers* (1.5x a distância interquartil) principalmente para as unidades, Gandarela (carbonatos), Batatal (filitos) e Cauê (itabiritos). No entanto, os valores absolutos de média mostraram-se próximos.

Após performar o teste ANOVA, foram obtidos os resultados sumarizados na Tabela 8-1.

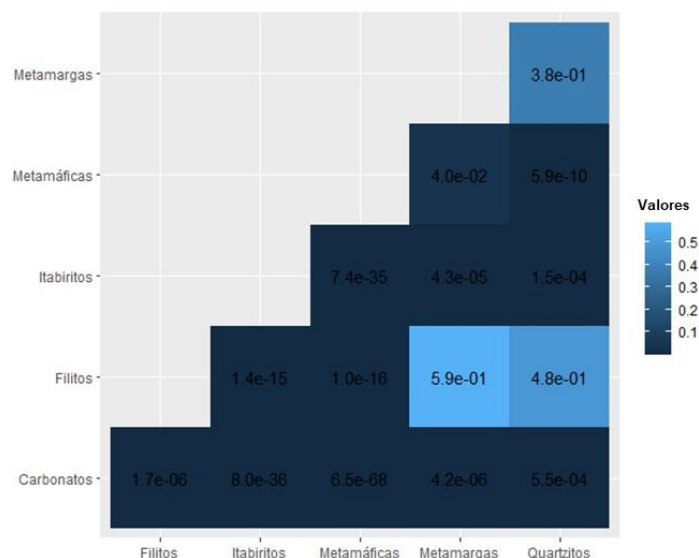
Tabela 8-1– Resultados da análise de variância.

	Graus de Liberdade	Estatística F	P-valor
Litologia	5	166.5	<2e-16
Resíduos	11631	-	-

Diante dos resultados tem-se que a hipótese nula é rejeitada. Contudo, a ANOVA enquanto método paramétrico e as condições de distribuição assimétrica da amostra, grande quantidade de *outliers* e dificuldades associadas à prova de normalidade, decidiu-se realizar também o teste de Kruskal-Wallis (1952).

O teste de Kruskal-Wallis retornou chi-quadrado de indicando que ao menos uma das distribuições é diferente das demais. Diante disso foi performado o teste de Wilcoxon (1945), e os resultados (Figura 8-2) indicaram que nenhuma das litologias tem distribuições similares de velocidade.

Figura 8-2 – Gráfico de calor dos resultados do teste de Wilcoxon.



9 CONCLUSÕES

O trabalho conduzido permitiu a aplicação de diferentes recursos de geoprocessamento apresentados durante as aulas teóricas da disciplina. Ferramentas de modelagem de terreno foram utilizadas na construção das bases topográficas e mapas temáticos, a geoestatística foi aplicada para interpolação e reamostragem dos dados, o estudo de sistemas de referência espacial foram utilizados no georreferenciamento das bases para um padrão único, além de todas as aplicações de associações espaciais de atributos e recursos para avaliação de qualidade das bases.

Em termos dos produtos técnicos e de interpretação, tem-se que as variáveis investigadas não apresentaram correlação direta com as velocidades medidas pelo InSAR. Potencialmente o problema tratado não é de natureza linear e deve ser investigado em maior detalhe com ferramentas avançadas de análise de dados (*e.g.* técnicas de aprendizagem de máquina capazes de captar variabilidades não lineares nos padrões espaciais).

A aplicação de testes estatísticos conjuntamente às variáveis espacialmente distribuídas e ferramentas de geoprocessamento permitiram discutir a pergunta orientadora da pesquisa. É possível afirmar, com base em dados, que as velocidades não se distribuem de forma igualitária para todas as litologias. Dessa forma, conclui-se que o litotipo, ainda que de forma não linear, é parâmetro relevante à setorização de riscos da cava e da compreensão dos fenômenos de movimento de massa mensurados.

A associação espacial de dados de natureza física e amostragens diversas sob mesmas condições de granularidade abre espaço para análises de integração de variáveis a serem desenvolvidas durante a pesquisa de mestrado. Cabe destacar que a ampla quantidade de dados empregados contribui para análises inovadoras, ainda que exija embasamento teórico e esforço computacional acima do usual.

A partir dos critérios de controle de qualidade das bases e produtos estabelecidos, tem-se os seguintes pontos como limitações da abordagem realizada:

- O modelo digital de terreno interpolado e respectivo produto de declividade possuem artefatos de interpolação em áreas limítrofes. A adoção de técnicas de degradação da resolução e a filtragem de dados em zonas de borda podem evitar problemas dessa natureza;
- A interpolação geofísica foi realizada a partir de método determinístico (TIN). Nesse caso análise de variografia e interpolação por krigagem potencialmente entregariam resultado mais aderente. Para o presente caso a abordagem foi inviabilizada pela capacidade computacional disponível.
- O trabalho não foi capaz de contemplar variações temporais dos dados, como a evolução temporal dos deslocamentos e a variação topográfica experimentada pela cava decorrente dos movimentos de massa registrados.
- Os dados carecem de fundamentação geomecânica robusta que sustente a análise com fins na estabilidade geotécnica ou mapeamento do risco. Para isso, espera-se em etapas futuras da pesquisa a construção de abordagens associadas a aspectos como o modelo geomecânico, inserção de dados relativos aos fatores de segurança calculados ou cálculos de probabilidades de falha.
- A malha regular quadrada foi aplicada no estudo, contudo, propõe-se para pesquisas futuras a avaliação quantitativa do uso de malhas com geometrias de limites mais complexos, e.g. hexagonais.

Por fim, o trabalho foi essencial na definição das perspectivas futuras de evolução da pesquisa de mestrado. A partir do tratamento exploratório das bases de dados foi possível definir a linha de evolução da pesquisa, voltada à predição de parâmetros geomecânicos partindo da dados distribuídos espacialmente, em especial provenientes da perspectiva observacional do monitoramento InSAR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. B. Ernst Hasenclever em Gongo-Soco: exploração inglesa nas minas de ouro em Minas Gerais no século XIX. **Dossiê Brasil no Contexto Global, 1870-1945**: História, Ciência, Saúde – Manguinhos. p. 281-298, Mar 2014.

CARLÀ, T.; FARINA, P.; INTRIERI, E.; KETIZMEN, H.; CASAGLI, N. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. **Engineering Geology**, v. 235, p. 39-52, Jan 2018.

EBERHARDT, E.; NESS, M.; NOON, D.; SCHWARZ, E.; STACEY, P. Overview of slope monitoring. In: SHARON, R.; EBERHARDT, E. (Ed.). **Guidelines for Slope Performance Monitoring**. 1. ed. CRC Press, 2020. Cap. 2, 330 p. ISBN-10: 0367509199.

ENDO, I.; CASTRO, P. T. A.; GANDINI, A. L. **Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos**. 1 ed. 3i Editora, 2020.

FARINA, P.; BARDI, F.; LOMBARDI, L.; GIGLI, G. Combining structural data with monitoring data in open pit mines to interpret the failure mechanism and calibrate radar alarms. In: SLOPE STABILITY 2020. **Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering**. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2020. p.523-534.

HARTWIG, M. E. **Monitoramento de taludes de mineração por interferometria diferencial com dados Terrasar-x na Amazônia: mina de N4W, Serra de Carajás, Pará, Brasil**. 2014. 232 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.18.49-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G5LJSS>> Acesso em: 11 mar. 2023.

International Council of Mining and Metals (ICMM). **Health and safety critical control management: good practice guide**. London (UK): ICMM. 2015. 30 p. ISBN: 978-1-909434-13-4.

MORETTO, S.; BOZZANO, F.; MAZZANTI, P. The Role of Satellite InSAR for Landslide Forecasting: Limitations and Openings. **Remote Sensing**, v. 13, no. 18:3735, Set 2021.

KRUSKAL, W.H.; WALLIS, W.A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v.47, n.260, p.583-621, 1952.

OLIVEIRA, J. **Estado de Minas**. Deslocamento no talude da mina Gongo Soco aumenta para 19 centímetros. Belo Horizonte, 25 de mai. 2019. Disponível em:

<https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/05/25/interna_gerais,1056625/deslocamento-no-talude-da-mina-de-gongo-soco-aumenta-para-19-centimetr.shtml> Acesso em: 19 mar. 2023.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F. Utilizando fase e a amplitude em medidas de deformação In: _____ (Ed.). **Monitoramento DInSAR para Mineração e Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. Cap. 4, p. 60-93.

READ, J.; STACEY, P. (Ed.). **Guidelines for Open Pit Slope Design**. 1. ed. CRC Press, 2009. 510 p. ISBN-10: 0415874416.

STÄHLE, L.; WOLD, S. Analysis of Variance. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**. Elsevier Science Publishers B.V., 6, 259-272, 1989.

OSASAN, K. S.; AFENI, T. B. Review of surface mine slope monitoring techniques. **Journal of Mining Science**, v. 46, p.177–186, Jun 2010.

WILCOXON, F. Individual Comparisons by Ranking Methods. **Biometrics Bulletin**. International Biometric Society, 1945. Vol. 1, No. 6, pp. 80-83.