

Monitoramento Geotécnico em Barragens com Radar Terrestre: Influência da Poda da Vegetação na Qualidade dos Dados.

Lucas Leonardo Swerts Esteves
Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Itabira, Brasil, lucas.esteves@vale.com

Eduardo César Jardim
Engenheiro Especialista, Vale S.A., Itabira, Brasil, eduardo.jardim@vale.com

Clíscia Cerceau Silva
Engenheira Geotécnica, Vale S.A., Itabira, Brasil, cliscia.silva@vale.com

Yngrid Luísa Paula da Silva Ferreira
Analista Operacional, Vale S.A., Itabira, Brasil, yngrid.ferreira@vale.com

Maílson Braga Moreira
Analista Operacional, Vale S.A., Itabira, Brasil, mailson.moreira@vale.com

RESUMO: O monitoramento de barragens de mineração pode ser realizado considerando técnicas e instrumentos distintos. O radar terrestre vem sendo utilizado para essa finalidade, pois opera de forma remota e contínua, em quase tempo real, e pode detectar movimentações superficiais com grande precisão a grandes distâncias. Ademais, possui uma ampla cobertura, ele varre uma parede inteira, não apenas pontos como nas estações totais robóticas. Contudo, é fundamental compreender suas limitações, principalmente aquelas que podem causar falhas de detecção ou gerar interpretações equivocadas na análise de dados. Uma dessas limitações é a presença de vegetação, portanto, este estudo visa entender a influência da vegetação nesse tipo de monitoramento e o impacto da poda da vegetação, baseado na observação e interpretação dos dados de monitoramento de uma barragem de rejeito, em que serão analisados o comportamento dos dados coletados pelo radar, a magnitude e sentido dos deslocamentos, a taxa de deslocamento ao longo do tempo e o nível de ruído presente nos mapas e nas séries temporais. O resultado da análise visa melhorar a compreensão e eficácia do monitoramento geotécnico de barragens por meio de radar terrestre, sobretudo nas barragens do Brasil, uma vez que a maioria delas possui muita vegetação.

PALAVRAS-CHAVE: Radar Terrestre, Barragem de Mineração, Vegetação.

ABSTRACT: Monitoring mining dams can be accomplished using various techniques and instruments. Ground-based radar has been increasingly employed for this purpose due to its remote and continuous operation, nearly real-time capabilities, and precise detection of surface movements over long distances. Additionally, it provides extensive coverage, scanning entire walls rather than just specific points like robotic total stations. However, it is crucial to understand its limitations, particularly those that may lead to detection failures or misinterpretations in data analysis. One such limitation is the presence of vegetation. This study aims to explore the influence of vegetation on ground-based radar monitoring and assess the impact of vegetation pruning. The analysis is based on observations and interpretation of monitoring data from a tailings dam. The study examines the behavior of radar-collected data, displacement magnitudes and directions, displacement rates over time, and noise levels present in maps and time series. The results aim to enhance the understanding and effectiveness of geotechnical monitoring of dams using ground-based radar, especially for dams in Brazil, where vegetation is prevalent.

KEYWORDS: Ground-based Radar, Mining Dams, Vegetation.

1 INTRODUÇÃO

O radar interferométrico terrestre tem se destacado como uma ferramenta essencial no monitoramento geotécnico de estruturas geotécnicas, emprega técnicas interferométricas avançadas para detectar movimentações milimétricas no terreno ao longo do tempo, permitindo uma avaliação abrangente da estabilidade e integridade de barragens, cavas e taludes. Sua capacidade de monitorar grandes áreas com alta resolução espacial e temporal torna-o especialmente valioso para identificar potenciais riscos geotécnicos e tomar medidas preventivas ou corretivas de forma proativa. No entanto, é importante ressaltar uma limitação associada à presença de vegetação. Em áreas com cobertura vegetal densa, a interferência causada pela vegetação pode distorcer os dados do radar, dificultando a interpretação das deformações observadas. Segundo Gonçalves *et al.* (2023), a vegetação é uma das limitações da tecnologia do radar terrestre, podendo interferir na interpretação dos dados coletados, uma vez que as ondas emitidas pelo radar podem ser refletidas, absorvidas ou dispersas pela vegetação, causando a perda de coerência espacial e aumento do nível de ruído nos dados, dificultando a identificação de movimentações na estrutura da barragem e/ou gerando informações de baixa confiabilidade. Portanto, ao utilizar o radar interferométrico terrestre em ambientes com vegetação significativa, é necessário considerar essas limitações e implementar técnicas de processamento de dados específicas para mitigar os efeitos adversos da vegetação nos resultados do monitoramento geotécnico.

Neste contexto, este artigo tem como objetivo estudar a influência da vegetação no monitoramento superficial por radar terrestre de uma barragem de rejeito, além de entender o impacto da poda da vegetação na melhoria dos dados nesse tipo de monitoramento. As informações aqui contidas são provenientes do monitoramento pelo equipamento Radar IBIS-FM da Hexagon no período de 01/01/2023 a 21/09/2023.

2 ATIVIDADE DE SUPRESSÃO VEGETAL

Foi realizada a supressão vegetal em quase toda a estrutura da barragem, que durou ao todo quarenta dias para sua finalização. A atividade iniciou-se em 01/04/2023 e foi finalizada em 10/05/2023. Conforme pode ser observado na Figura 1, a roçada foi realizada de forma gradual ao longo de toda a estrutura, com exceção da porção delimitada em vermelho, uma vez que se trata de uma região inacessível ao robô (iCUT) que realiza a atividade.



Figura 1. Atividade de supressão vegetal na Barragem Sul Superior pelo iCUT.

3 RESULTADOS DO MONITORAMENTO

3.1 Gráfico de Data Quality

O Data Quality é um parâmetro baseado na coerência espacial e indica a qualidade dos dados. O processo para calcular a coerência espacial envolve comparar as imagens pixel a pixel, utilizando operações matemáticas que consideram tanto a amplitude quanto a fase das imagens radar. A normalização é crucial para garantir que a coerência espacial seja calculada de maneira objetiva e comparável entre diferentes regiões da imagem. Se o parâmetro de qualidade dos dados for menor do que o definido (0,7), os arquivos Psv's são descartados e não são processados pelo software. Com isso, o radar deixa de processar os dados em tempo real até que eles alcancem o parâmetro de qualidade estabelecido novamente.

A Figura 2 representa o Data Quality no período compreendido entre 01/01/2023 e 21/09/2023. Estão presentes os eventos de início (01/04/2023) e fim (10/05/2023) da atividade de supressão vegetal nas linhas de cor rosa, que levou ao todo 40 dias para a finalização. Antes do início da roçada da estrutura, percebe-se uma grande oscilação do parâmetro de qualidade, com vários resultados abaixo do limite definido (0,7). Além disso, nota-se uma melhora gradativa entre os meses de janeiro a março, provavelmente devido a melhora natural relativa à transição do período de chuva e seca. Após a roçada, observa-se uma significativa melhora na qualidade dos dados, a partir de meados de abril, a maioria dos valores estão acima de 0,8, sem apresentar grandes oscilações.

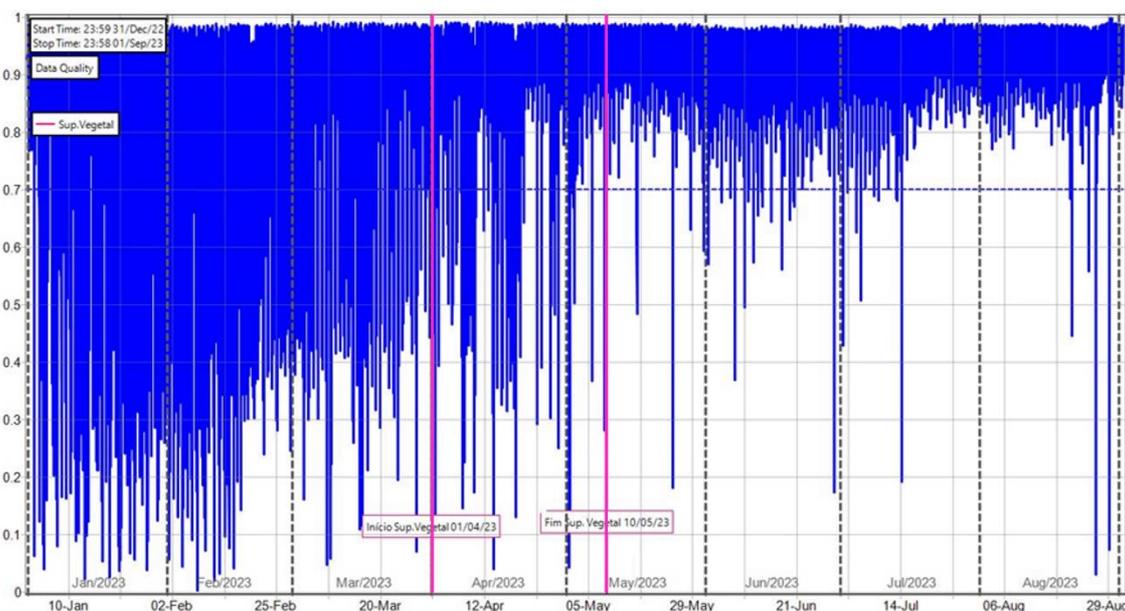


Figura 2. Gráfico de Data Quality entre 01/01/2023 e 21/09/2023.

3.2 Análise Comparativa dos Dados entre os Períodos Pré e Pós-Supressão Vegetal

Com o propósito de entender a influência da vegetação nos dados do radar foi realizada uma análise comparativa dos dados entre os períodos pré e pós-supressão vegetal, foram selecionados mapas de deslocamento, de coerência espacial e de interferograma corrigido. Foram considerados dois períodos de análise, o primeiro contemplado dentro do período pré-roçada e o segundo dentro do período pós-roçada.

3.2.1 Mapa de Deslocamento

O mapa de deslocamento é uma imagem que representa a diferença de fase entre as aquisições efetuadas pelo radar, por meio do recurso de interferometria. O mapa de deslocamento da Figura 3a contempla o período de 01/03/23 a 31/03/23 (dentro do período pré-roçada) e o mapa de deslocamento da Figura 3b contempla o

período de 10/05/23 a 10/06/2023 (dentro do período pós-roçada), ambos representando um período de 30 dias e apresentado nas escalas de -200 a +200 mm. A supressão vegetal foi realizada em toda a barragem, com exceção da área delimitada em vermelho na Figura 3b.

Observa-se, na Figura 3a, um mapa com várias regiões de acúmulo de deslocamento, com um nível de ruído considerável, principalmente nos taludes da porção central e inferior da estrutura. Os deslocamentos observados não se apresentam de forma homogênea, ou seja, são verificadas regiões de acúmulo preferenciais, associadas provavelmente às regiões de maior vegetação. De forma geral, percebe-se que o mapa da Figura 3b está muito mais “limpo” do que o mapa da Figura 3a e não são observadas as regiões de acúmulo de deslocamentos muito presentes na Figura 3a. Já na região delimitada em vermelho, na Figura 3b, onde não foi realizado a supressão vegetal observa-se o oposto, ou seja, ocorre um aumento do nível de ruído e o aparecimento de regiões apresentando deslocamento.

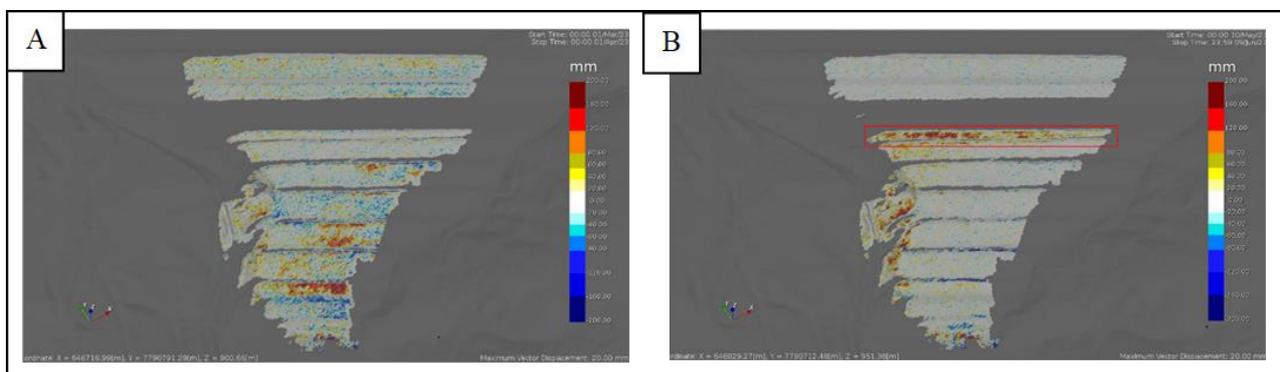


Figura 3. Mapa de Deslocamento (a) período pré-roçada: 01/03/23 a 31/03/23 (b) período pós-roçada: 10/05/23 a 10/06/23.

3.2.2 Mapa de Coerência Espacial

O mapa de coerência espacial estima a correlação da interação da onda do radar com o alvo entre as duas imagens que formam o interferograma, pode assumir valores entre 0 (sem correlação) e 1 (correlação completa). O mapa de coerência espacial da Figura 4a é relativo ao dia 01/03/23 (está inserido dentro do período pré-roçada) e o mapa de coerência espacial da Figura 4b contempla dados do dia 08/06/23 (está inserido dentro do período pós-roçada).

Observa-se na Figura 4a um mapa com baixa coerência espacial, especialmente na porção central e inferior da estrutura. Percebe-se, também, baixa coerência nas regiões planas e de borda da estrutura. De forma geral, nota-se uma melhora na coerência espacial em toda a estrutura na Figura 4b, com exceção da área onde não foi realizada a supressão vegetal, delimitada em vermelho, nessa região ocorreu uma piora na coerência espacial. No entanto, nota-se, ainda, na Figura 4b, regiões de baixa coerência espacial localizadas nas regiões planas e de borda.

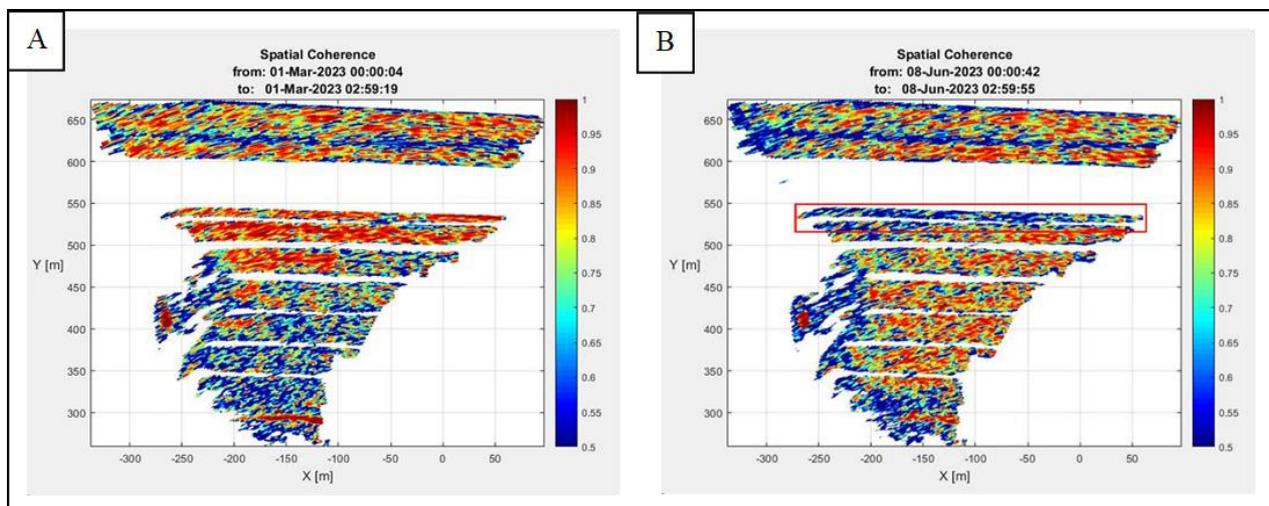


Figura 4. Mapa de coerência espacial (a) período pré-roçada: 01/03/23 (b) período pós-roçada: 8/06/23.

3.2.3 Mapa de Interferograma Corrigido

O mapa de interferograma corrigido calcula e exibe um mapa de diferença de fase entre o primeiro e último dado, corrigidos por um ajuste linear (modelo de correção atmosférica). É expresso em graus e pode assumir valores entre -180° e 180° . O mapa de interferograma corrigido da Figura 5a é relativo ao dia 01/03/23 (está inserido dentro do período pré-roçada) e o mapa de interferograma corrigido da Figura 5b contempla dados do dia 08/06/23 (está inserido dentro do período pós-roçada).

Corroborando com os mapas de deslocamento e de coerência espacial, nota-se uma diminuição significativa do nível de ruído em toda a estrutura ao se comparar os mapas da Figura 5a e 5b. Como o interferograma corrigido representa um dado pós-processado pelo algoritmo de correção atmosférica, entende-se que os ruídos observados não foram causados por interferências atmosféricas, e sim originados pela vegetação presente na estrutura. Após a roçada, os ruídos são suavizados, somente são observados ruídos presentes nas regiões de baixa amplitude (regiões planas e de borda) e na porção delimitada em vermelho, onde não foi realizada a atividade de roçada.

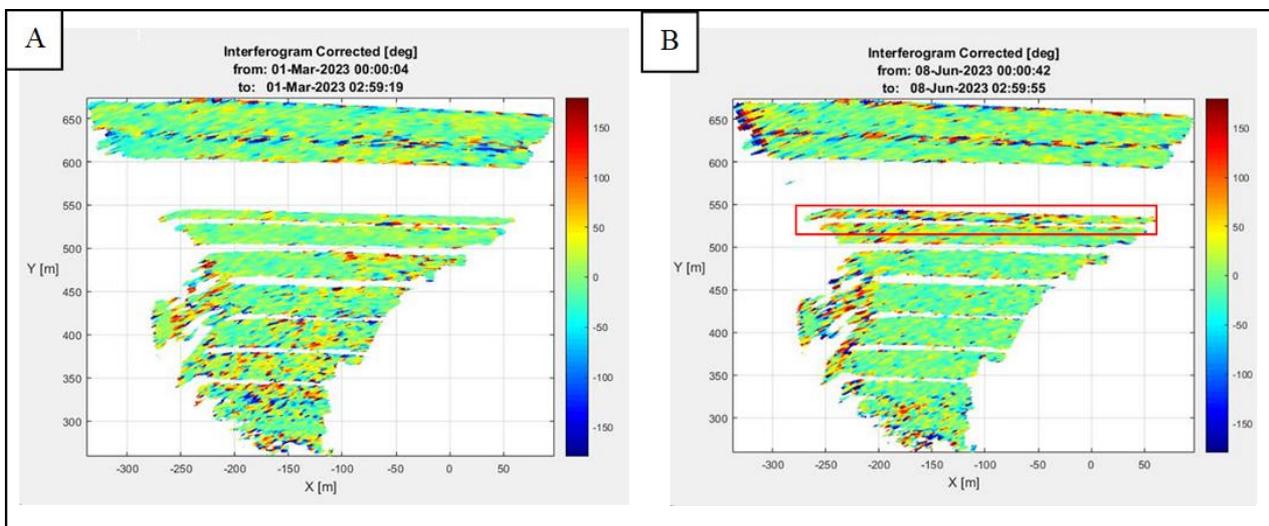


Figura 5. Mapa de interferograma corrigido (a) período pré-roçada: 01/03/23 (b) período pós-roçada: 08/06/23.

4 ÁREAS SELECIONADAS

Foram criadas seis áreas ao longo das faces dos taludes da estrutura (Figura 6), com o objetivo de entender se a supressão vegetal causou mudança no comportamento dos dados coletados pelo radar, ou seja, se ocorreu alguma variação com relação à magnitude e sentido dos deslocamentos, bem como na taxa de deslocamento ao longo do tempo e sobre o nível de ruídos presente nas séries temporais. As áreas 01 a 06 foram selecionadas nas faces dos taludes, principalmente na porção central e inferior da estrutura, regiões onde foram observadas maiores mudanças após a supressão vegetal na análise visual realizada no tópico 3.2.

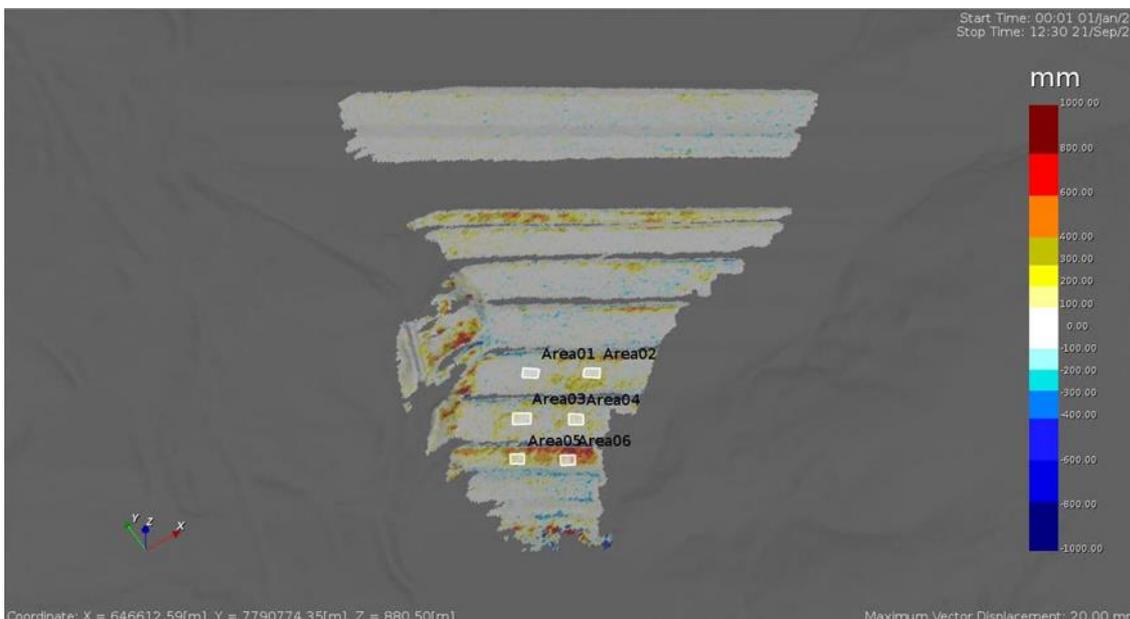


Figura 6. Mapa de deslocamento com as áreas selecionadas.

As Figuras 7 e 8 representam as séries temporais de deslocamento e velocidade. O deslocamento apontado em uma série temporal é a média do deslocamento de cada píxel da área selecionada. Observa-se nos gráficos das Figuras 7 e 8, uma mudança significativa no comportamento das séries temporais após a atividade de roçada realizada na estrutura. Anterior à atividade de roçada, notam-se saltos repentinos ou oscilações frequentes, com variações recorrentes no sentido de deslocamento. Além disso, a maioria das áreas apresentam uma tendência linear de deformação, ou seja, percebe-se um incremento de deslocamento ao longo do tempo. Após a data fim da supressão vegetal (linha rosa), as áreas apresentam um comportamento de estabilidade, sem apresentar acúmulo de deslocamento. Com relação à velocidade, ocorre uma variação significativa da amplitude do gráfico para todas as áreas, ou seja, uma variação nos valores de máximos e mínimos.

4.1 Séries Temporais de Deslocamento e Velocidade das Áreas 01 a 06

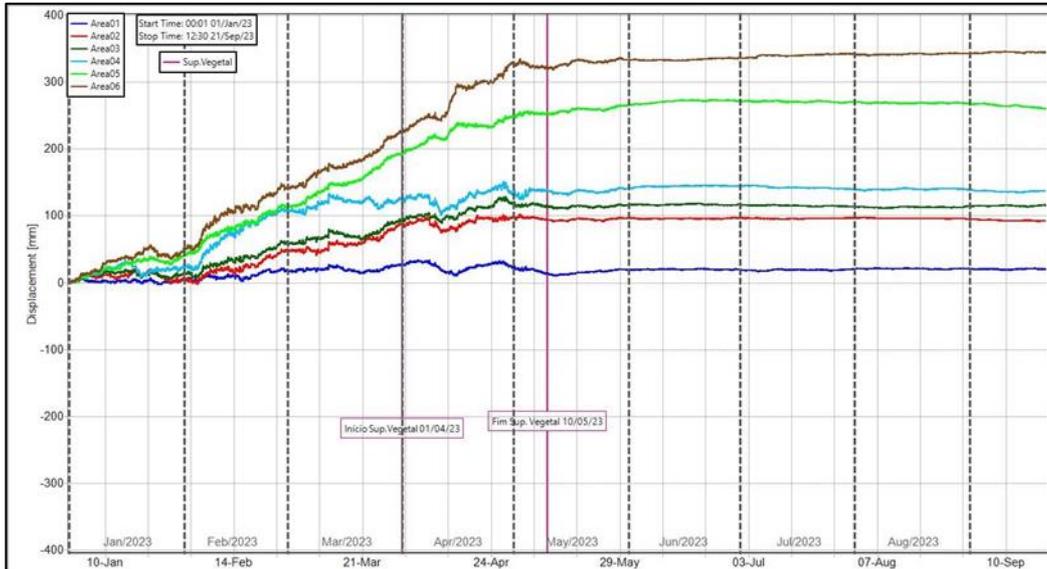


Figura 7. Série temporal de deslocamento das áreas 01 a 06.

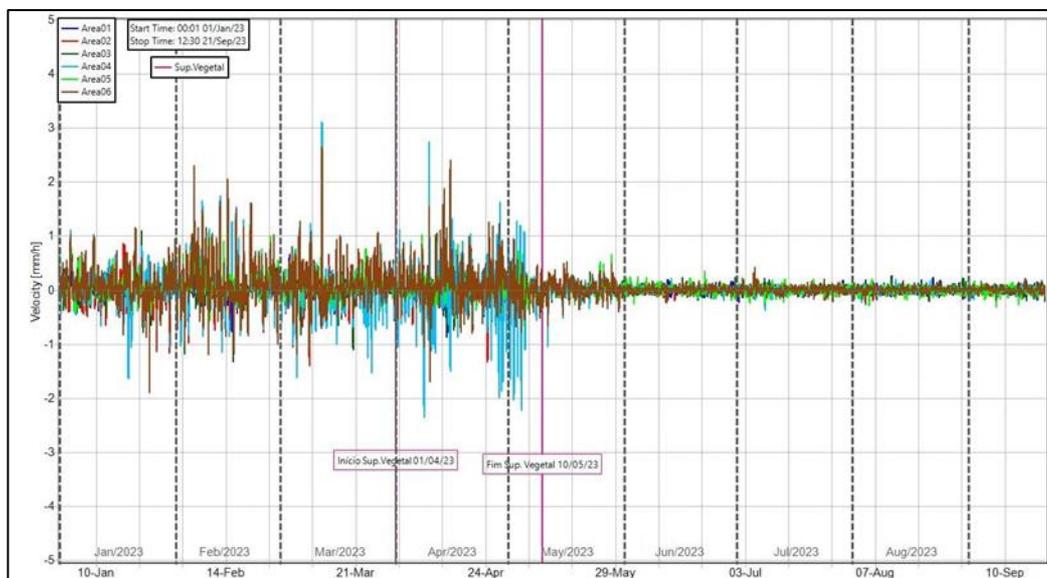


Figura 8. Série temporal de velocidade das áreas 01 a 06.

5 CONCLUSÃO

A análise do Data Quality proporcionou verificar que a coerência espacial e conseqüentemente a qualidade dos dados melhorou de forma significativa após a atividade de supressão vegetal da estrutura.

Como esperado, o resultado da análise comparativa dos dados a partir dos mapas de deslocamento, de coerência espacial e de interferograma corrigido confirma a vegetação como um fator muito prejudicial no monitoramento por radar terrestre, gerando um aumento do nível de ruídos, diminuição da coerência espacial e o aparecimento de regiões apresentando deslocamento.

O estudo das áreas selecionadas comprovou que a vegetação pode gerar tendências e incremento de deslocamento nas regiões monitoradas, além de causar dados com comportamento ruidoso. Com a supressão da vegetação observou-se a estabilização dos dados.

De forma geral, a atividade de roçada da estrutura gerou um efeito positivo na estabilização dos dados detectados pelo radar, reduzindo o nível de ruído observado e causando o desaparecimento de regiões com acúmulo preferencial de deslocamento. A melhora na qualidade dos dados gera maior confiabilidade, e como resultado espera-se uma assertividade nas análises realizadas para a identificação de deslocamentos reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gonçalves, O., Clemente, B., Campos, M., Lisboa, P., Yamamoto, L., 2023. Influência da vegetação no monitoramento superficial de radar terrestre em barragens de mineração. In: XXXIV Seminário Nacional de Grande Barragens, Paraná.