



Resultados da inspeção geológico-geotécnica ao longo de infraestrutura linear no Rio Grande do Sul.

Marcelo Moya: Engenheiro de Dutos, TBG, Campinas, Brasil, moya@tbg.com.br

Fernando Machado Alves: Sócio-Diretor e Geólogo, REGEA, São Paulo, Brasil, fernando@regea.com.br

Letícia Constantino Vicente: Geóloga, REGEA, São Paulo, Brasil, leticia.vicente@regea.com.br

Gilberto Hernandes Sanches: Consultor, TBG, Campinas, Brasil, ghernandes@tbg.com.br

Walter Schultz Neto: Engenheiro de Dutos, TBG, Campinas, Brasil, wneto@tbg.com.br

Renato Bezner Martinez: Geólogo, REGEA, São Paulo, Brasil, renato.martinez@regea.com.br

RESUMO: Esse trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos após as atividades de inspeção geológico-geotécnica ao longo da faixa de uma infraestrutura linear no Rio Grande do Sul.

Os trabalhos foram desenvolvidos entre 2023 e 2024, e esse tipo de inspeção e boa prática faz parte do programa de integridade das infraestruturas enterradas de transporte brasileiras. O objetivo dessas inspeções é de identificar, registrar, classificar e monitorar ocorrências geotécnicas ao longo da faixa e de suas áreas adjacentes.

A faixa da infraestrutura inspecionada atravessa 5 estados brasileiros, mais de 1000 travessias de rios, diferentes tipos de encostas, solos e 3 serras do mar brasileiras (PR, SC e RS). No final da campanha integral da faixa foram reclassificados 42 pontos geotécnicos existentes, registrados 31 novas ocorrências e classificadas 17 encostas monitoradas. Essa classificação segue modelo de risco geotécnico adota pela empresa transportadora, com o objetivo de priorizar serviços, mitigações e obras necessárias.

Após a vistoria realizada, entre abril e maio de 2024 ocorreram chuvas extremas com médias de 500 mm, e picos de 1000 mm em certas áreas do estado, situação que se insere cerca de 200 km da faixa de dutos. Esse evento acarretou ao estado diversos alagamentos, escorregamentos de encostas e erosões em margens de rios dentre outros eventos.

Isso motivou uma nova inspeção nesse trecho referido para reavaliar os pontos conhecidos e em busca de possíveis novas ocorrências geotécnicas. No final da nova inspeção foram detectadas 5 novas ocorrências geotécnicas (3 escorregamentos de encostas, 1 solapamento e erosão de margem e 1 caso na faixa de dutos com fendas e trincas e no solo), registros considerados satisfatórios frente à magnitude dos eventos, e os expressivos danos observados em outras regiões do estado. A comparação entre as inspeções antes e depois das fortes chuvas foram muito importantes para o melhor entendimento da região, bem como para definição de novas inspeções geológico-geotécnicas após eventos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: Inspeção; geológico; geotécnica; faixa de dutos; investigação, geológico-geotécnica

ABSTRACT: This study aims to present the results obtained from geological–geotechnical inspections carried out along the right-of-way of a linear infrastructure in Rio Grande do Sul, Brazil. The inspections were conducted between 2023 and 2024, and this type of survey, considered a best practice, is part of the integrity management program for Brazil’s buried transportation infrastructures. The purpose of these inspections is to identify, record, classify, and monitor geotechnical occurrences along the right-of-way and its adjacent areas. The inspected infrastructure crosses five Brazilian states, over 1,000 river crossings, different slope and soil types, as well as three Serra do Mar mountain ranges (in Paraná, Santa Catarina, and Rio Grande do Sul). At the end of the full campaign, 42 existing geotechnical points were reclassified, 31 new occurrences were recorded, and 17 monitored slopes were classified. This classification follows the geotechnical risk model adopted by the transportation company, with the goal of prioritizing services, mitigations, and necessary works.

After the first inspection campaign, carried out between April and May 2024, the region was affected by extreme rainfall events, with averages of 500 mm and peaks of up to 1,000 mm in certain areas of the state, approximately 200 km from the pipeline right-of-way. This event triggered widespread flooding, slope failures, and riverbank erosion, among other impacts.

These conditions motivated a follow-up inspection along the affected section to reassess the known points and to identify potential new geotechnical occurrences. At the end of this inspection, five new geotechnical occurrences were detected: three slope failures, one riverbank undercutting and erosion, and one case within



2 0 2 5

the pipeline right-of-way involving cracks and fissures in the soil. These findings were considered satisfactory given the magnitude of the rainfall events and the significant damages observed in other regions of the state. The comparison between pre- and post-rainfall inspections proved to be highly valuable for improving the understanding of the region and for defining future geological–geotechnical inspections following extreme events.

KEYWORDS: Inspection, geological-geotechnical, Right of way, investigation, geological, geotechnical.

1 INTRODUÇÃO

A integridade estrutural de infraestrutura linear enterrada terrestre é constantemente desafiada por fatores geotécnicos e ambientais, especialmente em regiões sujeitas a eventos climáticos extremos. Historicamente, inspeções geológico-geotécnicas têm sido realizadas ao longo da faixa de servidão de dutos com regularidade que varia a cada 3 a 5 anos. Essas inspeções visaram identificar anomalias geotécnicas e classificar os trechos da faixa conforme o grau de risco, utilizando mapas de zoneamento geotécnico que consideram atributos como erodibilidade, suscetibilidade a movimentos de massa e características litoestruturais.

A faixa de dutos inspecionada atravessa 5 estados brasileiros, mais de 1000 travessias de rios, diferentes tipos de encostas, solos e 3 serras do mar brasileiras (PR, SC e RS). No final da campanha integral da faixa foram reclassificados 42 pontos geotécnicos existentes, registrados 31 novas ocorrências e classificadas 17 encostas monitoradas. Essa classificação segue modelo de risco geotécnico adota pela empresa transportadora, com o objetivo de priorizar serviços, mitigações e obras necessárias. No Rio Grande do Sul, as atividades de inspeção periódica de processos hidrológicos e geotécnicos ocorreu entre dezembro de 2023 e janeiro de 2024, quando o trecho foi percorrido em 45km do segmento, em trechos com histórico de ocorrências.

O conhecimento do terreno adquiridos ao longo das campanhas de inspeção mostram que a porção norte do Estado do Rio Grande do Sul, trata-se de uma área caracterizada por terrenos acidentados e suscetíveis a processos erosivos e movimentos de massa. Além de apresentar hidrografia caracterizada por talwegues que dissecam o relevo, e apresentam declividade que permitem processos hidrológicos de inundação brusca nas áreas mais acidentadas, e inundações graduais nos fundos de vales de rios de maior expressão.

Entre abril e maio de 2024, o Estado do Rio Grande do Sul enfrentou um evento climático extremo, com índices pluviométricos médios de até 500 mm e picos superiores a 1.000 mm em algumas regiões, resultando em inundações severas, erosões e deslizamentos generalizados. Esse evento catastrófico evidenciou a necessidade de reavaliar as condições geotécnicas da faixa de duto, especialmente nos trechos mais críticos.

Alinhada às diretrizes da UNDRR (2019), a gestão de riscos de desastres (GRD) prevê o monitoramento contínuo e a avaliação sistemática de ameaças e vulnerabilidades, com ênfase na prevenção de falhas e na mitigação de impactos potenciais. No caso de infraestruturas lineares, essa abordagem envolve a identificação de áreas críticas suscetíveis a processos de erosão, escorregamentos e instabilidades induzidas por eventos climáticos intensos, além do planejamento de ações preventivas para garantir a segurança da operação e o cumprimento dos requisitos regulatórios e ambientais. Nesse contexto, a gestão de riscos geotécnicos, naturais ou induzidos, ao longo de faixas de servidão de serviços essenciais é parte integrante das estratégias de integridade e continuidade operacional.

No mesmo sentido, devem ser ressaltados as preocupações decorrentes da intensificação de eventos extremos, como chuvas concentradas e movimentos de massa, que tem gerado impactos crescentes sobre ativos de transporte de gás, especialmente em regiões geotécnica e hidrologicamente sensíveis. O Relatório de Síntese do IPCC (2023) e estudos nacionais (PBMC, 2021; Marengo et al., 2020) indicam que os efeitos das mudanças climáticas já são observáveis no território brasileiro, com maior frequência de anomalias climáticas, e com isso entende-se a elevação dos riscos geotécnicos e hidrológicos, também devem ser avaliados para o contexto das infraestruturas lineares de serviços essenciais, como dutos de transporte de água, óleo, gás etc. Esses cenários reforçam a necessidade de incorporar variáveis climáticas na definição da periodicidade de inspeções geotécnicas e nos critérios para priorização de trechos críticos, fortalecendo a resiliência da malha dutoviária e de outras infraestruturas lineares frente a novas demandas ambientais.

Frente aos cenários apresentados, a equipe técnica, alinhada com as boas práticas e valendo-se dos princípios de precaução e prioridade na segurança, decidiu realizar uma nova inspeção geotécnica entre agosto e setembro de 2024, com a mesma equipe de inspeção de antes do evento extremo, cujo enfoque foram as regiões de terreno mais acidentados, destacando que a equipe operacional de técnicos responsáveis pela

integridade do empreendimento, já tivesse percorrido toda a extensão da infraestrutura, durante e imediatamente após as maiores incidências de chuva.

Neste contexto, o presente estudo apresenta os resultados de uma inspeção geológico-geotécnica realizada na faixa no Rio Grande do Sul, com ênfase nas consequências dos eventos climáticos de 2024. A pesquisa busca comparar as condições anteriores e posteriores ao evento extremo, identificar novas anomalias geotécnicas e avaliar o agravamento de ocorrências pré-existentes. Além disso, discute-se a importância de estabelecer uma periodicidade ideal para campanhas de inspeção geotécnica, considerando a crescente frequência de eventos climáticos extremos no cenário atual de mudanças climáticas, essa frequência de avaliação trata-se de um tema recorrente entre as empresas de gerenciamento desse tipo de infraestrutura linear, com objetivo de balancear as medidas e boas práticas de segurança com um assertivo equilíbrio econômico-financeiro.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO LOCAL E CONDICIONANTES DE PERIGOS GEODINÂMICOS

A contextualização local, o trecho da área de estudos se estende de Canoas à São José dos Ausentes, em direção aproximadamente NE-SW (Figura 1), cortando as unidades geológicas do nordeste do estado. Partindo do norte, a maior parte das faixas atravessa o platô e chapadão formado pelos derrames de riodacito e andesito (Unidade Caxias), e os planaltos sustentados pelos derrames basálticos (Unidade Gramado), quando se inicia a Escarpas Serranas, cortando as unidades da Bacia do Paraná, destacando a Fm. Botucatu, e seguir pelo domínio de morros suaves, pelas unidades Pirambóia e Rio do Rastro, por vezes cobertas por depósitos aluvionares, coluvionares e eluviais até o município de Canoas (Figura 2).

A partir da descrição entende-se que os perigos naturais relacionados ao contexto geológico-geomorfológico, parte de erosões, escorregamentos e rastejo na área de platôs e chapadões, com processo de solapamento de margens nas travessias de cursos d'água, passando por erosões, escorregamentos e corridas de detritos, e enxurradas na porção da escarpa serrana, e nos domínios de colinas e serras baixas destaque para processos erosivos, solapamentos de margens e escorregamentos.

A contextualização da área, também foi realizada a partir de produtos desenvolvidos, realizados entre 2004 e 2014. Destacando a elaboração de cartas geotécnicas em 2012. Nesse trabalho, com o auxílio de mapas básicos relacionados ao meio físico disponíveis na literatura (escalas regionais), juntamente com mapas temáticos (escalas regionais) elaborados no decorrer dele, como Mapa de erodibilidade, de Suscetibilidade a Movimentos de Massa, e Litoestrutural, foram desenvolvidos os Mapas de Zoneamento Geotécnico. Nesses mapas de zoneamento geotécnicos, para cada trecho da faixa foi atribuído o respectivo grau de risco, que varia entre baixo, médio controlado, médio, alto e eminente.

As informações resultantes do Mapa de Zoneamento Geotécnico apontam que o trecho que engloba todo o intervalo dentro do Rio Grande do Sul, apresentou as classes Baixa (5%), Média controlado (37%), Média (23%), Alta (13%) e eminente (22%). Assim, o trecho, quando avaliado com bases cartográficas disponíveis, de escala regional, apresenta 35% em classes maiores que a de risco médio.

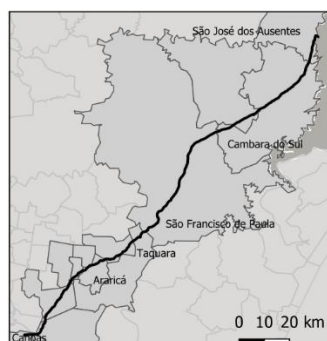


Figura 1 – Localização da área.

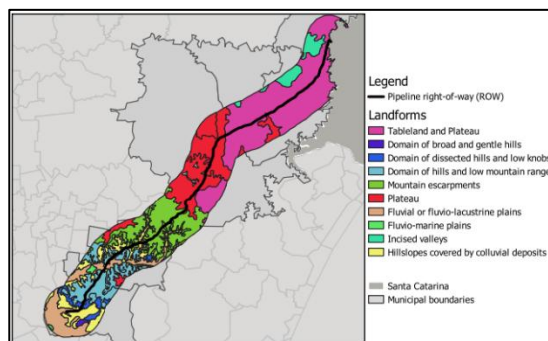


Figura 2 – Unidades geomorfológicas.

Fonte: Modificado de CPRM (2012).

3 ARRANJO METODOLÓGICO

A inspeção geológico-geotécnica consiste, essencialmente, na identificação de anomalias relacionadas à cobertura de solo ou subsolo (naturais ou por intervenção), avaliando todos os processos de instabilização (Varnes 1978), que possam comprometer a integridade da infraestrutura. Os dados obtidos durante os levantamentos de campo são registrados em fichas de campo digitais, com a utilização de aplicativo, nas quais



estão identificadas os marcos quilométricos, as ocorrências geotécnicas existentes, ocorrências geotécnicas novas, estruturas de contenção sem avaria e estrutura de contenção com avaria.

Toda as ocorrências geotécnicas são classificadas, quanto ao risco, de maneira qualitativa, dependendo da severidade dos eventos em combinação com a probabilidade desses eventos causarem danos à infraestrutura, conforme critérios de classificação estabelecidos, conforme apresentado na Tabela 1.

Também foram realizadas inspeções complementares com a utilização de Drone visando complementar os estudos em áreas com dificuldade de acesso e/ou para observação, assim como áreas que necessitem de detalhamento como subsídio para elaboração de estudos geológico-geotécnicos.

Tabela 1 - Matriz do Grau de Risco Geotécnico Qualitativo.

GRAU DE RISCO GEOTÉCNICO		PROBABILIDADE DE FALHA NO DUTO				
		Improvável	Eventual	Possível	Provável	Altamente Provável
SEVERIDADE GEOTÉCNICA	Extrema	TOL	MED	MED	ALTO	ALTO
	Alta	TOL	TOL	MED	MED	ALTO
	Moderada	ACE	TOL	TOL	MED	MED
	Reduzida	MON	ACE	ACE	TOL	TOL
	Insignificante	MON	MON	ACE	ACE	ACE

(MON = Monitorável; ACE = Aceitável; TOL = Tolerável; MED = Médio)

4 ATIVIDADES DE CAMPO

O presente trabalho envolvia inicialmente inspeção geotécnica por caminhamento em 45 km (29% do trecho) de faixa de servidão e arredores, no Estado do Rio Grande do Sul, e ainda um trecho no sul de Santa Catarina (59,5 km) de um total de 187 km. Durante essa etapa foram identificadas 04 ocorrências geotécnicas novas (no RS), relacionadas a mobilização de massa, erosões terrestres e em cursos d'água, dessas 3 foram consideradas na classe aceitável, e 1 na classe monitoramento. Esse caminhamento foi realizado entre os meses de dezembro de 2023 e janeiro de 2024. Nessa etapa ainda foram vistoriadas nos dois estados 152 ocorrências já cadastradas, cuja situação apresentou evolução em apenas 2, que saiu da situação de monitoramento agravado para risco médio.

Após os eventos extremos de chuva de abril e maio de 2024, foi constatada a necessidade de se reavaliar toda a região afetada, e assim, foram definidos 100km de caminhada em faixa de servidão e arredores apenas no estado do Rio Grande do Sul (53% do total do trecho de 187 km). Os serviços de inspeção por caminhamento foram realizados entre agosto e setembro de 2024 e focaram nas regiões de terreno mais acidentado.

Durante os trabalhos de campo após o evento foram identificadas cinco novas ocorrências geotécnicas provenientes do evento climático extremo que não constavam nos cadastros. Essas ocorrências são estritamente relacionadas a mobilização de massa, como rastejo, deslizamento e trincas, além de erosão de cursos d'água (Tabela 2). Devido a esse fator, não existem registros pretéritos dos locais afetados recentemente. Nesse sentido vale destacar, que os terrenos acidentados e formado pelos derrames, apresentam predisposição a instalação de processos de rastejo, e a expressiva pluviosidade do período acelerou os processos de rastejos, de difícil observação em campo, podendo a depender da velocidade ser considerado escorregamentos lentos (Varnes 1978). Também é importante mencionar, que 4 das ocorrências se encontram em apenas 4 km de faixa, mostrando que possivelmente ocorreu uma intensidade local do evento de chuva.

Tabela 2 – Ocorrências geotécnicas novas.

Ponto	Tipo de Ocorrência	Posição da Ocorrência	Risco atual	Município
Ponto 1	Rastejo/ Escorregamento	Faixa e Lat. Esquerda	Médio	São Francisco de Paula
Ponto 2	Escorregamento	Lateral	Aceitável	Taquara
Ponto 3	Rastejo/ Escorregamento	Lateral	Aceitável	Taquara
Ponto 4	Trinca	Faixa	Aceitável	Taquara
Ponto 5	Erosão em Travessia	Margens	Aceitável	Araricá

4.1 Ponto 1 - Escorregamento

A ocorrência do ponto 1 trata-se de escorregamento com presença de trincas na faixa, em sua porção esquerda e na lateral esquerda até próximo a estrada (distante cerca de 20m da faixa). As trincas se apresentam

predominantemente na direção longitudinal à faixa, porém algumas perpendiculares também estão presentes. O sistema de trincas, apresentou evolução na movimentação relativa, formando degraus de abatimento de dimensão centimétrica a decimétrica. Inicialmente a área apresentava rastejo incipiente, contudo, após o evento extremo, a velocidade atingiu limites de escorregamento, segundo critério de **Varnes** (1978).

4.2 Ponto 2 - Escorregamento

A ocorrência geotécnica do ponto 2 trata-se de escorregamento fora da faixa, em sua lateral leste, a uma distância entre 10 e 15m do lado leste da faixa. Devido à geologia local, relacionados aos derrames vulcânicos, ocorre apenas uma delgada camada de solo (centimétrica e decimétrica) em contato brusco com o topo rochoso, que contribui para feições de deslizamento desse tipo. As camadas de sedimento entre derrames, normalmente apresente forte fluxo horizontal de águas subterrâneas, que acarreta surgência de água na cicatriz também contribui para o desenvolvimento do processo. Novamente essa configuração parte da evolução de processos de rastejo, com aumento das velocidades devido ao aporte anormal de águas pluviais no maciço rochoso.

4.3 Ponto 3 - Rastejo/ Escorregamento

A ocorrência geotécnica do Ponto 3 trata-se de escorregamento/ rastejo fora da faixa, na lateral oeste, a cerca de 80m de distância. A cicatriz apresenta cerca de 100m de extensão, é subparalela à faixa e apresentou degrau de abatimento de até 1m nas porções mais a jusante. Nessa camada exposta fica evidente a composição do solo, predominantemente coluvionar. Solos heterogêneos e pouco consolidados como esse são suscetíveis a movimentação de massa. Novamente os efeitos da percolação de águas pluviais no maciço rochoso apresenta os efeitos de aumento de velocidade nos processos de rastejo, ocasionando escorregamentos. O que pode ser observado na figura 2.

4.4 Ponto 4 - Escorregamento

A ocorrência nova presente Ponto 4 trata-se de escorregamento em meia encosta que gerou trinca com aproximadamente 15m de extensão, transversal à faixa, com rejeito de até 0,2m. Conforme pode ser observado na figura 2.

4.5 Ponto 5 - Erosão em Travessia

A ocorrência do ponto 5 trata-se de erosão em ambas as margens de curso d'água, em seu canal e na lateral oeste da faixa. É recomendável monitorar a evolução da ocorrência e em caso de agravamento das feições erosivas, avaliar a situação e desenvolver projeto de contenção para a travessia, focando em estabilizar ambas as margens, recompor laterais da faixa, principalmente a lateral direita e o canal. A Erosão se mostrou intensa, devido ao fluxo anormal de água no local.

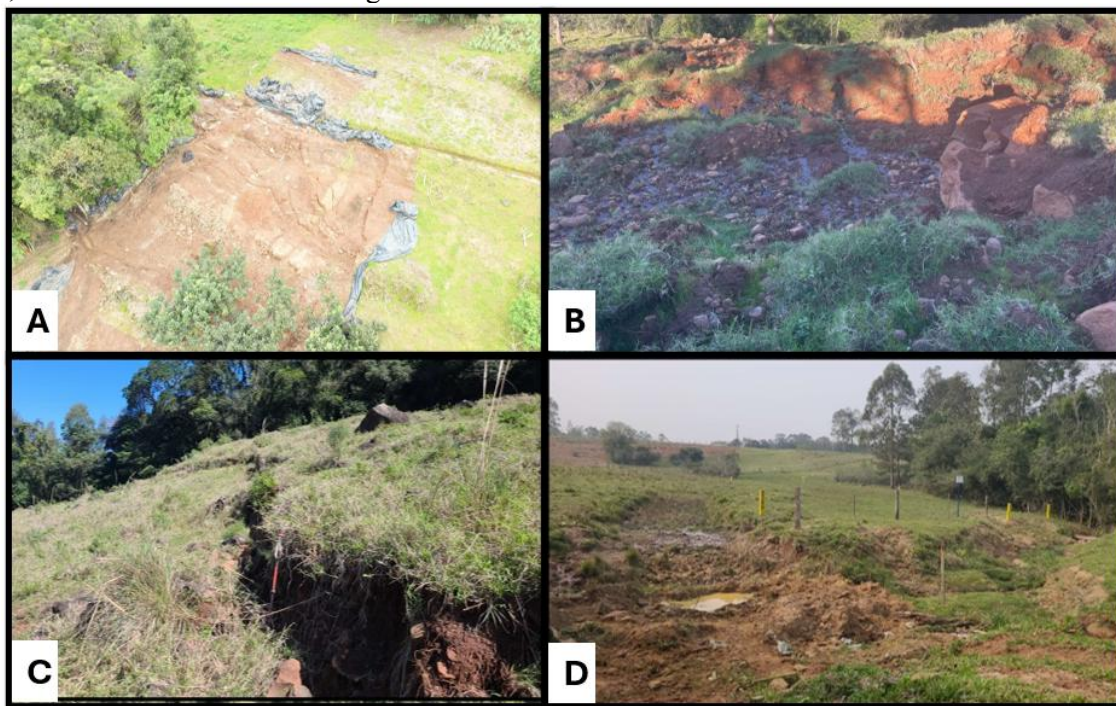


Figura 2 - A) Ponto 1 - Aceleração de rastejo com degrau e sulcos erosivos. B) Ponto 2 – Escorregamentos. C) Ponto 3 – Rastejo/escorregamento com degrau e surgência d'água. D) Ponto 5 - Processos erosivos em travessia.

5 DISCUSSÃO

A avaliação pluviométrica histórica da região sul indica que, embora eventos com precipitações pontuais acima de 300 mm sejam relativamente raros, eles não são inéditos. É possível observar que eventos com tal magnitude ocorrem ciclicamente a cada uma ou duas décadas, contudo modelos climáticos vêm apontando a tendência de aumento de frequência nos eventos extremos (Marengo et al. 2021). Tal observação reforça a importância de se estabelecer uma base de dados pluviométrica consolidada, associada a séries temporais de eventos geotécnicos, para avaliar a recorrência desses fenômenos e antecipar a necessidade de ações preventivas.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), entre os dias 27 de abril e 2 de maio de 2024, diversas cidades do estado registraram acumulados de precipitação entre 300 mm e 400 mm em apenas seis dias, valores que correspondem a quase três vezes a média histórica para o mês de maio. Em Soledade, por exemplo, o acumulado de precipitação entre 27 de abril e 31 de maio foi de 884,0 mm, sendo 773,8 mm apenas em maio. Na Figura 8 a seguir pode ser observado que a região nordeste do estado, foi severamente afetada pelas chuvas registradas entre abril e maio de 2024.

A Figura 3 demonstra que no estado do Rio Grande do Sul a área de estudo compreende uma das regiões de maior pluviosidade durante o evento climático extremo de abril e maio de 2024. O setor próximo ao Ponto 2, que compreende quatro novas ocorrências geotécnicas localizadas entre os pontos 1 e 4 nos municípios de São Francisco de Paula e Taquara, insere-se na unidade geomorfológica de transição entre os planaltos das chapadas e platôs para as escarpas serranas (Figura 3). Já a ocorrência do ponto 4, situada no município de Araricá, marca o limite inferior dessas escarpas, na transição para o domínio dos morros e serras baixas. Nesta área, o impacto se manifestou como processo erosivo nas margens de cursos d'água, coerente com as características hidrológicas da base dessas unidades, onde talvegues íngremes favorecem inundações abruptas.

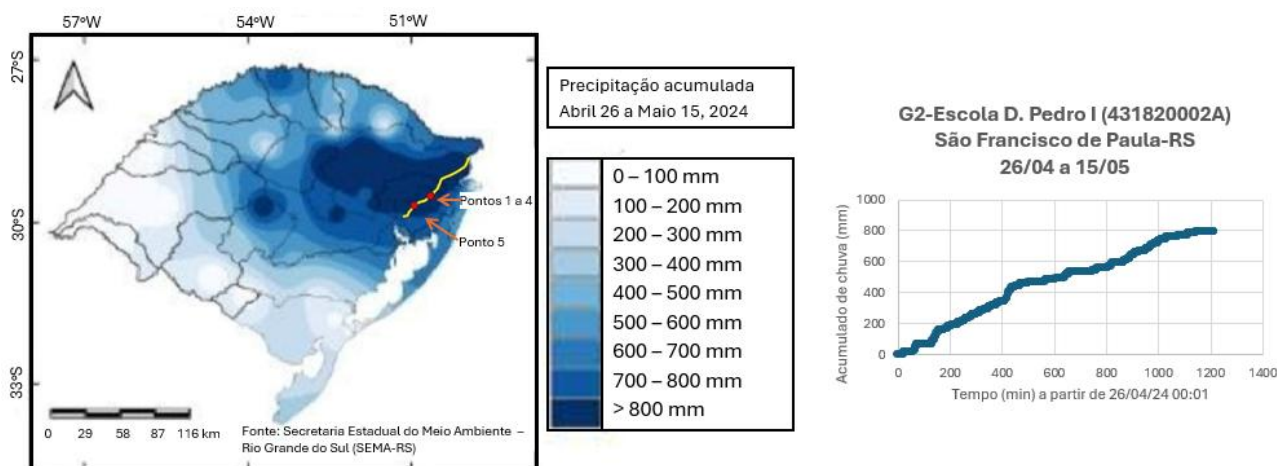


Figura 3 – Precipitação acumulada do evento extremo de maio de 2024 no Rio Grande do Sul. Em amarelo pode ser observado o trecho da faixa, e nos pontos vermelhos as ocorrências geotécnicas dos pontos 1 ao 4 e do ponto 5. A direita o gráfico de acumulado no município de São Francisco de Paula (ponto 1) [modified by UFSM (2024)].

As descrições das ocorrências revelam que os processos de rastejo, definidos por movimentos muito lentos de encostas, foram significativamente agravados pelo aporte anômalo de precipitação. Esse cenário favoreceu a deflagração de escorregamentos ou a formação de degraus de abatimento, configurando forte indício de instabilidade. A estrutura geológica local, dominada por derrames basálticos da Formação Serra Geral, favorece a circulação lateral de água subterrânea nas camadas interderrames, o que, por sua vez, condiciona pontos específicos de saturação e surgência, acelerando os movimentos gravitacionais. Essa dinâmica evidencia a relevância de mapear e monitorar áreas propensas ao rastejo, principalmente em campanhas de inspeção pós-eventos climáticos extremos.

A realização de uma nova campanha de inspeção apenas quatro meses após a anterior — motivada pelo evento climático de 2024 — permitiu a identificação de cinco novas ocorrências críticas que não estavam registradas previamente. Esse resultado evidencia que a definição da periodicidade das inspeções geológico-geotécnicas não deve seguir apenas intervalos fixos, mas considerar também a variabilidade hidrológica regional e a recorrência de extremos. A adoção de calendários rígidos pode não ser suficiente para captar os efeitos cumulativos ou repentinos das chuvas intensas sobre a estabilidade dos terrenos.



Diante disso, recomenda-se que a frequência das inspeções geotécnicas seja orientada por critérios de risco climático, incorporando a análise de variáveis como a intensidade e frequência das chuvas, a suscetibilidade do terreno — especialmente para processos de rastejo — e o histórico de instabilidades. Em áreas mais críticas, a combinação entre inspeções por caminhamento e técnicas de imageamento aéreo com drones aumenta a capacidade de diagnóstico e documentação das feições geotécnicas. Adicionalmente, ferramentas de sensoriamento remoto baseadas em interferometria de radar (InSAR) podem oferecer dados contínuos sobre movimentações lentas, especialmente relevantes para a detecção de processos iniciais de instabilidade em maciços rochosos.

Apesar da importância do tema, não existe atualmente uma norma técnica ou regulamentação que estabeleça uma frequência única e obrigatória para inspeções geotécnicas em dutos. A literatura internacional indica que essa periodicidade deve considerar múltiplos fatores, como características geotécnicas locais, exposição a eventos extremos, histórico de falhas e relevância operacional dos ativos. Estudos como o de **Silva et al. (2024)**, com base em análises históricas de falhas em dutos dos Estados Unidos, mostram que a maioria das inspeções obrigatórias está relacionada a riscos de corrosão, com intervalos de até 10 anos. No entanto, essa abordagem não abrange adequadamente os riscos geotécnicos, que frequentemente são abruptos e imprevisíveis em contextos de vulnerabilidade climática.

Além disso, a abordagem baseada em risco defendida por **Wang et al. (2021)** para a integridade de dutos propõe que a frequência de inspeção seja definida com base em avaliações contínuas, considerando fatores como suscetibilidade a movimentos de massa, solos expansivos, atividade sísmica e mudanças climáticas. No presente caso, a análise de predisposição geotécnica revela que as ocorrências mais críticas se concentraram nas unidades de transição entre planaltos e escarpas serranas, mesmo que outras regiões tenham registrado volumes de chuva superiores a 800 mm.

Estudos clássicos de correlação entre precipitação e escorregamentos (**Guidicini & Iwasa, 1976**) e pesquisas subsequentes sobre Coeficientes de Precipitação Crítica (**Tatizana et al., 1987; Fernandez et al., 2018, 2022**) apontam que a definição de limiares de alerta deve considerar não apenas o volume acumulado, mas os picos de intensidade da chuva. Essa abordagem é especialmente relevante em empreendimentos lineares, como dutos e rodovias, onde o uso de dados pluviográficos permite o desenvolvimento de protocolos de monitoramento sensíveis à dinâmica local das chuvas e seus efeitos sobre a estabilidade do solo.

Nesse contexto, importante destacar a maneira da incidência da precipitação, na Figura 8 o gráfico da direita mostra que o acumulado de chuva teve um aumento gradual, com poucos episódios de inflexões positivas na curva, que representam episódios de intensidade de chuva, situação deflagradora de eventos. Assim, nessa região do estado da faixa inspecionada, mesmo com grandes acumulados de chuva as situações de deflagração de escorregamentos podem não ter sido atingido, mantendo um coeficiente de precipitação crítica relativamente menor do que outras regiões do estado (e.g. região de Bento Gonçalves e Caxias do Sul), que no mesmo episódio mostraram registros generalizados de escorregamentos.

Nessa situação, de altos acumulados de chuvas, sem atingir CPC para deflagração dos escorregamentos generalizados, espera-se que se acentue os movimentos lentos do solo (rastejo/escorregamento lento), solapamentos das margens de cursos d'água, além de intensos processos erosivos ocasionados pelo aumento expressivo das vazões nos cursos d'água.

6 CONCLUSÃO

O estudo mostrou que eventos extremos podem deflagrar riscos geotécnicos, a partir de processos incipientes instalados (e.g. rastejos ou erosões em fases iniciais), ou mesmo desencadear processos de riscos geotécnicos em situações em que nenhum indício de movimentação tenha sido instalado, contudo apenas em áreas suscetíveis, como a vistoria evidenciou que áreas de menor suscetibilidade relacionado aos platôs e chapadas não apresentaram novas patologias, mesmo sob acumulado de chuvas intensas, ponderado pela maneira que as chuvas ocorreram localmente, quando observado o comportamento da intensidade e acumulado de chuvas.

Portanto, recomenda-se que os operadores de infraestruturas lineares adotem uma estratégia de inspeção geotécnica baseada em zoneamento dos riscos, a partir do entendimento da suscetibilidade aos processos e como afetam fragilidades que causam danos, avaliando a magnitude dos eventos de acordo com limiares de chuvas e nível de atingimento de cheias, para que a partir desse zoneamento, se estabeleça frequências ideais de inspeções ajustando a frequência das campanhas de acordo com as condições específicas de cada trecho. Avaliações de danos e consequências, bem como a análise dos custos das intervenções geotécnicas, quando os processos são identificados em fases iniciais de instalação, comparadas com as situações mais agravadas do



2025

processo, também devem fazer parte da tomada de decisões na busca de tecnologias de monitoramento contínuo, como sensoriamento remoto, uso de drones, análise de pluviômetros automáticos e análises preditivas, para detectar precocemente possíveis instabilidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Brasil. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. (2012). *Mapa de geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul: escala 1:750.000* [Mapa e CD-ROM]. CPRM. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/15672>
- 2 - Fernandez, G. N., Alves, F. M., Modesto, A. A. L., & Pissato, E. (2018). Análise espacial e temporal de escorregamentos em São Bernardo do Campo, SP (1993–2016). In *16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*. São Paulo, Brasil.
- 3 - Fernandez, G. N., Simões, P. M., Alves, F. M., Patuci, T. R. C., Ferreira, C. J., & Kertzman, F. F. (2022). Definição de coeficientes de precipitação crítica (CPC) para emissão de alertas de escorregamento nas rodovias SP-055 e SP-098, Litoral Norte Paulista. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)*, 12, 21–32.
- 4 - Guidicini, G., & Iwasa, O. Y. (1976). *Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido* (Vol. 1). Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).
- 5 - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- 6 - Marengo, J. A., Rodrigues-Filho, S., & Santos, D. V. (2020). Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Brazil: An integrated approach. *Sustentabilidade em Debate*, 11(3), 89–102. <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/35624>
- 7 - Marengo, J. A., Camarinha, P. I., Alves, L. M., Diniz, F., & Betts, R. A. (2021). Extreme rainfall and hydro-geo-meteorological disaster risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C global warming scenarios: An analysis for Brazil. *Frontiers in Climate*, 3, 610433. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433>
- 8 - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMCI). (2015). *Relatório de avaliação nacional sobre mudanças climáticas: Volume 2 – Impactos, vulnerabilidades e adaptação*. PBMCI. https://www.pbmc.coppe.ufri.br/documentos/RAN1_vol2.pdf
- 9 - Silva, A., Evangelista, L., Ferreira, C., et al. (2024). Towards resilient pipeline infrastructure: Lessons learned from failure analysis. *Discover Applied Sciences*, 6, 585. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06273-7>
- 10 - Tatizana, C. O., Ogura, A. T., Cerri, L. E. S., & Rocha, M. C. M. (1987). Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos: Serra do Mar, município de Cubatão. In *V Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia* (Vol. 2, pp. 225–236). ABGE.
- 11 - Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.). *Landslides: analysis and control (Special report 176)*. (pp. 11-33). National Research Council.
- 12 - Wang, Y., Wu, Y., Duan, Y., Wang, S., Xu, L., & Wang, Y. (2021). Risk-based pipeline integrity management: A road map for the future. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 1(1), 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.02.001>
- 13 - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). (2024). *Boletim climático: Precipitação entre os dias 26 de abril a 15 de maio de 2024 para o Rio Grande do Sul*. <https://ufsm.br/r-377-11566>
- 14 - United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction 2019*. <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2019>