

Artigo de Pesquisa**DADOS GRATUITOS DE SENSORIAMENTO REMOTO COMO RECURSO PARA GERAÇÃO DE UM MODELO DE SUSCETIBILIDADE AO RISCO À EROÇÃO: APLICAÇÃO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA.****Free remote sensing data as a resource for generating a model of susceptibility to erosion risk: application in an energy transmission line.**

Julia Cucco Dalri¹, Francisco Henrique de Oliveira², Ildegardis Bertol³, Hypolito Suarez Fernandez⁴, Jéssica Gerente⁵, Francisco Caruso Gomes Junior⁶, Guilherme Marchiori⁷

¹ Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental. Florianópolis, Brasil. juliacucco@yahoo.com.br

 <https://orcid.org/0000-0003-4237-8880>

² Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental. Florianópolis, Brasil. francisco.oliveira@udesc.br

 <https://orcid.org/0000-0001-5884-5215>

³ Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Solos, Lages, Brasil. ildegardis.bertol@udesc.br

 <https://orcid.org/0000-0003-4396-5382>

⁴ Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental. Florianópolis, Brasil. hypolito.fernandez@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-8202-197X>

⁵ GISCARUSO Tecnologia & Inteligência Geográfica. Florianópolis, Brasil. jessicagerente@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5286-6584>

⁶ GISCARUSO Tecnologia & Inteligência Geográfica. Florianópolis, Brasil. caruso@carusojrea.com.br

 <https://orcid.org/0009-0000-7463-6608>

⁷ Companhia Paulista de Força e Luz. São Paulo, Brasil. guilherme.marchiori@cpfl.com.br

 <https://orcid.org/0000-0002-7910-9644>

Recebido em 07/04/2023 e aceito em 13/12/2024

RESUMO: A instalação de Linhas de transmissão (LT) provoca perturbações no ambiente, que reage de diferentes formas. A supressão de vegetação, ainda que limitada ao necessário para execução do projeto, pode desencadear processos erosivos. Insumos espacializados têm tornado viável o acompanhamento de grandes extensões de terra. Dados da constelação GPM (*Global Precipitation Measurement*) permitem acessar dados de chuva mesmo em áreas onde não se dispõe de estações pluviométricas. Também por satélite, o relevo pode ser representado a partir imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Com a mesma premissa, obtém-se os mapas de erodibilidade do solo e de uso da terra, necessários para em conjunto, sugerir o diagnóstico de suscetibilidade ao risco de erosão. Com esta finalidade, desenvolveu-se metodologicamente uma lógica em que os dados de entrada são obtidos gratuitamente atendendo um modelo conceitual, que define as variáveis e suas relações frente ao potencial problema, com vistas a uma acessível replicação. A metodologia espelha uma avaliação que potencializará o risco à medida que chuvas ocorram com base em suas características.

Palavras-chave: Geotecnologia; Erosão; Álgebra de mapa; Análise hierárquica.

ABSTRACT: The energy Transmission Lines (TL) causes disturbances in the environment, which reacts in different ways. The suppression of vegetation, even if limited to what is necessary to execute the project, can trigger erosion processes. Spatialized inputs have made it viable to monitor large areas of land. Data from the GPM (*Global Precipitation Measurement*) constellation allows access to rainfall data even in areas where there are no rainfall stations. Also via satellite, the relief can be represented using SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) images. With the same premise, soil erodibility and land use maps are obtained, necessary to jointly suggest the diagnosis of susceptibility to the risk of erosion. For this purpose, a logic was methodologically developed in which the input data is obtained free of charge according to a conceptual model, which defines the variables and their relationships in relation to the potential problem, with a view to an accessible replication. The methodology mirrors an assessment that will increase the risk as rain occurs based on its characteristics.

Keywords: Geotechnology; Erosion; Map Algebra; Hierarchic Analysis.

RESUMEN: La instalación de Líneas de Transmisión (LT) provoca perturbaciones en el medio ambiente, el cual reacciona de diferentes formas. La supresión de la vegetación, aunque se limite a lo necesario para la ejecución del proyecto, puede desencadenar procesos de erosión. Las entradas espacializadas han hecho factible el monitoreo de grandes extensiones de tierra. Los datos de la constelación GPM (*Global Precipitation Measurement*) permiten el acceso a los datos de lluvia incluso en áreas donde las estaciones de lluvia no están disponibles. También por satélite, el relieve se puede representar a partir de imágenes SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Con la misma premisa se obtienen mapas de erosionabilidad del suelo y uso del suelo, necesarios para sugerir conjuntamente el diagnóstico de susceptibilidad al riesgo de erosión. Para ello, se desarrolló metodológicamente una lógica en la que los datos de entrada se obtienen de forma gratuita, siguiendo un modelo conceptual, que define las variables y sus relaciones con el problema potencial, con miras a una replicación accesible. La metodología refleja una evaluación que aumentará el riesgo a medida que ocurran las lluvias en función de sus características.

Palabras clave: Geotecnología; Erosión; Álgebra de Mapas; Análisis Jerárquico.

INTRODUÇÃO

O traçado de uma Linha de Transmissão (LT) é constituído por estruturas físicas compostas por torres e cabos que perpassa por distintas paisagens, em longas distâncias.

Ao longo da LT normalmente ocorre expressiva variação nas condições naturais do terreno (Li et al., 2021b), com diferentes tipos de solo, formas de relevo e espécies de vegetação (Li et al., 2021b).

Embora a erosão decorra de um processo natural, as atividades antrópicas potencializam sua magnitude (PARVEEN, 2012). A instalação de uma LT impacta o ambiente (CHUNXIA et al., 2021). O tráfego de veículos no período de implantação torna o solo vulnerável e intensifica sua degradação (SILVA et al., 2019).

Monitorar o local unicamente baseado em observações de campo é um processo moroso e não rentável (DISSANAYAKE et al., 2019). Modelos de simulação de cenários têm sido utilizados como alternativa para avaliar o risco de erosão do solo em áreas que demandem acompanhamento constante.

Nesse caso, aplicar técnicas de sensoriamento remoto para obtenção de dados geográficos pode contribuir e facilitar o monitoramento do risco de erosão. A aquisição de insumos desta forma amplia as possibilidades e tem se tornando viável em demandas de menor escala (BAGWAN E GAVALI, 2021), aplicável nos longos trechos de uma LT.

A sugestão de metodologias simplificadas que resultem em modelos preditivos embasados em dados gratuitos podem contribuir para ampla aplicação em áreas expostas a erosão (LENSE et al., 2021).

Há consenso que alguns fatores são considerados primordiais para determinação de perda de solo em nível internacional, sendo eles: erosividade da chuva; erodibilidade do solo; comprimento do declive; grau de declividade; uso e manejo do solo; e prática conservacionista.

Estes fatores foram organizados em um modelo empírico desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978) chamado Equação Universal de Perdas de Solo (EUSP ou USLE, sigla para *Universal Soil Loss Equation*).

Silva et al. (1997) apontam que a obtenção dos dados para aplicação da USLE é extremamente morosa, e dependente entre outros, de dados de precipitação determinados em campo, registrados em pluviógrafos, que em muitos locais não existem.

Partindo-se deste pressuposto, buscam-se outras formas para obtenção dos fatores que influenciam o desencadeamento de erosão prezando pelo acesso aos insumos de sensoriamento remoto baseado em técnicas de geoprocessamento.

Na presente proposição são trazidas opções de aquisição gratuita para a entrada de dados, aliando maior frequência de registro e dinamicidade de atualização para se aproximar do potencial erosivo das chuvas.

Busca-se estabelecer a ampliação da aplicação da ciência pelo alcance global dos dados – principalmente os relacionados aos volumes de chuvas – principal agente erosivo.

Objetiva-se que a proposição metodológica integre dados de entrada de forma simplificada e que favoreça sua replicação, resultando em um material diagnóstico que apoie a mitigação, quando constatado risco à erosão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na metodologia de predição do risco à erosão foram considerados os fatores: chuva precipitada nas últimas 2 horas; e chuva acumulada, que compõem os fatores dinâmicos, e erodibilidade do solo; uso da terra; e topografia do terreno, que representam os fatores estáticos.

Os dados de precipitação foram obtidos pelos sensores do satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*) que são administrados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), para monitorar e registrar os volumes de chuva em milímetros (mm).

O padrão das chuvas foi considerado como fator dinâmico na pesquisa se dividindo em dois fatores: as chuvas recentes (2 h) fundamentais para construir o potencial erosivo em tempo quase-real, e as chuvas acumuladas (24 h, 96 h, 360 h), para exprimir a saturação de água do solo.

Cada classe de cada fator recebeu um valor denominado “peso”. Os menores pesos representam classes com menor suscetibilidade à erosão, enquanto maiores pesos representam classes com maior suscetibilidade à erosão para cada um dos fatores considerados.

Para o fator chuvas recentes, foi necessário correlacionar os pesos em função dos volumes observados em 2 horas.

Neste caso, as chuvas menores que 10 mm neste intervalo foram consideradas nulas, uma vez que Silva et al. (1997) concluíram se tratar de volume sem potencial erosivo.

Projetou-se a mesma condição não-erosiva para os outros volumes nas demais variáveis que envolvem a precipitação.

A atribuição empírica dos pesos foi sugerida pelos envolvidos na pesquisa, com base no conhecimento teórico e técnico, uma vez que da forma como sugerida, não é possível obter valores específicos sobre a chuva (em termos de tamanho de gota e intensidade).

Ainda assim, considerando o tempo avaliado e o volume precipitado neste período, os pesos aproximam um registro do que pode ser significativo para o desencadeamento de erosão.

Em relação aos dados estáticos, especificamente para erodibilidade, utilizou-se o Mapa elaborado pela Embrapa. O arquivo está disponível na escala 1:250.000 em formato vetorial e foi convertido para o formato matricial respeitando as classes originais do produto.

Segundo Embrapa (2020) este mapeamento é baseado na interpretação dos solos nas unidades do Mapa de Solos elaborado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

No fator erodibilidade o peso mais baixo foi atribuído à classe chamada “Muito baixa erodibilidade” pela Embrapa, ou seja, mais resistente ao desencadeamento de um processo erosivo. No outro extremo, o maior peso foi atribuído à classe “Fase erodida”, onde, pela Embrapa, já existem erosões.

Em relação ao uso e cobertura da terra, que representa outro fator estático da metodologia, foi utilizado o mapeamento prévio da Iniciativa MapBiomass (Coleção 6), que classifica o território nacional a partir de imagens Landsat com resolução espacial de 30 metros.

O mapa estabelece classes naturais e antrópicas que foram mapeadas para aplicação em escala de até 1:100.000 já em formato matricial.

No caso deste fator, as classes determinadas pelo MapBiomass foram agrupadas de acordo com a suscetibilidade que representavam, pois quanto mais protegida a terra, como é o caso das áreas já alagadas ou vegetadas com florestas, menor o peso atribuído. Na outra ponta, as classes mais desprotegidas receberam o maior peso, pois estão mais suscetíveis à erosão.

O agrupamento das classes foi realizado pela similaridade na avaliação de suscetibilidade e para que não se extrapolasse o número de classes de outros fatores.

Para obter os dados de relevo, que compõe o fator topografia, utilizou-se o MDT (Modelo Digital de Terreno) gerado via imageamento SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

O MDT serviu para elaborar o mapa de declividade e para delimitar a bacia hidrográfica e a drenagem da área de interesse. Os resultados são os obtidos pelas equações de Bertoni e Lombardi Neto (2008)

A metodologia proposta pelos autores atribui valores adimensionais para representar a topografia de determinada área.

Esses valores adimensionais são obtidos por meio de equações realizadas com os produtos resultantes do processamento das imagens SRTM e foram agrupados de acordo com a proposta dos citados autores.

Concluída a aquisição dos insumos para aplicação da metodologia, todos obtidos de forma remota e sem custos, aplicou-se valores numéricos chamados peso para representar as classes com maior ou menor suscetibilidade à erosão.

Os valores utilizados obedeceram a sequência de Fibonacci, que se inicia em 1, segue para o 2, sendo o valor seguinte o resultante da soma dos dois últimos, neste caso 3, sendo o seguinte 5 (resultante da soma do 2 e do 3), assim sucessivamente. O peso 0 foi atribuído às classes nulas do ponto de vista do risco a erosão.

Os pesos desta sequência foram empregados de maneira distinta para cada um dos fatores, ou seja, nem todos iniciaram do peso 1.

Seguiu-se uma lógica empírica onde se presumiu que o menor grau de risco à erosão de determinado fator pode ter maior relevância que a classe de menor grau de risco de outro. A distribuição dos pesos atribuídos está representada na .

Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição dos pesos em função os fatores considerados.

Fatores Dinâmicos				Fatores Estáticos			
Acumulado de chuva em 24 horas	Acumulado de chuva em 96 horas	Acumulado de chuva em 360 horas	Chuva precipitada nas últimas 2 horas	Peso	Erodibilidade	Uso da terra	Topografia
<10 mm	< 40 mm	< 70 mm	< 10 mm	0			
				1			<1
		Entre 70 e 140 mm		2			1 a 5
	Entre 40 e 60 mm	Entre 140 e 210 mm		3		Floresta	5 a 10
Entre 10 e 25 mm	Entre 60 e 90 mm	Entre 210 e 280 mm		5	Muito baixa	Lavoura perene	10 a 20
Entre 25 e 40 mm	Entre 90 e 140 mm	Entre 280 e 350 mm		8	Baixa	Agricultura	>20
Entre 40 e 55 mm	Entre 140 e 200 mm	> 350 mm		13	Média	Cana de açúcar	
Entre 55 e 85 mm	> 200 mm		Entre 10 e 20 mm	21	Alta	Rochas	
Entre 85 e 115 mm			Entre 20 e 40 mm	34	Muito alta	Soja ou Arroz	
Entre 115 e 150 mm			Entre 40 e 70 mm	55	Fase erodida	Mineração	
> 150 mm			Entre 70 e 110 mm	89			
			> 110 mm	144			

Fonte: Autores, 2022.

As etapas realizadas apoiaram-se principalmente no programa ArcMap versão 10.5.1 da ESRI. A ferramenta da *ArcToolBox Reclassify* permitiu que os pesos estabelecidos fossem vinculados aos *pixels* dos respectivos arquivos matriciais.

A plataforma R também foi utilizada para converter via linguagem de programação os dados IMERG fornecidos pelo GPM, que vêm em formato RT-H5. Este formato não é facilmente lido no ArcMap e por isso coube convertê-lo para o formato .GeoTIFF.

Utilizou-se ainda o programa QGIS para ações de processamento do fator topografia pela facilidade de execução em algumas rotinas computacionais.

Todos os arquivos matriciais foram recortados em função da área de interesse para otimizar o tempo de resposta dos processos realizados.

Com os respectivos pesos atribuídos aos *pixels* dos arquivos matriciais, passou-se a buscar uma forma de representar como estes se relacionam entre si, pois determinado uso da terra, por exemplo, pode impactar na erodibilidade dos solos (Dedecek, 1989), ficando clara a representatividade não uniforme entre estes fatores para o desencadeamento das erosões.

Esta condição pode ser expressa em forma de hierarquia, onde se destacam em valores os fatores mais relevantes em detrimento daqueles que sozinhos não são determinantes para estabelecer a degradação.

Neste caso, pressupõe-se que além dos volumes de chuva, a cobertura do solo é fundamental para acelerar ou minimizar os efeitos da erosão no solo (DEVÁTY *et al.*, 2019; LENSE *et al.*, 2021), cabendo por isso atenção na construção da metodologia para que ambos sejam preponderantes em algum grau em relação aos demais.

Para expressar esta relação de importância foram aplicados valores hierárquicos definidos por *Analytic Hierarchy Process* (AHP). A preferência pela aplicação do método AHP se justifica por envolver valores subjetivos e objetivos na tomada de decisão (KARA; SHUAIBU, 2019).

O fator Uso da terra foi considerado o mais representativo, com 34% de importância no modelo, pois entende-se que as condições de cobertura são determinantes para o risco, tanto por praticamente anular o efeito erosivo quando se trata de uma área densamente vegetada, quanto por acelerar a dinâmica nos casos de ausência de cobertura vegetal.

O fator Chuva teve 29% de importância, seguido do fator Acumulado de chuva com 15%. Com menor representatividade foram considerados os fatores Erodibilidade e Topografia, com 11% cada.

É importante considerar que o fator Acumulado de chuva é composto por três variáveis (24 h, 96 h e 360 h), as quais foram atribuídos valores hierárquicos prévios para classificar a importância entre eles, respectivamente 74%, 20% e 6%.

Esses valores foram multiplicados no arquivo matricial de cada variável e em seguida, após serem somados, formaram um único produto que representa o fator Acumulado de chuva.

Ao se obter um único arquivo matricial para fator Acumulado de chuva ele está pronto para receber a hierarquia determinada no conjunto (11%).

Os processos algébricos foram realizados por meio da ferramenta Raster Calculator do programa ArcMap versão 10.5.1, utilizando-se os operadores multiplicação para relacionar o valor hierárquico, e a soma para congregar as camadas de cada fator.

Cumpridas tais etapas: aquisição dos arquivos, aplicação de pesos, processamento algébrico com a hierarquia AHP e somatório entre as camadas finais, obtém-se um único produto. O detalhamento da metodologia aplicada segue indicada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.1.**

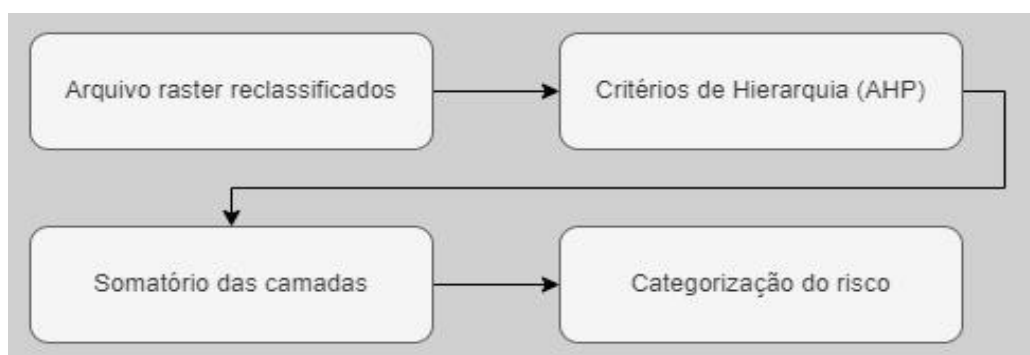


Figura 1. Fluxograma indicando as etapas envolvidas na metodologia proposta e a classificação final de risco. Fonte: Autores, 2022.

A escala de categorização ao risco à erosão nesta etapa da metodologia foi pensada para manter o intervalo de cinco classes, assim como a já citada publicação de Valladares et al. (2012). Os trabalhos de Caldas, Silva e Santos (2019) também utilizaram metodologia semelhante no contexto de erosão atribuindo e notas para cada classe em que foram divididas a variáveis.

O somatório das camadas, que nesta altura estavam todas em formato matricial - onde cada pixel assumiu os pesos específicos - resultou em um único produto para representar o risco ao desenvolvimento de erosões, sendo importante categorizar o risco para facilitar a interpretação dos resultados.

Os valores de pixel ≤ 10 indicam áreas com risco raro ao desenvolvimento de processo erosivo. O risco baixo é estabelecido para valores de pixel entre 11 e 20.

O risco possível é atribuído para valores de pixel entre 21 e 35. O risco provável corresponde ao intervalo de valores de pixel entre 36 e 50, e o risco quase certo é determinado pelos valores de pixel > 50 . A .

Tabela 2 apresenta os intervalos e os termos para representar a categorização do risco.

Tabela 2. Categorização do risco em função dos valores do modelo final.

Até 10	De 10 a 20	De 21 a 35	De 36 a 50	Acima de 50
Raro	Baixo	Possível	Provável	Quase certo

Fonte: Autores, 2022.

Com a metodologia estabelecida, buscou-se uma Linha de Transmissão (LT) piloto para avaliar os resultados obtidos. A LT escolhida tem cerca de 16 km de extensão, opera em 138 kV e está localizada no noroeste do estado de Minas Gerais, próximo da divisa com o estado de Goiás. No traçado, que está inteiramente no bioma Cerrado, existem 43 torres. Toda a estrutura e distribuição de energia é de responsabilidade da Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL.

No mapa resultando, apontam-se os locais que – em função do arranjo de condições físicas combinado aos volumes de chuva ocorrido, demandam maior atenção das equipes de campo para contenção dos pontos que indicam maior chances para o desencadeamento do processo

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo gerado de acordo com a metodologia está apresentado na Figura 2. O produto destaca a classificação de risco encontrada para a LT piloto.

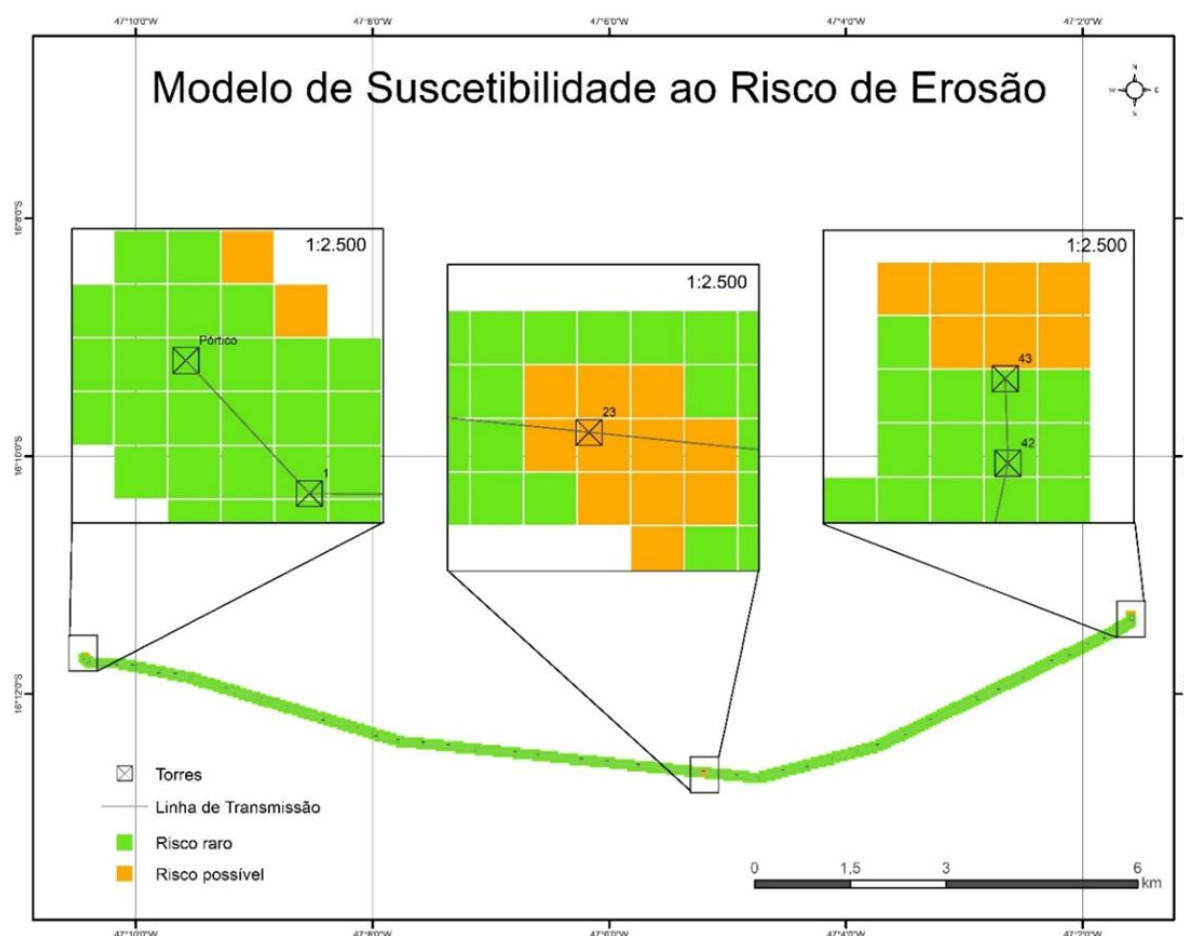


Figura 2. Mapa de risco à erosão do solo. Os três destaques apresentam as áreas classificadas com risco “possível”. Fonte: Autores, 2022.

A possibilidade de atualização do modelo, correlacionada com os dados referentes aos volumes de precipitação sem ônus na sua aquisição, assegura uma resposta próxima a situação real, mesmo ao se apoiar em insumos adquiridos de forma remota.

A metodologia proposta possibilitou a sugestão de dados de entrada para o modelo, com o intuito de orientar a antecipação diante de um potencial foco de degradação e determinar as condições de risco relacionadas à suscetibilidade de processos erosivos, considerando um conjunto de fatores. Entre os fatores dinâmicos, destaca-se a notável contribuição dos dados quase em tempo real relativo aos eventos de precipitação provenientes da constelação do Global Precipitation Measurement (GPM).

No período analisado, não houve ocorrência de precipitação; no entanto, os satélites pertencentes à constelação do Global Precipitation Measurement (GPM) disponibilizam produtos que possibilitam a investigação pormenorizada das

precipitações ao longo de dias, estações e anos, atendendo a diversas demandas de estudo, conforme preconizado por Kirschbaum et al. (2017).

A frequente aquisição de registros pelos sensores orbitais de precipitação assegura a atualização do modelo sempre que as condições meteorológicas indicarem a necessidade de um acompanhamento minucioso. Esta abordagem emerge como uma alternativa viável para regiões carentes de registros precisos de precipitação, decorrente da limitada densidade de pluviômetros e radares, conforme destacado por Skofronick-Jackson et al. (2017).

A disponibilidade de dados abrangentes e gratuitos revela-se como uma vantagem significativa, abarcando inclusive os fatores estáticos considerados no arcabouço metodológico proposto.

Em contextos nos quais há escassez de dados detalhados, uma característica predominante no território brasileiro, modelos que operam com um número reduzido de informações respondem eficazmente à entrada de dados em escalas mais abrangentes, como discutido por Lense et al. (2021).

As pesquisas conduzidas por Souza Filho (2019) destacaram a viabilidade da utilização de dados provenientes de mapeamentos elaborados por entidades públicas ou sem fins lucrativos. Essa abordagem assemelha-se à adotada na metodologia ao empregar os produtos do MapBiomas e da Embrapa para estabelecer as classes relativas ao Uso da Terra e à Erodibilidade, respectivamente.

O mapeamento realizado pelo MapBiomas desempenhou um papel crucial no método proposto, uma vez que a representação do fator Uso da Terra é preponderante em relação aos demais, conforme evidenciado na hierarquia aplicada.

Quanto aos insumos necessários para calcular o fator Topografia, estudos como o de Li et al. (2021a) indicaram resultados positivos com Modelos Digitais de Terreno gerados pelo imageamento SRTM com uma resolução espacial de 30 metros. A presente proposta optou por esse mesmo produto devido à sua gratuidade, cobertura global mais abrangente e menor exigência computacional.

Todos os fatores, direta ou indiretamente, foram obtidos por meio de análises subsidiadas por satélites. Apesar da limitação de escala, os dados de entrada utilizados para alimentar o modelo metodológico proposto são acessíveis de forma gratuita, condição que promove a disseminação irrestrita da aplicação, requerendo apenas conhecimento técnico para sua replicação.

Ao propor uma metodologia com uma quantidade reduzida de dados de entrada, os quais apresentam informações em escalas mais abrangentes, é imperativo que haja uma maior integração e otimização das variáveis. Este requisito se faz necessário para que o modelo resultante possa refletir de maneira mais precisa as condições reais de risco à erosão.

Os resultados obtidos durante períodos sem ocorrência significativa de chuva, e consequentemente sem alterações pelos fatores dinâmicos, destacaram a marcante influência do uso da terra na classificação do risco à erosão. Nesse contexto, os valores de risco à erosão do solo para toda a área de terra serão uniformes durante o período em que não há registro de chuva, refletindo as condições estáticas da região de interesse.

Conforme antecipado, a concepção da metodologia reforçou a importância da vegetação, ou sua ausência, como um dado fundamental para os modelos destinados à análise de metodologias de risco à erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008; DEVÁTÝ et al., 2019; LENSE et al., 2021), corroborando a relevância desse elemento na assertividade dos modelos.

O acompanhamento das condições in loco e a confrontação sistemática dos resultados obtidos são essenciais para o aprimoramento contínuo do modelo, especialmente considerando que, devido à atual pandemia, as deslocamentos físicos foram desconsideradas no processo de construção da metodologia.

Embora não se caracterize como uma degradação abrupta em termos de iminência, a erosão, se não mitigada oportunamente, possui o potencial efetivo de desestabilizar as estruturas físicas do sistema, incluindo torres ou subestações, resultando em prejuízos significativos ao seu funcionamento e afetando todos os stakeholders dependentes do sistema.

A disposição de um modelo suscetível a atualizações em tempo quase real, alimentado por insumos gratuitos, apresenta-se como uma ferramenta vantajosa para o monitoramento contínuo dos cenários, especialmente em situações de chuvas frequentes, adquirindo uma natureza orientativa. O referido modelo tem a capacidade de apoiar in loco às equipes de manutenção, direcionando a atenção para os pontos mais suscetíveis às manifestações erosivas, contribuindo assim para uma abordagem mais eficaz e proativa na gestão do tema erosão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude da supressão da cobertura vegetal necessária para a instalação e das restrições para a manutenção durante a operação, as Linhas de Transmissão (LTs) constituem uma infraestrutura com potencial impacto negativo em ambientes sensíveis à degradação do solo. A proximidade das erosões em relação às torres pode causar danos estruturais, expondo a cadeia de transmissão a riscos decorrentes da instabilidade do solo.

O estudo apresenta uma metodologia que busca contribuir para a avaliação do risco associado ao desenvolvimento de erosões, utilizando fatores reconhecidamente relevantes, mas de forma simplificada, visando facilitar a replicação do método. A

proposta metodológica valoriza insumos espacializados, atualizáveis e gratuitos, incorporando empiricamente pesos e hierarquias aos fatores dinâmicos e estáticos.

Os resultados obtidos indicam que um risco é estabelecido em relação ao conjunto de fatores estáticos, sendo potencializado à medida que os fatores dinâmicos são incorporados: volumes de chuva precipitados no período observado e volumes acumulados nos dias anteriores ao evento em análise. Essa abordagem proporciona insights sobre a dinâmica do risco associado à erosão em ambientes impactados por Linhas de Transmissão.

A inovação da proposta torna-se proeminente, destacando-se, entre outros aspectos, pela utilização de dados provenientes da constelação GPM. Esta constelação registra continuamente os volumes de chuvas precipitados em escala global, disponibilizando esses dados de forma gratuita.

O estudo e o princípio metodológico apresentados são estruturados em uma condição de avaliação macro da área de interesse, representando o primeiro procedimento iterativo para a avaliação da suscetibilidade a processos erosivos. Após a obtenção da resposta inicial, torna-se imperativo realizar o levantamento de dados e uma análise pontual em escala detalhada do local para atualizar a suscetibilidade à erosão.

A validação in loco assume importância significativa, pois ela pode indicar a necessidade de atualizações à medida que os comparativos de campo são vinculados aos resultados apresentados pelo modelo. A proposta, por sua vez, é flexível para aceitar adaptações na metodologia, visando aproximá-la das condições reais de risco à erosão aplicáveis a diversas situações e biomas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL Energia e à Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel pelo financiamento da pesquisa por meio do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento PD-00063-3075/2020.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Julia Cucco Dalri dedicou-se à escrita do artigo, orientada pelo Prof. Francisco Henrique de Oliveira. Prof. Ildegardis Bertol apoiou a equipe como especialista em solos, no tema relacionado à erosão do solo. Hypolito Suarez Fernandez contribuiu com os processamentos de dados geoespaciais, assim como Jéssica Gerente, que coordenou a pesquisa sob supervisão de Francisco Caruso Gomes Junior. Guilherme Marchiori acompanhou o desenvolvimento do estudo e validou a submissão de acordo com P&D.

REFERÊNCIAS

- BAGWAN, W.A.; GAVALI, R.S. Delineating changes in soil erosion risk zones using RUSLE model based on confusion matrix for the Urmodi river watershed, Maharashtra, India. **Modeling Earth Systems And Environment**. v. 7(3), 2113-2126, 2021. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1007/s40808-020-00965-w.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 6ª edição. São Paulo: Ícone; 2008.
- CALDAS, V.I.S.P.; SILVA, A.S.; SANTOS, J.P.C. Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos – São João, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, 1415-1430, 2019.
- CHUNXIA, Y.; XIAOFENG, C.; LI, L.; XI, C.; JIA, H.; QIAN, H. Soil - Water Loss and Measures Measure composition of Overhead Power Transmission Lines in Hilly área. **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences. v. 233, 01034; 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202123301034.
- DEDECEK, R.A. Coberturas Permanentes do Solo na Erosão sob condições de Cerrados. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 4, n. 24, p. 483-488, abr. 1989.
- DEVÁTY, J.; DOSTAL, T.; HOSL, R.; KRASA, J.; STRAUSS, P. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion - Case studies from Lower Austria and Central Bohemia. **Land Use Policy**. v. 82, 674-685, 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.11.058.
- DISSANAYAKE, D.; MORIMOTO, T.; RANAGALAGE, M. Accessing the soil erosion rate based on RUSLE model for sustainable land use management: a case study of the kotmale watershed, Sri Lanka. **Modeling Earth Systems and Environment**. Springer Science and Business Media LLC. v. 5 (1), 291-306, 2019. DOI:10.1007/s40808-018-0534-x.
- EMBRAPA. **Mapa de erodibilidade dos solos à erosão hídrica do Brasil** (Primeira aproximação). 2020. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_erodibilidade_solo.
- KARA, C.; SHUAIBU, J.A. Evaluating suitability for sustainable urban growth of Abuja by using MCE and GIS. **International Journal of Advanced and Applied Sciences**. v. 6(7), 68-76, 2019. DOI: 10.21833/ijaas.2019.07.009.
- KIRSCHBAUM, D.B.; HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; BRAUN, S.; GARRETT, K.; JONES, E.; et al. NASA's remotely sensed precipitation: A reservoir for applications users. **Bulletim American Meteorological Society**. v. 98(1), 1169–1184, 2017. DOI:10.1175/BAMS-D-15-00296.1.
- LENSE, G.H.E.; PARREIRAS, T.C.; MOREIRA, R.S.; AVANZI, J.C.; MINCATO, R.L. Effect of Spatial-Temporal Variation of Land Use and Land Cover on Soil Erosion. **Revista Caatinga**. v. 34(1), 90-98, 2021 DOI: 10.1590/1983-21252021v34n110rc.

- LI, A.; ZHANG, X.C.J.; LIU, B. Effects of DEM resolutions on soil erosion prediction using CSLE. **Geomorphology**. v. 384 (1), 107706, 2021. DOI:10.1016/j.geomorph.2021.107706. (a)
- LI, L.; XIN, H.X.; XIAOFENG, C.; XI, C.; QUIAN, H. Research on key technology of soil erosion control of transmission line project in Hilly Area. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. v. 831 (1), 012007, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/831/1/012007. (b)
- MAPBIOMAS. **Mapa de Uso e Cobertura da Terra**. Coleção 6. 2020. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR.
- PARVEEN, R. Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. **Journal of Geographic Information System**. v. 4 (6), 588-596, 2012. DOI: 10.4236/jgis.2012.46061.
- SILVA, B.A.; GIONGO, P.R.; MARTINS, P.T.A.; BARBOSA, T.A.; MORAES, V.H.; CAVALCANTE, T.J.; et al. Soil erosion vulnerability in the southern part of the Meia Ponte watershed, Goiás, Brazil: vulnerabilidad erosiva del suelo en la parte sur de la cuenca media ponte, Goiás, Brazil. **Idesia** (Chile). v.37 (2), p. 81-86, 2019.
- SILVA, M.L.N.; FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P. CURI, N. Índices de Erosividade das Chuvas da Região de Goiânia, GO. **Pesq. Agropec. Bras.** v.10 (32), p. 977-985, 1997.
- SKOFRONICK-JACKSON, G.; PETERSEN, W.A.; BERG, W.; KIDD, C.; STOCKER, E.F.; KIRSCHBAUM, D.B.; et al. The Global Precipitation Measurement Mission for Science and Society. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 98 (8), 1679-1695, 2017. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00306.1.
- SOUZA FILHO, L.A. Identificando áreas suscetíveis a erosão em estudos e projetos de linhas de transmissão utilizando técnicas de geoprocessamento e análise espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19, 2019, Santos. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2019. p. 431-434.
- VALLADARES, G.S; GOMES, A.S; TORRESAN, F.E; RODRIGUES, C.A.G; GREGO, C.R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1376-1383, set. 2012.
- WISCHMEIER, W.H; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, DC: USDA; 1978.



Revista Geonorte, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus-Brasil. Obra licenciada sob Creative Commons Atribuição 3.0