

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO TERRITORIAL E**  
**DESENVOLVIMENTO SOCIOAMBIENTAL - PPGPLAN**

**JULIA CUCCO DALRI**

**GESTÃO TERRITORIAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA: DOS**  
**MODELOS PREDITIVOS ÀS FORMAS DE REPRESENTAÇÃO**

**FLORIANÓPOLIS**

**2023**

**JULIA CUCCO DALRI**

**GESTÃO TERRITORIAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA: DOS  
MODELOS PREDITIVOS ÀS FORMAS DE REPRESENTAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental, área de concentração em Análise e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Henrique de Oliveira

**FLORIANÓPOLIS**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do FAED/UDESC,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Dalri, Julia Cucco

Gestão Territorial em Linhas de Transmissão de Energia :  
dos modelos preditivos às formas de representação / Julia  
Cucco Dalri. -- 2023.  
135 p.

Orientador: Francisco Henrique de Oliveira  
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Humanas e da Educação,  
Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e  
Desenvolvimento Socioambiental, Florianópolis, 2023.

1. Linhas de transmissão. 2. Geotecnologias. 3. Detecção  
de mudanças. 4. Realidade Aumentada. 5. Representação  
tridimensional. I. Oliveira, Francisco Henrique de. II.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Humanas e da Educação, Programa de  
Pós-Graduação em Planejamento Territorial e  
Desenvolvimento Socioambiental. III. Título.

**JULIA CUCCO DALRI**

**GESTÃO TERRITORIAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA: DOS  
MODELOS PREDITIVOS ÀS FORMAS DE REPRESENTAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental, área de concentração em Análise e Gestão Ambiental.

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador

---

Prof. Dr. Francisco Henrique de Oliveira  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriana Castreghini de Freitas Pereira  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

---

Prof. Dr. Renan Furlan de Oliveira  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof. Dr. Jairo Valdati  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Florianópolis, 27 de julho de 2023.

**Às razões da minha vida,  
eu dedico.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por estar comigo em todos os momentos, agradeço as graças alcançadas e por ouvir as minhas preces. À minha família, por tudo que representa na minha vida, especialmente ao meu amor, por estar sempre ao meu lado.

Aos meus amigos queridos, agradeço as palavras de incentivo. Ao meu orientador, professor Dr. Francisco Henrique de Oliveira, agradeço por guiar a minha trajetória profissional e me fazer chegar onde jamais imaginei. Ao Laboratório de Geoprocessamento – GeoLab da Universidade do Estado de Santa Catarina, agradeço o espaço de convivência, os recursos e o suporte de excelência que me foram oferecidos ao longo de tantos anos.

Agradeço ao Grupo CPFL e à empresa Caruso Soluções Ambientais & Tecnológicas o financiamento da pesquisa desenvolvida no âmbito de P&D junto à Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel sob o código PD-00063-3075/2020. Ao Áthila Gevaerd Montibeller, à Jéssica Gerente e ao Pedro Henrique Machado Porath agradeço a condução do projeto. Ao Hypólito Suarez Fernandez e ao Henrique Andrade Tomaz agradeço a parceria durante este período.

Agradeço à Cleice Hübner o suporte na pesquisa sobre dados tridimensionais; ao professor Dr. Ildegardis Bertol, os ensinamentos envolvendo o tema erosão; e ao Gustavo Vargas de Andrade os conhecimentos reais e virtuais compartilhados.

Aos meus colegas de profissão (agrimensores, geógrafos e professores) que torceram por mim e de diferentes formas contribuíram para que eu pudesse concluir este trabalho.

## RESUMO

A presente proposição se baseia em desenvolver metodologicamente modelos para monitoramento preditivo de ocupações irregulares e erosões que trazem riscos ao sistema de transmissão de energia. As empresas responsáveis pelo traçado devem prezar pela manutenção da segurança do sistema e consequentemente por sua operacionalização. Para tanto, dispor de dados espacializados é premissa fundamental para monitorar os ativos de transmissão remotamente. Os mapeamentos realizados para aquisição de dados nos termos das normativas expedidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel permitem que se reproduzam as feições em três dimensões, porém, sem previsão normativa para incluir a visualização tridimensional, o setor se limita cartograficamente à duas dimensões. Tratando-se de estruturas de grande porte, diferentes iniciativas contam como aliados frente às ameaças citadas. A Realidade Aumentada auxilia na identificação dos modelos preditivos *in loco*, permitindo que as inspeções sejam direcionadas por marcadores, facilitando a ação para que a condição de risco não se concretize. Objetiva-se, neste contexto, propor meios para que se estabeleça a gestão eficiente do espaço territorial ocupado pelo sistema de transmissão, a partir de modelos embasados em insumos gratuitos e de fácil replicação e atualização. Para identificar possíveis ocupações irregulares a proposição prevê aplicar algoritmos de detecção de mudança a partir das imagens de radar para localizar áreas com significativas alterações. Para prevenir focos erosivos, a proposição utilizou dados espacializados, obtidos remotamente, que arrançados se assemelham ao preconizado pelas equações de perda de solo. Tais propostas, em conjunto, constroem um ciclo que confere agilidade e eficiência no processo de gestão das LTs, potencializando resultados das ações para impedir a materialização de passivos. Entendendo ser a transmissão de energia um setor que demanda ações à altura da importância que figura no cenário estratégico de desenvolvimento econômico nacional, a proposta se apresenta como inovadora – pelos insumos e recursos aplicados, tornando-se aliada dos responsáveis pelo sistema de transmissão bem como de todos que da energia elétrica dependem.

**Palavras-chave:** Linhas de transmissão; Geotecnologias; Detecção de mudanças; Realidade Aumentada; Representação tridimensional.

## ABSTRACT

The present proposition is based on methodologically developing models for predictive monitoring of irregular occupations and erosions that bring risks to the power line transmission system. The companies responsible for the power line must maintain the security of the system and, consequently, its operation. To this end, having spatialized data is a fundamental premise for remotely monitoring transmission assets. The mappings carried out for data acquisition in accordance with the regulations issued by the Brazilian Electricity Regulatory Agency - Aneel allow the reproduction of features in three dimensions, however, without a normative provision to include three-dimensional visualization, the sector is cartographically limited to two dimensions. In the case of large structures, different initiatives count as allies against the aforementioned threats. Augmented Reality assists in identifying predictive models in loco, allowing inspections to be directed by markers, facilitating action so that the risk condition does not materialize. The objective is, in this context, to propose means to establish the efficient management of the territorial space occupied by the transmission system, based on models based on free inputs and of easy replication and updating. To identify possible irregular occupations, the proposition foresees applying change detection algorithms from radar images to locate areas with significant alterations. To prevent erosion, the proposition used spatialized data, obtained remotely, which arranged resemble what is recommended by the soil loss equations. Such proposals, together, build a cycle that provides agility and efficiency in the management process of TLs, enhancing the results of actions to prevent the materialization of liabilities. Understanding that energy transmission is a sector that demands actions equal to the importance that it figures in the strategic scenario of national economic development, the proposal presents itself as innovative – due to the inputs and resources applied, becoming an ally of those responsible for the transmission system as well as of all who depend on electricity.

**Keywords:** Transmission lines; Geotechnologies; Change detection; Augmented Reality; Three-dimensional representation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 – Representação tridimensional de um vão de LT. ....                                                                                                     | 25  |
| Figura 2 – Representação das respostas para utilização de dados 3D agrupadas por setores. ....                                                                    | 31  |
| Figura 3 – Nuvem de pontos LiDAR de uma LT localizada na Holanda. ....                                                                                            | 33  |
| Figura 4 – Representação das últimas respostas agrupadas por setores. ....                                                                                        | 35  |
| Figura 5 – Recorte do Procedimento de Rede, subitem 30. ....                                                                                                      | 38  |
| Figura 6 – Recorte do Procedimento de Rede, subitem 52. ....                                                                                                      | 38  |
| Figura 7 – Representação do relevo ao longo de uma LT. ....                                                                                                       | 39  |
| Figura 8 – Recorte do Procedimento de Rede, subitens 14 e 16. ....                                                                                                | 39  |
| Figura 9 – Localização e traçado da LT Icaraizinho, pertencente ao bioma Caatinga. ....                                                                           | 47  |
| Figura 10 – Imageamento Sentinel-1A. ....                                                                                                                         | 49  |
| Figura 11 – Imageamento Sentinel-1B. ....                                                                                                                         | 49  |
| Figura 12 – Metadados das imagens T0 e T1 escolhidas para compor o modelo. ....                                                                                   | 54  |
| Figura 13 – Visualização de parte da banda VH da imagem T0. No extrato (a) sem filtro; extrato (b) aplicado Refined Lee. ....                                     | 55  |
| Figura 14 – Fluxograma das atividades realizadas para detecção de mudança. ....                                                                                   | 57  |
| Figura 15 – Produto gerado pelo Change Detection (VH à esquerda e VV à direita). ....                                                                             | 57  |
| Figura 16 – Histograma de distribuição dos valores obtidos com o processamento change detection - à esquerda VH e à direita VV. ....                              | 58  |
| Figura 17 – Novo histograma de distribuição dos valores obtidos com o processamento change detection - à esquerda VH e à direita VV. ....                         | 59  |
| Figura 18 – Histograma de distribuição dos valores (à esquerda VH e à direita VV). ....                                                                           | 60  |
| Figura 19 – Modelo de detecção de mudança (VH à esquerda e VV à direita). ....                                                                                    | 62  |
| Figura 20 – Localização e traçado da LT Mata Velha, pertencente ao bioma Cerrado. ....                                                                            | 77  |
| Figura 21 – Recorte do mapeamento de Erodibilidade ao longo da LT Mata Velha. ....                                                                                | 85  |
| Figura 22 – Recorte do mapeamento de uso e cobertura ao longo da LT Mata Velha. ....                                                                              | 86  |
| Figura 23 – Recorte do Fator topografia ao longo da LT Mata Velha. ....                                                                                           | 88  |
| Figura 24 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para produção do modelo. ....                                                                                     | 91  |
| Figura 25 – Resultado do modelo de suscetibilidade (06 de abril de 2022 - 7h00min). ....                                                                          | 93  |
| Figura 26 – Tabela de atributos do arquivo que congrega os pontos mapeados (linhas) e os pesos relacionados para cada um dos fatores (colunas) considerados. .... | 104 |
| Figura 27 – Fluxograma das principais funções executadas pelo aplicativo ErosiAR. ....                                                                            | 106 |
| Figura 28 – Telas de funcionalidades do aplicativo ErosiAR. ....                                                                                                  | 111 |
| Figura 29 – Dois diferentes sinalizadores indicando riscos em função da classificação do modelo. ....                                                             | 112 |
| Figura 30 – Mesmo sinalizador com risco diferente em função do volume de chuvas simulado. ....                                                                    | 113 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Recortes da plataforma Google Earth Engine para a data T0.               | 52 |
| Quadro 2 – Recortes da plataforma Google Earth Engine para a data T1.               | 53 |
| Quadro 3 – Pin 1 sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita).   | 63 |
| Quadro 4 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 na localização do Pin 1.     | 63 |
| Quadro 5 – Pin 2 sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita).   | 64 |
| Quadro 6 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 na localização do Pin 2.     | 64 |
| Quadro 7 – Pin 3 sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita).   | 65 |
| Quadro 8 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 na localização do Pin 2.     | 65 |
| Quadro 9 – Pins 5, 6 e 7 (polarização VH à esquerda e VV à direita).                | 66 |
| Quadro 10 – Pins 4, 8 e 9 (polarização VH à esquerda e VV à direita).               | 66 |
| Quadro 11 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 nos pins 5, 6 e 7.          | 67 |
| Quadro 12 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 nos pins 4, 8 e 9.          | 67 |
| Quadro 13 – Pin 10 sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita). | 68 |
| Quadro 14 – Comparativo entre a imagem de 2017 e 2021 no Pin 10.                    | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Detalhes sobre os produtos do satélite Sentinel-1. _____                                                         | 48  |
| Tabela 2 – Dados extraídos do produto de detecção de mudanças. _____                                                        | 69  |
| Tabela 3 – Classes e respectivos pesos atribuídos ao fator Chuva. _____                                                     | 83  |
| Tabela 4 – Classes e respectivos pesos atribuídos ao fator Acumulado de chuva. _____                                        | 83  |
| Tabela 5 – Classes contidas no mapeamento da Embrapa (2020) e os respectivos pesos atribuídos ao fator Erodibilidade. _____ | 86  |
| Tabela 6 – Classes contidas no mapeamento do MapBiomas (2020) e respectivos pesos atribuídos ao fator Uso da Terra. _____   | 87  |
| Tabela 7 – Classes propostas por Bertoni e Lombardi Neto (2008) e respectivos pesos atribuídos ao fator Topografia. _____   | 88  |
| Tabela 8 – Classificação final da suscetibilidade ao risco de erosão. _____                                                 | 92  |
| Tabela 9 – Classificação original e simplificada para cada um dos fatores considerados. _____                               | 108 |
| Tabela 10 – Apresentação dos pesos para os fatores dinâmicos. _____                                                         | 110 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| ANEEL       | Agência Nacional de Energia Elétrica                                     |
| BDIT        | Base de Dados das Instalações de Transmissão de Energia Elétrica         |
| CPFL        | Companhia Paulista de Força e Luz                                        |
| CONCAR      | Comissão Nacional de Cartografia                                         |
| dB          | Decibéis                                                                 |
| ESA         | <i>European Spatial Agency</i> – Agência Espacial Europeia               |
| GEE         | Google Earth Engine                                                      |
| GGT         | Gestão Geoespacializada da Transmissão                                   |
| GRD         | <i>Ground Range Detected</i> – Detecção ao alcance do solo               |
| HR          | <i>High Resolution</i> – Alta Resolução                                  |
| INDE        | Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais                               |
| IW          | <i>Interferometric Wide</i> – Interferométrico estendido                 |
| kV          | Quilovolt                                                                |
| LT          | Linha de Transmissão                                                     |
| LTs         | Linhas de Transmissão                                                    |
| MME         | Ministério de Minas e Energia                                            |
| NASA        | <i>National Aeronautics and Space Administration</i>                     |
| NBR         | Norma Brasileira                                                         |
| ONS         | Operador Nacional do Sistema Elétrico                                    |
| ONU         | Organização das Nações Unidas                                            |
| P&D         | Pesquisa & Desenvolvimento                                               |
| RA          | Realidade Aumentada                                                      |
| SAR         | <i>Synthetic Aperture Radar</i> – Radar de abertura sintética            |
| SIG         | Sistema de Informação Geográfica                                         |
| SIRGAS 2000 | Sistema de Referencial Geocêntrico para as Américas                      |
| SLC         | <i>Single Look Complex</i> – Visada complexa única                       |
| SNAP        | <i>Sentinel Application Platform</i>                                     |
| SRTM        | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> – Missão Topográfica de Radar    |
| USLE        | <i>Universal Soil Loss Equation</i> – Equação Universal de Perda do Solo |

## SUMÁRIO

|                   |                                                                              |           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>          | <b>AMBIENTAÇÃO AO TEMA</b>                                                   | <b>14</b> |
| 1.1               | INTRODUÇÃO                                                                   | 14        |
| 1.2               | JUSTIFICATIVA                                                                | 15        |
| 1.3               | PROBLEMÁTICA                                                                 | 17        |
| 1.4               | OBJETIVOS                                                                    | 18        |
| <b>1.4.1</b>      | <b>Objetivos Específicos</b>                                                 | <b>19</b> |
| 1.5               | HIPÓTESE                                                                     | 19        |
| ESTRUTURA DA TESE |                                                                              | 19        |
| <b>2</b>          | <b>POTENCIAL TRIDIMENSIONAL PARA REPRESENTAÇÃO DOS ATIVOS DE TRANSMISSÃO</b> | <b>22</b> |
| 2.1               | INTRODUÇÃO                                                                   | 22        |
| 2.2               | JUSTIFICATIVA                                                                | 24        |
| 2.3               | REFERENCIAL TEÓRICO                                                          | 24        |
| 2.4               | MATERIAIS E MÉTODO                                                           | 27        |
| <b>2.4.1</b>      | <b>Materiais</b>                                                             | <b>27</b> |
| 2.4.1.1           | Questionário                                                                 | 27        |
| 2.4.1.2           | Normativas                                                                   | 28        |
| <b>2.4.2</b>      | <b>Método</b>                                                                | <b>29</b> |
| 2.5               | RESULTADOS E DISCUSSÃO                                                       | 30        |
| 2.6               | CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                         | 40        |
| <b>3</b>          | <b>DETECÇÃO DE MUDANÇAS A PARTIR DE IMAGEAMENTO POR RADAR</b>                | <b>42</b> |
| 3.1               | INTRODUÇÃO                                                                   | 42        |
| 3.2               | JUSTIFICATIVA                                                                | 43        |
| 3.3               | REFERENCIAL TEÓRICO                                                          | 44        |
| 3.4               | ÁREA DE ESTUDO                                                               | 46        |
| 3.5               | MATERIAIS E MÉTODOS                                                          | 48        |
| <b>3.5.1</b>      | <b>Materiais</b>                                                             | <b>48</b> |
| <b>3.5.2</b>      | <b>Método</b>                                                                | <b>50</b> |
| 3.5.2.1           | Aquisição                                                                    | 51        |
| 3.5.2.2           | Pré-processamento                                                            | 54        |
| 3.5.2.3           | Deteção de mudanças                                                          | 56        |
| 3.6               | RESULTADOS E DISCUSSÃO                                                       | 57        |
| 3.7               | CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                         | 70        |

|          |                                                                     |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>SUSCETIBILIDADE AO RISCO DE EROSÃO APOIADA EM GEOTECNOLOGIAS</b> | <b>73</b>  |
| 4.1      | INTRODUÇÃO                                                          | 73         |
| 4.2      | JUSTIFICATIVA                                                       | 74         |
| 4.3      | REFERENCIAL TEÓRICO                                                 | 75         |
| 4.4      | ÁREA DE ESTUDO                                                      | 77         |
| 4.5      | MATERIAIS E MÉTODO                                                  | 78         |
| 4.5.1    | <b>Materiais</b>                                                    | 79         |
| 4.5.2    | <b>Método</b>                                                       | 82         |
| 4.5.2.1  | Determinação dos pesos                                              | 82         |
| 4.5.2.2  | Aplicação da hierarquia                                             | 89         |
| 4.5.2.3  | Classificação do risco                                              | 91         |
| 4.6      | RESULTADOS E DISCUSSÃO                                              | 93         |
| 4.7      | CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                | 96         |
| <br>     |                                                                     |            |
| <b>5</b> | <b>REALIDADE AUMENTADA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO</b>                | <b>98</b>  |
| 5.1      | INTRODUÇÃO                                                          | 98         |
| 5.2      | JUSTIFICATIVA                                                       | 99         |
| 5.3      | REFERENCIAL TEÓRICO                                                 | 101        |
| 5.4      | MATERIAIS E MÉTODO                                                  | 102        |
| 5.4.1    | <b>Materiais - modelo</b>                                           | 103        |
| 5.4.2    | <b>Método - aplicativo</b>                                          | 105        |
| 5.4.2.1  | Localização                                                         | 106        |
| 5.4.2.2  | Adição                                                              | 107        |
| 5.4.2.3  | Simulação                                                           | 109        |
| 5.5      | RESULTADOS E DISCUSSÃO                                              | 110        |
| 5.6      | CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                | 115        |
| <br>     |                                                                     |            |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES</b>                                                   | <b>118</b> |
| <br>     |                                                                     |            |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                  | <b>121</b> |
| <br>     |                                                                     |            |
|          | <b>APÊNDICE A</b>                                                   | <b>133</b> |

## 1 AMBIENTAÇÃO AO TEMA

### 1.1 INTRODUÇÃO

O setor de energia é um dos mais estratégicos, sobretudo nos países industrializados e em industrialização (Farias; Martins; Cândido, 2021). O processo de apropriação dos recursos naturais para a geração de energia é um ponto central para estabelecer a organização produtiva e o ordenamento territorial (Chaves; Giusti; Strauch, 2021).

No Brasil a principal fonte de geração é hidrelétrica, que responde por 62% da capacidade instalada em operação no país, seguida das termelétricas com 28%. O restante, 10%, é proveniente de usinas eólicas e de importação de outros países (Aneel, 2022).

O órgão que regula o setor elétrico no Brasil é a Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia - MME, que entre outras atribuições, fiscaliza a prestação do serviço de fornecimento de energia elétrica à sociedade (Aneel, 2023). Com os inúmeros registros de perturbação sistêmica de grande porte, que resultam na interrupção do fornecimento de energia, a Aneel reforça constantemente sua atuação junto às empresas de transmissão com o objetivo de mitigá-los (Aneel, 2020).

Desde a elaboração do projeto devem ser cumpridas as determinações relacionadas à segurança do sistema. No Brasil, a NBR 5422 dispõe sobre os requisitos a serem atendidos pelas empresas e exige que a área territorial sob torres e cabos esteja livre de ocupações, independente da finalidade – residencial ou comercial. (Abnt, 1985).

O regramento restritivo é aplicado ao longo do traçado, paralelo ao sentido dos cabos, e varia de largura em função da tensão da energia que é transmitida. Próximo às torres as restrições tendem a ser mais severas.

As limitações de uso se justificam por questões de segurança devido aos riscos impostos pela alta tensão que perpassa pelos cabos. Neste contexto, são proibidas as ocupações - mesmo que temporárias – ao longo do traçado.

Apesar das determinações, a celeridade com que as ocupações se desenvolvem, não permite que somente a fiscalização *in loco* atue de maneira eficiente para evitá-las (Dissanayake; Morimoto; Ranagalage, 2019).

Outra condição de risco ao imposta ao sistema de transmissão de energia se caracteriza pelas erosões, que em sua maioria são desencadeadas ao longo do traçado pela ação da chuva combinada à ausência de cobertura do solo (Lense *et al.*, 2021). Com a dinâmica climática típica de ambiente tropical, as erosões tendem a se ampliar rapidamente (Sakuno *et al.*, 2020) podendo instabilizar a estrutura das torres se não mitigadas a tempo.

Ainda que as Linhas de Transmissão no Brasil somem mais de 165 mil quilômetros de extensão - considerando apenas as vinculadas ao Sistema Interligado Nacional (Ons, 2022) - tais condições de risco, quando materializadas, denotam ineficiência de gestão por parte da empresa que possui a concessão do traçado.

Diferentes proposições que orientam as concessionárias de transmissão de energia na direção preventiva têm ganhado espaço no meio científico com incentivo de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) subsidiados pela Aneel desde a criação da Lei Federal n. 9.991/2000. O texto da Lei prevê investimento anual em projetos que sejam aplicáveis, relevantes e economicamente viáveis para o setor elétrico como forma de mitigar os impactos do setor e para promover a segurança no fornecimento de energia.

Atendendo a estes critérios, o P&D n. 00063-3075/2020 firmado entre Grupo CPFL e à empresa Caruso Soluções Ambientais & Tecnológicas, tem partes de suas pesquisas incluídas na presente tese que ao estudar meios para manter o sistema em segurança, promove a regularidade de fornecimento de energia nos grandes centros.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Garantir acesso à energia confiável à população é uma das metas estabelecidas pela ONU (Organização das Nações Unidas) em 2015 como forma de cumprir com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS compõem um compromisso global para até 2030 alcançar a erradicação da pobreza, proteção do meio ambiente, paz e prosperidade para a humanidade (Onu, 2023).

Aos todo são 17 Objetivos, organizados por temas, dentre os quais o setor elétrico, ainda que também relacionado indiretamente a outros, está ligado ao Objetivo 7, que aborda o segmento de energia valorizando as fontes renováveis e incentivando a eficiência energética (Chaves; Giusti; Strauch, 2021).



O Objetivo 7 prevê “assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia, para todos” (Onu, 2023). Ainda que a pesquisa esteja sob o foco das redes de alta tensão, são estas linhas que alimentam a rede de distribuição que chega às residências do país.

Neste contexto, à medida que são propostos diferentes meios científicos para se antecipar às possíveis ocorrências no sistema, reduz-se os custos decorrentes das ações corretivas muitas vezes englobados no somatório nas tarifas de transmissão e distribuição.

Além disto, o processo contribui para tornar confiável o acesso à energia, uma vez que se mitigam as fragilidades do sistema, minimizando-se, por conseguinte as chances de desligamentos ou interrupções que podem prejudicar o fornecimento.

Ciente da importância que as LTs possuem, uma vez que independente da fonte geradora, são as responsáveis por levar energia elétrica a todos os territórios (Turmina *et al.*, 2018) - apresenta-se a pesquisa, que se propõe a explorar modelos preditivos que deem suporte ao monitoramento das LTs.

Com o acompanhamento contínuo ao longo das linhas de transmissão apoiado nos modelos para apontar tanto mudanças – no sentido antrópico – quanto erosões, as empresas ganham mais agilidade para manter o sistema em segurança.

Ambos os modelos têm como base insumos gratuitos, todos com origem em dados produzidos por sensoriamento remoto, que arranjos podem estimar áreas que possam sugerir fiscalizações mais frequentes para evitar que as ameaças, tanto em relação às mudanças quanto à erosão se concretizem.

Com os modelos à disposição, alcança-se um material orientativo que pode direcionar a fiscalização *in loco* ou sugerir onde se faz necessário intensificar o monitoramento para que se mantenha o sistema em plenas condições operacionais sob estes aspectos.

Como um mecanismo adicional que confere realismo ao modelo de erosão, a Realidade Aumentada (RA) tem potencial para agilizar os processos de identificação das áreas sensíveis identificadas no modelo.

Este conjunto de ações propostas envolvendo modelos preditivos, representação tridimensional e de realidade aumentada direcionam e facilitam a gestão das Linhas de Transmissão partindo de recursos ainda pouco explorados pelo setor elétrico brasileiro.

Como traçado piloto para aplicação da detecção de mudanças utilizou-se a LT Icaraizinho, localizada no estado do Ceará, pertencente ao bioma Caatinga. Para o modelo de erosão utilizou-se a LT Mata Velha como piloto, localizada em Minas Gerais, pertencente ao bioma Cerrado.

Os traçados estão sob responsabilidade do Grupo CPFL, dos quais se tem acesso aos dados devido à vinculação do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) firmado com a Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel.

### 1.3 PROBLEMÁTICA

A extensão do sistema de transmissão no Brasil exige que sejam admitidas novas formas de acompanhamento do traçado no processo de fiscalização para gerir esta porção de terra da maneira mais ágil com vistas a manter os critérios de segurança recomendados.

Metodologias que apresentam modelos preditivos tem fundamental importância para antecipação de cenários (Lense *et al.*, 2021) para que haja tempo hábil para determinar ações preventivas, ou para que sejam planejadas intervenções corretivas. A intenção é evitar que situações indesejadas ou em desacordo com a segurança do sistema, como as erosões e ocupações próximas às torres, se concretizem.

Segundo Bagwan e Gavali (2020), é fundamental se apoiar em mecanismos que favoreçam o monitoramento à distância, tanto em relação aos fatores naturais quanto em relação às práticas antrópicas que podem prejudicar seu funcionamento.

Diferentes produtos do sensoriamento remoto sugerem novas formas de apontar as modificações que acontecem no solo (Sefrin; Riese; Keller, 2020). Imagens orbitais gratuitas e com melhores resoluções temporais oferecem em meios mais adequados para detectar alterações em um mínimo intervalo de tempo, subsidiando um monitoramento eficiente apoiado em outras tecnologias (Chaves; Picoli; Sanches, 2020); (Akyürek; Koç; Akbaba; Sunar, 2018).

Neste contexto, para a detecção de mudanças, busca-se o viés exploratório do potencial de imagens de radar em vanguarda aos muitos estudos realizados com esses insumos, mas para outros temas (Lohberger; Stängel; Atwood; Siegert, 2017); (Washaya; Balz; Mohamadi, 2018).

Por bibliometria apoiada em bases de dados como: Periódicos Capes, Scopus, Scielo, EBSCO, Science Direct/Mendeley percebe-se que muito tem se publicado

sobre o potencial das imagens de radar, principalmente pela gratuidade oferecida com os produtos da Agência Espacial Europeia (ESA) obtidos pelo sensor Sentinel-1 (Tamiminia *et al.*, 2020). Ainda assim, não foi encontrada pesquisa aplicando-as ao monitoramento de Linhas de Transmissão, que possuem particularidades considerando o traçado longilíneo, formando uma rede linear.

A extensão das LTs, da mesma forma, exige um processo simplificado para auxiliar na gestão do sistema, aliando principalmente a redução de custos. A aquisição de insumos e softwares de processamentos gratuitos formam um conjunto de premissas que contribui para a replicação dos modelos, tornando-os acessíveis ao cotidiano das empresas – conforme prezado na metodologia que se propõe a indicar a suscetibilidade ao risco a erosão.

Outra demanda latente do setor é dispor de uma base que compartilhe os dados dos ativos de transmissão. Muitas empresas ainda desconhecem espacialmente seus domínios, por isso é necessário direcionar esforços nesta construção. Para agregar distinção ao estudo, faz-se presente uma breve discussão sobre o estágio de representação tridimensional da base de dados no sentido de sugerir previsão nas normativas para agilizar o processo de representação dos ativos de 2D para 3D.

As etapas propostas para cada ameaça identificada ainda possuem um entrave a ser superado, que envolve a aplicação efetiva - *in loco* - dos materiais produzidos em escritório. Neste contexto, a Realidade Aumentada é a inovação proposta para construir cenários realísticos a partir do que se propõe nos modelos, sobretudo o que envolve a temática erosão. Trata-se de um recurso que deve ser explorado para otimizar o processo fiscalizatório.

Todas as iniciativas relacionadas neste estudo têm a pretensão de tornar o sistema resiliente às fragilidades apontadas, garantindo desta forma, mais segurança para transmissão de energia no país.

#### 1.4 OBJETIVOS

Estabelecer modelos para detecção de mudanças e suscetibilidade à erosão que aliados aos recursos de representação tridimensional e Realidade Aumentada sejam os pilares de uma proposta de gestão territorial que garanta direcionamento das ações preventivas e corretivas para garantir a segurança da transmissão de energia para os aspectos pesquisados.

### 1.4.1 Objetivos Específicos

- a) Identificar o atual estágio de aplicação de dados tridimensionais pelas concessionárias que atuam no país apontando os benefícios da representação 3D para gestão de ativos e os ganhos com inclusão destes dados em termos normativos;
- b) Apresentar as respostas para detecção de mudança a partir de imagens de radar Sentinel-1, gratuitas e com alta resolução temporal que possam indicar os locais mais dinâmicos e que merecem maior atenção do ponto de vista fiscalizatório;
- c) Propor um modelo preditivo que direcione ações preventivas frente ao desenvolvimento de processos erosivos, utilizando recursos gratuitos e obtidos por meio de sensoriamento remoto;
- d) Sugerir a aplicação da Realidade Aumentada como forma inovadora complementar para o monitoramento de erosões, aproximando das equipes de campo os modelos elaborados em escritório, integrando as equipes;
- e) Estabelecer, por meio dos objetivos anteriores, mecanismos que combinados auxiliem o processo de gestão para oferecer maior segurança territorial ao sistema de transmissão e cartográfica para as empresas responsáveis considerando as temáticas exploradas.

## 1.5 HIPÓTESE

A representação tridimensional contribui sobremaneira nos processos de gestão de ativos de transmissão de energia. Os dados geoespaciais, neste contexto, são fundamentais para construção de modelos preditivos de detecção de mudança e de desenvolvimento erosivo que podem minimizar os riscos ao sistema. Para facilitar as ações de campo, a Realidade Aumentada se apresenta como forma promissora e atual para vincular informações ao ambiente real a que se referem.

## ESTRUTURA DA TESE

O presente documento explora diferentes modelos para atender demandas de monitoramento - especificamente de detecção de mudanças e processos erosivos ao longo das LTs - abordando a importância da representação tridimensional, seja para composição da base de dados espaciais ou para aplicação de recursos de Realidade

Aumentada. Dispostos sequencialmente em formato de artigo científico, cada um dos capítulos propostos apresenta individualmente as pesquisas realizadas para os temas mencionados. Estes conteúdos foram ou serão submetidos à publicação em uma construção diferente da apresentada nesta tese, uma vez que devem atender formatos e abordagens específicas de cada periódico de divulgação. Esta estrutura de escrita está prevista no documento intitulado Manual para a Elaboração de Trabalhos Acadêmicos da Udesc, publicado em 2021 pela Biblioteca Universitária.

O presente capítulo situa o leitor quanto a problemática a ser dirimida à medida que os objetivos, geral e específicos, são atendidos por meio das pesquisas apresentadas nesta tese. No capítulo 2 destacam-se as normativas do setor que buscam criar a base de dados dos ativos de transmissão. O foco deste capítulo é avaliar o potencial dos dados tridimensionais e o estágio de aquisição e consumo de dados 3D pelas concessionárias. A intenção é sugerir os benefícios de uma representação que vai além dos vetores que espacializam as torres e as linhas de energia.

No capítulo 3 se apresenta um dos modelos preditivos, a detecção de mudanças, elaborada a partir imagens de radar do satélite Sentinel-1, que são gratuitas e possuem alta resolução temporal para identificar padrões de alteração. A lógica do processamento apoia-se na razão entre as cenas com data anterior - utilizada como padrão; e uma data atual - para apontar as diferenças percebidas nesta última, acusando então onde houve mudança.

O segundo modelo preditivo é apresentado no Capítulo 4 e baseia-se em dados que se aproximam dos fatores relacionados na Equação de Perda de Solos, chamada internacionalmente de USLE – *Universal Soil Loss Equation* aplicados como planos sobrepostos de informações (arquivos matriciais) para apontar a suscetibilidade à erosão.

O contexto preditivo também tem espaço no Capítulo 5, que aborda o potencial da Realidade Aumentada (RA) para localizar as áreas com risco para suscetibilidade à erosão. Neste caso, a integração entre o modelo e as equipes de campo que realizam a fiscalização é potencializada com auxílio dos objetos virtuais. As simulações sobre os volumes de chuva permitem que o usuário interaja com o aplicativo, reconhecendo o risco a erosão de determinada área – conforme metodologia. A intenção é apresentar a aplicação deste sistema muito em voga em outros contextos, trazendo-o para esta demanda de gestão, apresentando inovações

que podem ser promissoras para garantir maior eficiência ao processo de gerenciamento dos ativos de transmissão.

Ao final alcança-se um documento que se diferencia de outras proposições por partir de modelagens que se antecipam em relação às fragilidades as quais as LTs estão sujeitas e por abordagens de representação tridimensional e virtual.

## 2 POTENCIAL TRIDIMENSIONAL PARA REPRESENTAÇÃO DOS ATIVOS DE TRANSMISSÃO<sup>1</sup>

### 2.1 INTRODUÇÃO

Garantir o fornecimento ininterrupto de eletricidade – serviço vital para as atividades das sociedades modernas – exige monitoramento e manutenção eficazes ao longo de toda extensão das Linhas de Transmissão (LT) de energia (Matikainen *et al.*, 2016); (Munir; Awrangjeb; Stantic, 2023).

Para subsidiar o gerenciamento destas estruturas e mantê-las operando em segurança é fundamental que hajam registros que espacializem a rede e seus componentes. Neste contexto, relacionar a localização geográfica das estruturas de transmissão ao inventário de ativos torna o processo de gestão mais eficiente (Kwoczyńska; Dobek, 2016).

Para além da determinação das coordenadas, vincular dados georreferenciados ao processo de monitoramento atribui confiabilidade e rastreabilidade de informações que podem ser aplicadas em diferentes demandas (Sanches, 2016).

Segundo Peter van Oosterom (2019), há um rol de novas ferramentas para coleta, gerenciamento e disseminação de informações espaciais que tem contribuído para acelerar a disponibilidade de dados desta natureza. Os estudos de Li *et al.* (2021), destacam que cada vez mais países europeus, asiáticos e norte-americanos têm investido em infraestrutura - e principalmente regimento - para aquisição de dados visando atender ao monitoramento de ativos de transmissão de energia.

O mecanismo mais explorado pelo setor - segundo depreende-se das pesquisas de Munir, Awrangjeb e Stantic (2023); Chen, Lin e Liao (2022) e Guan *et al.*, (2021) - é o escaneamento a *laser* a partir do sobrevoo por aeronaves não tripuladas para geração de nuvem de pontos. Este é considerado por Kwoczyńska e Dobek (2016) a melhor e mais ágil tecnologia para aquisição de dados realistas ao longo das LTs de energia. Os autores destacam que a natureza ampla e diversa dos dados adquiridos por meio destes novos recursos permite que mais detalhes sejam

---

<sup>1</sup> As pesquisas relacionadas neste capítulo não foram submetidas à publicação.

identificados, alcançando melhora na qualidade de representação dos ativos de transmissão.

Especificamente no setor de energia, dados tridimensionais capturados no formato de nuvem de pontos permitem uma representação perfeita não só da geometria das estruturas verticais, mas também dos elementos a elas vinculados, a exemplo de cabos, isoladores e transformadores (Kwoczyńska; Dobek, 2016).

Para além do mapeamento de feições para fins de acompanhamento de manutenção, direcionar a aquisição de dados 3D para monitoramento do entorno, mapeando a vegetação ao longo das LTs – que não podem avançar sobre os ativos – têm ganhado notoriedade nos últimos tempos, *vide* os estudos de Chen, Lin e Liao (2022) e Li et al. (2021).

Em comum, as pesquisas indicadas buscam meios visualmente eficientes para gerenciar as LTs para que o funcionamento ininterrupto do sistema de transmissão de energia seja uma realidade. Neste contexto, o monitoramento constante e o conhecimento irrestrito de seus domínios e ativos são prerrogativas que devem ser assumidas pelo setor, por meio das empresas concessionárias, por se tratar de infraestrutura de caráter estratégico.

No Brasil, a ausência de previsão normativa para a utilização e compartilhamento de dados tridimensionais pode limitar o processo de representação 3D e frear sua aplicação para a gestão dos ativos de transmissão.

Recentemente, por meio de normativa expedida (Resolução Normativa Aneel n. 861/2019) foram determinadas diretrizes para que as concessionárias de transmissão procedessem com o compartilhamento de dados espaciais de seus ativos para elaboração da Base de Dados das Instalações de Transmissão de energia elétrica - BDIT (Aneel, 2019).

A normativa demandou que as empresas criassem/adequassem os dados de todos os ativos de transmissão sob sua concessão – infraestrutura em grande parte desconhecida documentalmente, sobretudo nos traçados ainda ativos, mas de implantação realizada há décadas.

Ainda que a citada normativa tenha sido revogada (nos termos expressos na Resolução Normativa Aneel n. 1005/2022), a base de dados continua em construção sem orientações que possam prever a visualização tridimensional de elementos do sistema de transmissão de energia, embora em alguns casos a forma de aquisição empregada nos mapeamentos realizados possibilite esta forma de representação.



## 2.2 JUSTIFICATIVA

Tomando como base as pesquisas de Bahu *et al.* (2013), há pelo menos uma década os modelos 3D são usados para planejamento nos setores ambiental e de energia. Apesar disto, segundo Peter van Oosterom (2019), a instalação de redes de transmissão, na maioria dos casos, é registrada apenas na projeção 2D, perdendo-se principalmente representação de informações como altura (para as linhas aéreas) ou profundidade (no caso das subterrâneas).

A base de dados espaciais do setor elétrico brasileiro está sendo construída por força de exigências normativas expedidas pela Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica - responsável por regular o mercado de energia no país.

Para as LT, o regramento foi estabelecido pela Resolução n. 861/2019, que exigiu das concessionárias os dados espacializados dos ativos localizados em território nacional. O processo para atender as determinações provocou a reconhecerem as fragilidades de seus registros por percebê-los equivocados ou até mesmo inexistentes em muitos casos.

A extensão da rede de transmissão e principalmente o tempo de operação de algumas LTs são fatores que justificam, em parte, a ausência de documentação espacial de muitos traçados. Além disto, o curto prazo para cumprimento das exigências – de até no máximo 1 (ano) e 9 (nove) meses a contar da publicação da Resolução para inclusão dos dados de todos ativos em operação no país (Aneel, 2019) pode ter exigido a contratação de mapeamentos, seja para complementar informações no nível exigido ou para produzi-las integralmente.

Da mesma forma, o nível de precisão planimétrica determinada - melhor ou igual a 1 metro - e altimétrica de até 3 vezes a planimétrica (Aneel, 2019) – pode ter motivado, em alguns casos, a utilização de mapeamento por nuvem de pontos como forma mais ágil e detalhada para aquisição dos dados. Neste caso, dados tridimensionais podem estar à disposição das concessionárias, porém, subutilizados ou reduzidos à duas dimensões.

## 2.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Peter van Oosterom (2019) destaca que, de maneira geral, a geração e a aplicação de dados 3D têm sido impulsionadas pelos recursos que produzem dados

a partir da captura de nuvens de pontos. A exigência de elaboração da BDIT, nestes termos, pode ser considerada um motivador para este tipo de mapeamento no âmbito do setor de transmissão no Brasil.

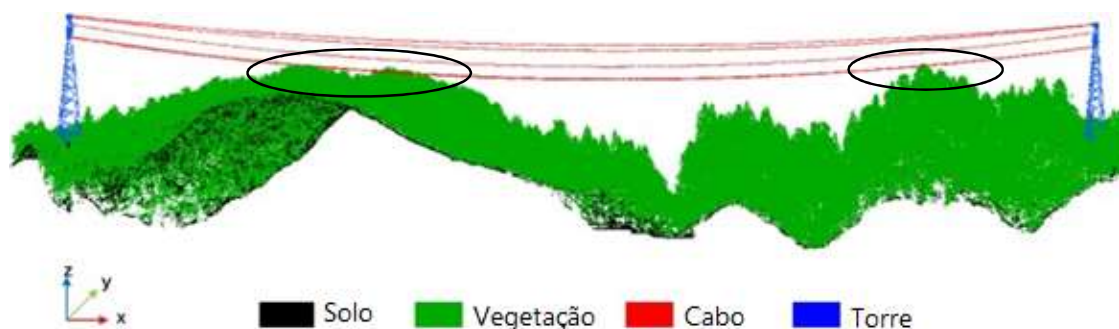
Matikainen *et al.* (2016), reforça a aplicação e afirma que as concessionárias têm buscado adquirir dados em nuvem de pontos e utilizá-los em demandas com intuito de inspecionar os componentes do sistema de transmissão; detectar o avanço da vegetação ao longo dos cabos; e identificar danos às torres causados por desastres naturais.

Jwa, Sohn e Kim (2009) também sugerem a possibilidade de aplicação de dados tridimensionais para visualizar o possível rompimento do cabo pelo contato com galhos de árvores próximas, estabelecendo-se um modelo preditivo que antevê este tipo de ocorrência a partir de uma dada intensidade de vento.

Para fins de manutenção, principalmente de poda de vegetação, conhecer efetivamente o alcance dos cabos e vê-los projetado em três dimensões confere outro sentido que quando representados apenas em 2D. Isso porque o vão - espaço formado entre duas torres - não corresponde a extensão dos cabos, que possuem catenária e por isso, tem extensão ampliada – maior que a distância entre as torres.

As demandas citadas dependem, em termos simplificados, de dados de distância – tanto horizontal quanto vertical, que podem ser adquiridas de formas convencionais com outros recursos. Contudo, a assimilação das condições reais de campo pode ser facilitada pela representação tridimensional, nos termos do que se apresenta na Figura 1 retirada dos estudos de Chen; Lin e Liao (2022):

Figura 1 – Representação tridimensional de um vão de LT.



Fonte: Adaptado de Chen et al. (2022).

Tomando por base a Figura 1, a partir da nuvem de pontos se identificam em que locais a vegetação está próxima dos cabos, colocando em risco a segurança do sistema de transmissão de alta tensão. A visualização tridimensional neste caso é intuitiva e facilita o entendimento da condição de risco registrada nesta tomada, permitindo identificar de forma rápida onde é necessária intervenção – destacada com as elipses.

Ao apresentar seus resultados, os autores relembram que inspeção tradicional - feita em campo por fiscais dependia de observação demandando um longo ciclo de inspeção e intensa carga de trabalho (Chen; Lin; Liao, 2022).

Em substituição, as imagens de satélite de altíssima resolução espacial foram ganhando espaço, mas mantiveram limitação principalmente por depender das condições climáticas e devido à resolução espacial, que poderia prejudicar o detalhamento no processo de interpretação (Matikainen *et al.*, 2016).

Como alternativa às condições climáticas o uso de imagens de radar de abertura sintética - SAR (*Synthetic Aperture Radar*), foram consideradas uma saída vantajosa (Matikainen *et al.*, 2016). Porém, segundo os próprios autores, as distorções relacionadas à geometria de aquisição, especialmente sombreamento e encurtamento, afetam e prejudicam a aparência das torres, nos casos em que o mapeamento tenha estas feições como foco de aquisição.

Ainda que possuam entraves para a detecção do sistema em si (torres e cabos), tais recursos de imageamento possuem potencial elevado para identificação de condições do entorno que impactam na segurança do sistema de transmissão e por isso são aplicados no mapeamento de ameaças, sejam ocupações irregulares quanto erosões, nos termos explorados nos capítulos seguintes a este.

Em comparação com os processos baseados em imagens orbitais, a aquisição de dados tridimensionais é uma tarefa mais complexa, mas a varredura a *laser* está se desenvolvendo rapidamente. Hoje, tanto plataformas aéreas quanto terrestres garantem aquisição de dados em nuvem, prerrogativa para a representação volumétrica (Munir; Awrangjeb; Stantic, 2023).

Parte-se do pressuposto de que os dados 3D são fundamentais para melhor compreensão do mundo (Peter Van Oosterom, 2019), podendo reduzir falhas de interpretação durante o monitoramento dos ativos devido sua representação realista.

Neste contexto, impulsionada pelas novas formas de mapeamento, experimentada em pesquisas aplicadas em diferentes países, a representação

tridimensional tem muito a oferecer ao processo de gestão dos ativos do setor de transmissão no Brasil.

## 2.4 MATERIAIS E MÉTODO

Para sugerir adequações normativas que direcionem a inclusão de dados tridimensionais na base de dados é fundamental identificar o nível de consumo de dados 3D conforme estes vem sendo aplicados nas demandas das concessionárias. De forma complementar ao questionário proposto, a metodologia se apoia nos documentos técnicos relacionados à BDIT, avaliando as especificações e os parâmetros mínimos apontados pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

### 2.4.1 Materiais

Dentre os materiais necessários para subsidiar a pesquisa estão: questionário voltado às empresas transmissoras com atuação no Brasil para coletar informações sobre acesso/consumo de dados tridimensionais; e documento técnico relacionado no texto da Resolução Normativa Aneel n. 861/2019, chamado “Verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos” contendo as especificações técnicas para entrega dos dados que compõem a base das instalações de transmissão.

#### 2.4.1.1 Questionário

A proposição do questionário teve a intenção de reunir informações quanto ao nível de proximidade e entendimento das concessionárias acerca da temática tridimensional a partir da percepção de seus funcionários participantes. Com os resultados, a sugestão de atualização normativa passa a ser mais assertiva ao incorporar requisitos com base no que já se percebe sendo aplicado no setor.

Como estruturado o questionário reuniu 15 perguntas, sendo 6 delas com alternativas (sim/não/outra) com tempo estimado de 5 minutos para resposta. Nenhuma questão era obrigatória de modo que o não preenchimento de algumas delas não implicava em impedimento de envio. Sendo de livre participação sem exigência de vinculação com dados pessoais, a pesquisa se limita a apresentar dados

em conjunto, não divulgando informação isolada que possa sugerir a identificação de seu participante. Uma cópia do questionário conforme aplicado consta como Apêndice A deste trabalho.

A estruturação foi elaborada na ferramenta *forms* disponível no pacote Microsoft Office 365 vinculado à conta institucional da Udesc. O compartilhamento foi realizado por link via *e-mail* direcionado a 40 funcionários das principais concessionárias transmissoras do país, no total de 20 delas entre empresas nacionais e internacionais. Os contatos de e-mail direcionam o formulário aos envolvidos - em termos técnicos corporativos - na discussão sobre a Resolução n. 861/2019.

A intenção do questionário, mesmo que limitado ao universo alcançado, é chegar em um diagnóstico atual de acesso/consumo de dados tridimensionais a partir das respostas coletadas, e com isso, direcionar atualizações normativas para que prevejam este formato de representação.

#### 2.4.1.2 Normativas

Os parâmetros para avaliação neste trabalho são os contidos na Resolução Normativa Aneel n. 861/2019 (ainda que revogada pela Resolução Normativa Aneel n. 1005/2022) que no parágrafo único do art. 3º, estabelece que a estrutura, a formatação, as especificações técnicas e a forma de envio dos dados geográficos e técnicos da BDIT serão definidas nos Procedimentos de Rede. (Aneel, 2019).

Os Procedimentos de Rede citados são os requisitos mínimos a serem seguidos para construção da base de dados, conforme publicado pelo ONS. À época da publicação da Resolução Normativa Aneel n. 861/2019, o submódulo 2.2 intitulado “Verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos mínimos” era o documento que reunia as orientações sobre a base de dados a ser elaborada.

Com a reorganização dos módulos e submódulos determinados pela Resolução Normativa Aneel n. 903/2020, os requisitos mínimos necessários passaram a compor o módulo 7, “Integração de instalações”, especificamente no submódulo 7.3 “Verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos”.

Com base neste documento, que estabelece os critérios para nortear o mapeamento dos ativos, se realizou a análise para identificar onde a inclusão de dados tridimensionais podem ser previstos. Foram analisadas especificamente as

entidades geográficas, pois a prerrogativa oferecida pela visualização 3D contribui principalmente para melhor representar os vãos e os cabos.

### **2.4.2 Método**

Para compor o questionário foram elaboradas questões que pudessem identificar – ainda que de maneira genérica – o setor específico/empresa que respondeu à pesquisa, incluindo o tempo prévio de atuação especificamente de quem a respondeu, bem como seu conhecimento quanto ao termo tridimensional.

Este primeiro contato serve para conhecer o universo daqueles que de maneira voluntária se dispuseram a contribuir com seu viés enquanto colaborador de uma empresa de transmissão de energia.

Em relação ao acesso/consumo de dados tridimensionais o questionário solicitou informações sobre aplicação de dados 3D: se já utilizou, em qual demanda e como avalia o resultado alcançado.

Na etapa seguinte as perguntas questionaram se a representação 3D pode facilitar a interpretação dos dados. Quando julgado sim, cabia responder em qual nível (de 0 a 10) julga ser importante dispor de dados 3D para suas demandas profissionais.

Em uma abordagem sobre a utilização atual de dados 3D, as questões seguintes perguntaram: se a empresa dispõe de dados 3D; se julga que estes podem ser melhor explorados; e se percebe maior potencial de uso integrado entre os setores. Nesta etapa foi previsto espaço para indicarem em qual demanda atual avaliam ser importante aplicar representação tridimensional.

Nas questões finais o questionário leva a responder se julga que há vantagens com o uso de dados 3D e quais são elas. Em específico, a última pergunta, de resposta aberta, solicita ao participante sugerir outras aplicações futuras para este formato de dados.

Concluída a construção do questionário, passou-se à etapa de análise documental, para apresentar onde efetivamente os dados 3D poderiam ser incluídos de forma normativa. Para tanto, analisou-se a versão digital do arquivo “Verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos” pertencente ao Submódulo 7.3 (procedimental) revisado em outubro de 2022.

O documento está organizado em dois principais tópicos e um anexo, sendo eles: 1) Verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos;

2) Fornecimento, gerenciamento; e disponibilização à Aneel dos dados técnicos que compõe a BDIT; e Anexo A) Informações geográficas e características do projeto básico e como efetivamente implantadas das instalações de transmissão.

Este anexo apresenta as especificações técnicas do formato dos arquivos digitais da BDIT, indica padrões e métodos de aquisição de dados geográficos e apresenta as informações dos equipamentos a serem fornecidas ao ONS pelos agentes de transmissão no processo de análise da conformidade do projeto básico e análise da conformidade das características “como efetivamente implantadas”.

Nele, as feições estão organizadas em: entidades geográficas e não geográficas, que dizem respeito aos componentes e devem estar vinculadas às entidades geográficas. Estas correspondem à subestação e à Linha de transmissão, que pode conter torre ou ponto de referência e vão. As torres são representadas a partir da feição vetorial de ponto, os vãos representados por segmentos de reta e as subestações são representadas por polígono.

Os resultados a serem apresentados apontam o contato/consumo das concessionárias em relação aos dados 3D – inferido a partir do questionário; e sugerem inclusões no documento técnico analisado certos dos resultados que este formato de visualização tem a oferecer ao planejamento e gestão deste setor tão importante para o desenvolvimento produtivo do país.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicou-se o questionário em formulário *online* no período compreendido entre 03 e 23 de maio de 2023, direcionado à 40 contatos de *e-mail* de 20 empresas concessionárias atuantes no Brasil. Deste universo, obteve-se 15 formulários preenchidos por funcionários de 7 empresas. Nestes termos, a participação dentre as empresas consideradas foi de 35%; e as respostas encaminhadas representaram cerca de 38% do público alvo – representado pelos destinatários.

Os participantes, segundo responderam, atuam em média há 12 anos na empresa transmissora de energia, 7 deles trabalham no setor relacionado a manutenção; 5 indicaram trabalhar com geoprocessamento e geotecnologias; e os demais (3) em atividades relacionadas à gestão.

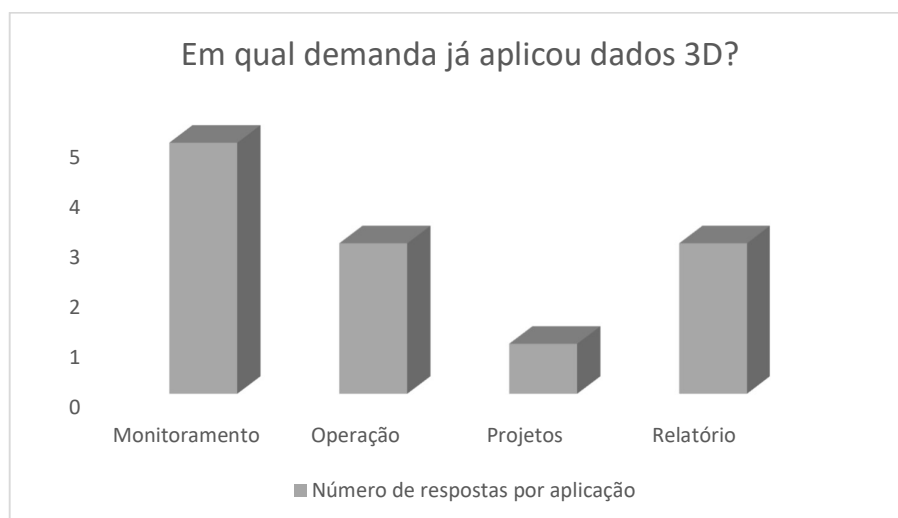
Em relação aos dados 3D, cerca de 93% conhece ou já ouviu falar de representação tridimensional (apenas 1 resposta negativa foi emitida neste sentido).

Quando questionados se avaliam que este tipo de representação pode facilitar a interpretação de dados nas demandas do setor, a resposta “sim” foi unânime.

Dos 15 participantes, 3 deles informaram que ainda não trabalharam com dados 3D em suas demandas profissionais. Para os que já aplicaram, 5 participantes indicaram usar para monitoramento de ocupações irregulares ou crescimento de vegetação em áreas de difícil acesso; 3 relacionaram com operação dos ativos; 1 mencionou novos projetos; e outros 3 relacionaram a aplicação para uso em relatórios e estudos. A

*Figura 2* apresenta a distribuição das aplicações para os participantes que já utilizaram dados 3D. Todos os que já utilizaram dados 3D responderam que os resultados foram satisfatórios.

Figura 2 – Representação das respostas para utilização de dados 3D agrupadas por setores.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Quando questionados sobre o quanto avalia ser importante ter e saber usar os dados espaciais 3D para as suas atividades profissionais, onde 0 corresponde a totalmente sem importância e 10 totalmente importante, a nota média alcançada pelos que responderam foi 8,7 de importância.

Em outra pergunta foi questionado se o participante julga que a representação 3D traz vantagens para gestão de ativos do setor. Todas as 15 respostas obtidas



informaram “sim”. Obteve-se a resposta “sim” de forma unânime também quando questionados se os dados 3D podem ser melhor explorados para gestão dos ativos.

Sobre as vantagens, as respostas foram amplas, mas de maneira geral relacionaram à gestão, indicando que os dados 3D oferecem maior previsibilidade, otimização, celeridade, objetividade, confiabilidade no resultado e mais eficiência para inspecionar o ativo desde a concepção nos projetos básicos até o fim da vida útil do ativo, além de maior clareza para as informações geoespacializadas.

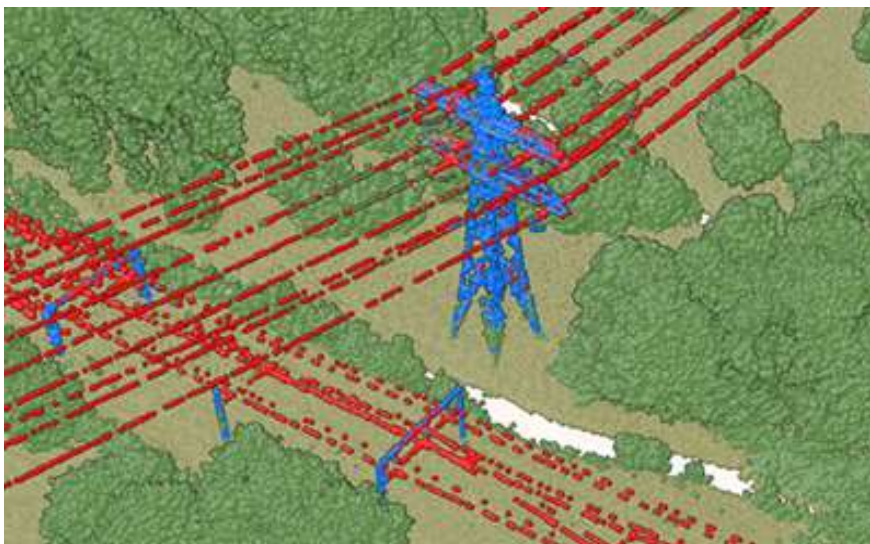
Sob aspecto financeiro, foi mencionada a economia de recursos como vantagem da representação 3D, seja nas obras para construção subestações e LTs ou nos processos de inspeção dos ativos e o favorecimento de engajamento das equipes. Algumas respostas (3) relacionaram a aplicação em BIM (Modelagem de Informação da Construção) como vantagem.

Estes tópicos mencionados pelos participantes são exatamente os aspectos pontuados por Peter Van Oosterom (2019), ao tratar dos benefícios com aplicação 3D. O autor destaca: aumento de disponibilidade, acesso, integração e compartilhamento de informações geográficas; ampliação da compreensão espacial; e uso eficiente, eficaz e econômico de dados.

Em nível operacional algumas respostas obtidas consideraram como vantagem a facilidade de identificação de interferências - este termo foi mencionado por diferentes participantes - seja para identificar o afastamento entre elementos energizados e obstáculos, ou travessia sob/sobre outras LTs.

Um exemplo desta situação pode ser observado na Figura 2, publicada por Kudinov (2019), que apresentam os resultados de uma nuvem de pontos obtida por escaneamento LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportado em uma LT localizada em uma cidade da Holanda.

Figura 3 – Nuvem de pontos LiDAR de uma LT localizada na Holanda.



Fonte: Adaptado de Kudinov (2019).

A partir da Figura 3, que representa a nuvem de pontos coletada, é possível perceber dois trechos de linhas ocupando a mesma localização em duas dimensões, mas em alturas diferentes. Em azul as estruturas permitem que seja observada a diferença de altura que separa os cabos representados em vermelho. A representação tridimensional neste caso contribui para a compreensão das condições reais existentes.

Ainda sobre as vantagens que consideram possíveis com dados 3D outras respostas destacaram benefícios para o planejamento de novas obras ou para monitoramento, apoiando cálculos de volume (seja biomassa ou solo). Foram citadas também as vantagens para identificação e análise de falhas que interessam ao setor de manutenção.

O escaneamento LiDAR foi lembrado como recurso com menor tempo de aquisição e erro, com melhora na qualidade do dado como vantagem para elaboração de manuais de operação mais realistas. Segundo o participante, dispor destes recursos pode facilitar a manutenção preditiva e corretiva de equipamentos, uma vez que esta forma de representação oferece detalhes das estruturas.

Na questão que perguntou em qual demanda atual julga ser importante aplicar a representação 3D as respostas foram diretas e em sua maioria indicaram: apoio às LTs e subestações, seja para criação de novos dados ou para espacialização dos ativos existentes; monitoramento, tanto para previsão de supressão de vegetação,

identificação de invasões ou delimitação de distância de segurança; e processos de simulação de manutenção.

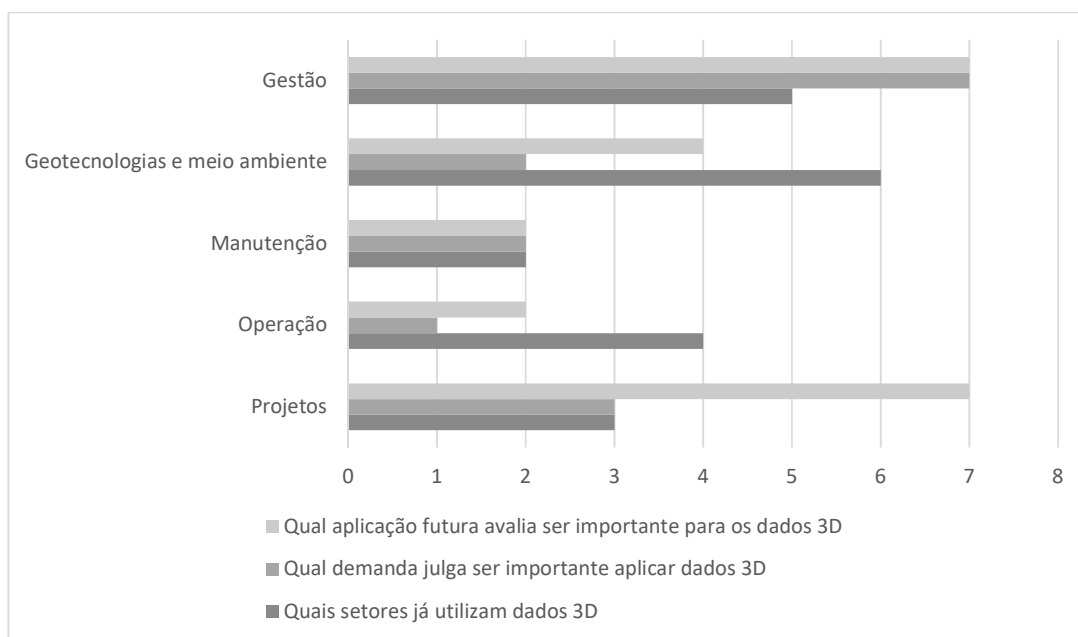
Outras aplicações sugeridas envolvem os dados 3D como recurso para substituir as inspeções terrestres anuais; e reduzir a necessidade de mão de obra nas atividades perigosas ou cotidianas. Além disto, foi mencionado que dispor de dados 3D e apresentá-los de forma corporativa agrega de valor de imagem, destacando a empresa frente às demais concorrentes.

Um contraponto à aplicação de dados 3D foi mencionado por um dos participantes, sugerindo que atualmente os investimentos são ainda muito altos considerando equipamento, treinamento e pessoal, que quase nunca representam uma redução de custo efetivo. O participante, porém, indica o uso do LiDAR para manutenção de faixas de servidão (distâncias da vegetação e identificação de invasões) e o BIM para a melhoria dos processos de manutenção de equipamentos e estruturas como tecnologias viáveis.

Buscando conhecer o atual estágio de consumo e a visão para aplicações futuras, o questionário lançou as últimas questões, sendo elas: quais setores atualmente utilizam os dados 3D; se percebe potencial de maior uso integrado entre os setores; se julga que os dados 3D são importantes para o desenvolvimento de pesquisas setor elétrico; e como visualiza a aplicação futura de dados 3D.

Dentre as principais questões, destacam-se três delas, representadas na Figura 4, que agrega uma visão sobre o que já está consolidado: quais setores na empresa utilizam os dados 3D; o que é percebido atualmente: em qual demanda julga ser importante aplicar a representação 3D; e como visão a longo prazo: como visualiza a aplicação futura.

Figura 4 – Representação das últimas respostas agrupadas por setores.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A partir da ilustração elaborada com base no agrupamento das respostas é possível inferir que o setor que mais utiliza dados tridimensionais é o de geotecnologias e meio ambiente, porém os participantes julgam ser importante aplicá-los nas demandas de gestão. Para aplicação futura foram indicados com o mesmo nível de projeção aplicar dados 3D para gestão, seguindo a tendência atual, mas também para a área de projetos, provavelmente para novos empreendimentos.

Sobre o uso integrado dos dados 3D entre os setores, todos os participantes foram unânimes em responder que existe potencial. Todos também consideraram tratar-se de uma fonte importante de dados para o desenvolvimento de pesquisas, seja para melhoria da gestão de ativos e refinamento de projetos, seja para simplificar o entendimento a partir da visão espacial das estruturas.

A partir das respostas obtidas, percebe-se que as empresas estão em contato com tecnologias atuais para aquisição de dados 3D, e estão atentas às possibilidades de aplicação para gerenciamento de ativos, seja em nível operacional ou em termos de planejamento e projeto.

Com o diagnóstico de acesso/consumo de dados 3D, depreende-se que estes já são realidade das concessionárias – ainda que em universo limitado ao alcançado pelo questionário. A tecnologia LiDAR mencionada inúmeras vezes em diferentes

respostas foi relacionada como sistema de aquisição e manipulação de dados que tende a se expandir e se tornar referência em termos de volume de dados e aplicações.

Para Munir; Awrangjeb; Stantic, (2023) o escaneamento a laser a partir de plataformas aéreas e terrestres estão se desenvolvendo cada vez mais e certamente serão usadas para desenvolver métodos de monitoramento eficazes, flexíveis e automatizados em termos comerciais para atendimento de diferentes demandas relacionadas à gestão das LTs.

No Brasil a utilização destas tecnologias já é realidade no setor elétrico com motivação devido à publicação da Resolução Normativa Aneel n. 861/2019, conforme divulgado pela Eletrobras Chesf. A nota descreve que a Companhia atuou no levantamento e validação das informações geográficas dos ativos que somam mais de 120 TB (*terabyte*) de dados que foram adquiridos através de aerolevanteamento e tecnologia laser scanner com precisão submétrica, em atendimento à Resolução que regulamentou a BDIT (Eletrobras Chesf, 2021).

A criação de um número expressivo de dados em um pequeno espaço de tempo exige regramento específico para seu gerenciamento. Segundo apontam as pesquisas de Yang *et al.* (2022), à medida que se aplicam novas tecnologias – ágeis e minuciosas, é importante que se esteja preparado para o volume de dados a ser gerado. Trata-se de um desafio coordenar os 5 “v” (volume, variedade, velocidade, veracidade e valor) do *big data* geoespacial (Yang *et al.*, 2022).

É consenso que a ausência de parâmetros técnicos impedem o gerenciamento de dados espacializados e este é um dos motivos que incentivou a criação de protocolos de padronização em alguns países, como a diretiva INSPIRE (Infraestrutura de Informação Espacial na Comunidade Europeia) publicada em sua primeira versão no ano de 2007 e o desenvolvimento de formatos interoperáveis para gerenciar e armazenar dados 3D.

Segundo Hübner, Oliveira e Santo (2015), na maioria dos países a criação de uma Infraestrutura de Dados Espaciais - IDE teve como objetivo ordenar as bases de dados geográficos, viabilizar sua divulgação e possibilitar o compartilhamento destes dados. A INSPIRE em específico buscou ordenar a base cartográfica de 27 países utilizando a parcela cadastral como dado de vinculação entre os 34 mapeamentos temáticos estabelecidos, entre eles o setor de energia (Hübner, Oliveira e Santo, 2015).

No Brasil, o Decreto Federal n. 6666/2008, instituiu a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) e dentre outras especificações, descreve como deve ser construída a base para pequenas escalas do setor de energia e comunicações. Apesar da inclusão, nada consta em relação aos dados em grande escala - de modo que coube à Aneel, por meio da Resolução Normativa n. 861/2019, publicar os termos para a criação de uma base de dados de transmissão para atender esta lacuna.

Neste caso, a INDE fica restrita aos projetos com menor detalhamento, cabendo às concessionárias/Aneel/ONS estabelecer a Base de Dados dos ativos de transmissão, sendo atualmente limitado à consulta interna destes órgãos, por isso depende deles a decisão de incorporar dados 3D às normativas para representar os ativos de forma tridimensional.

Para tornar a iniciativa factível é fundamental reunir um mínimo de requisitos para garantir confiabilidade aos dados tridimensionais gerados, uma vez que representarão um dos setores mais estratégicos do ponto de vista econômico e social no país. Nestes termos, o segundo resultado da pesquisa oferece subsídios ao apresentar a avaliação do documento técnico “Verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos” (procedimental) versão de outubro de 2022, que orienta as formas mapeamento da BDIT.

A análise teve o sentido de indicar onde caberia incluir a representação tridimensional de feições, justificando os ganhos com visualização 3D para gestão dos ativos. As principais sugestões se concentraram nos tópicos do anexo A do referido documento, que trata da “LT em geral”, pois é onde efetivamente a tridimensionalidade se faz necessária em termos de representação.

No item que descreve “Travessia” o subitem 30 – Travessia sobre obstáculo, solicita-se que as informações sejam apresentadas em formato numérico (unidade métrica) na etapa de “como implantado” limitado a descrever a menor distância vertical entre a LT e o obstáculo. A Figura 5 apresenta o recorte do documento evidenciando o subitem 30.

Figura 5 – Recorte do Procedimento de Rede, subitem 30.

| DESCRIÇÃO                      |                                                              | TIPO DE DADO                                                   | PROJETO BÁSICO | COMO IMPLANT. |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------|---------------|
| 30 - Travessia sobre obstáculo | 30.1 - Nome do obstáculo                                     | Alfanumérico                                                   | sim            | sim           |
|                                | 30.2 - Tipo do obstáculo                                     | Lista de opções (Águas navegáveis, Rodovia, Ferrovia ou Outro) | sim            | sim           |
|                                | 30.3 - Número da estrutura mais próxima da LT em projeto     | Número                                                         | não            | sim           |
|                                | 30.4 - Menor distância vertical entre a LT e o obstáculo (m) | Número                                                         | não            | sim           |

Fonte: Adaptado de ONS (2022).

Neste caso, a representação numérica não facilita a compreensão do entorno, tampouco quão representativa é esta distância frente a relevância dos dados. Apresentar o vão com recursos tridimensionais torna-se a informação acessível por oferecer uma visão realista, principalmente aos setores que não tem rotina no campo.

No mesmo item “LT em geral”, no subitem 52 – Estrutura Típica são solicitadas algumas distâncias entre o cabo e o solo, mas nestes casos esta altura é variável. Próximo às torres que sustentam os cabos a altura é maior se comparada à porção onde eles estão mais afastados das torres, devido ao peso e necessidade de catenária. Por isso, em um mesmo vão tem-se distâncias variáveis em relação ao solo - menor distância quando afastado da torre, maior distância quando está próximo a elas. A Figura 6 apresenta o recorte do documento evidenciando o subitem 52.

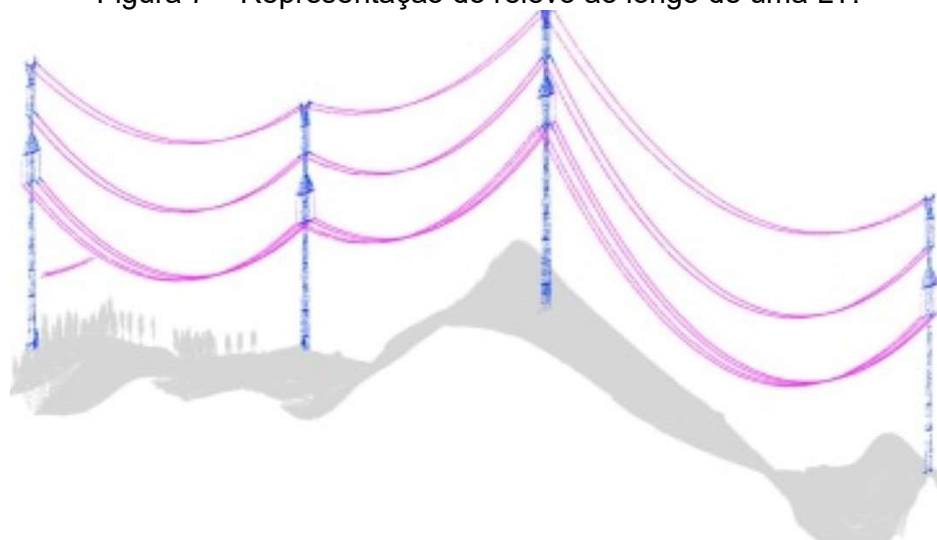
Figura 6 – Recorte do Procedimento de Rede, subitem 52.

| DESCRIÇÃO             |                                                        | TIPO DE DADO                                              | PROJETO BÁSICO | COMO IMPLANT. |
|-----------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------|---------------|
| 52 - Estrutura Típica | 52.1 - Nome da estrutura                               | Lista de opções (Série de Estruturas)                     | sim            | sim           |
|                       | 52.2 - Vão médio (m)                                   | Número                                                    | sim            | sim           |
|                       | 52.3 - Flecha do cabo condutor (m)                     | Número                                                    | sim            | sim           |
|                       | 52.4 - Temperatura de referência do cabo condutor (°C) | Número                                                    | sim            | sim           |
|                       | 52.5 - Flecha do cabo para-raios (m)                   | Número                                                    | sim            | sim           |
|                       | 52.6 - Distância cabo-solo (m)                         | Número                                                    | sim            | sim           |
|                       | 52.7 - Resistividade média do solo ( $\Omega$ m)       | Número                                                    | sim            | sim           |
|                       | 52.8 - Características técnicas <sup>(2)</sup>         | Arquivo Anexo (Detalhamento Completo da Estrutura Típica) | não            | sim           |

Fonte: Adaptado de ONS (2022).

Somada a esta condição variável, têm-se o relevo, pois ao longo do vão podem existir irregularidades que não permitem que haja apenas uma distância (solo-cabos) a ser descrita ao longo de um vão, como pode ser observado na Figura 7, retirada dos estudos de Ortega et al. (2019).

Figura 7 – Representação do relevo ao longo de uma LT.



Fonte: Adaptado de Ortega et al. (2019).

A Figura 7 apresenta os cabos representados na cor magenta, as torres em cor azul e a superfície em cinza. Neste caso, a representação 2D não permitiria que a realidade fosse interpretada como de fato se consolida, ao passo que na Figura 7 facilmente se observam as diferenças de altura (solo-cabo) ao longo do vão, seja em função do relevo ou da catenária.

O mesmo se aplica aos demais itens que estão relacionados na tabela que descreve “Torre de LT” (subitens 14 e 16) que abordam respectivamente a Distância vertical condutor-solo na estrutura e a Altura da estrutura (altura total da estrutura). A Figura 8 apresenta o recorte do documento evidenciando os subitens citados.

Figura 8 – Recorte do Procedimento de Rede, subitens 14 e 16.

| DESCRIÇÃO                                                | TIPO DE DADO                   | PROJETO BÁSICO | COMO IMPLANT. |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|---------------|
| 14 - Distância vertical condutor-solo na estrutura (m)   | Número                         | não            | sim           |
| 15 - Fase mais próxima do solo                           | Lista de opções (I, II ou III) | não            | sim           |
| 16 - Altura da estrutura (m) - Altura total da estrutura | Número                         | não            | sim           |

Fonte: Adaptado de ONS (2022).



As inclusões tridimensionais sugeridas devem ser orientadas em documentos normativos que prevejam sua padronização. É fundamental garantir um mínimo regramento técnico para garantir a interoperabilidade e o compartilhamento entre as feições mapeadas, ainda que os dados estejam restritos ao acesso da própria concessionária, da Aneel e do ONS, nos termos já praticados.

As prescrições técnicas devem considerar que existem desafios de diferentes naturezas considerando a projeção volumétrica de dados, que pode provocar oclusão - incapacidade de ver outros dados “atrás” do plano que está sendo observado.

As particularidades demandam treinamento dos usuários para utilizarem as ferramentas em novas plataformas aplicando níveis de transparência, visualizações parciais para permitir que os usuários examinem em detalhes (Peter van Oosterom, 2019).

Normatizar minimamente – prevendo de maneira espontânea a inclusão deste formato de representação – ou estabelecer prazos coerentes para promover o amplo desenvolvimento tridimensional é um caminho para que o setor compatibilize o nível de dados que dispõe à base de dados que está sendo construída.

A representação 3D, tão utilizada em demandas de engenharia e arquitetura - também devem compor o arcabouço de técnicas para representar os ativos do setor elétrico partindo-se dos benefícios de se dispor de dados mais apurados e representativos como aliados ao processo de gestão das LTs.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados 2D não são suficientes para descrever intuitivamente as particularidades do sistema de transmissão. A representação realista aplicada em diferentes áreas do conhecimento está avançando em dispositivos móveis com as tecnologias de realidade virtual e aumentada.

Nos moldes do que será apresentado no capítulo 5 deste documento, dispor de representação realista de elementos inseridos no local que se relacionam expande as possibilidades de interpretação e análise em diferentes temáticas como as exploradas nos capítulos 3 e 4 que compõem igualmente a presente tese.

É neste contexto que se reforça tratar-se de uma decisão acertada dispendir esforços na temática 3D. As novas tecnologias para aquisição de dados já aplicadas pelo setor permitem representar a estrutura física do sistema de transmissão e

também identificar detalhes sobre o terreno e a vegetação circundante, todos eles em três dimensões.

Apesar do consumo de dados tridimensionais (conforme depreende-se do formulário), ao não os compartilhar na Base de Dados das instalações de Transmissão, limita-se o potencial de gerenciamento mesmo sendo consenso científico sua importância no contexto de planejamento e gestão.

A ausência de previsão normativa para orientar o processo (parâmetros, formatos, qualidade, atualização) passa a incentivar a subutilização ou pelo menos retardar o processo de aplicação pela própria empresa que dispõe do dado.

A “popularização” da tridimensionalidade no setor pode contribuir não somente nas demandas de transmissão, mas também com a geração, principalmente tratando-se das estruturas solares e eólicas, que muito dependem desta representação para avaliação tanto potencial quanto restrições de diferentes ordens.

Neste contexto é fundamental que as normativas do setor estejam atentas à necessidade de orientação técnica para disseminação de informações tridimensionais garantindo a qualidade para os dados que representarão esta que é uma das infraestruturas de maior evidência quando se trata de economia e desenvolvimento nacional.

### 3 DETECÇÃO DE MUDANÇAS A PARTIR DE IMAGEAMENTO POR RADAR<sup>2</sup>

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Diferentes empresas ligadas ao setor elétrico têm discutido melhores formas de agir frente às ocupações irregulares. O tema vem ganhando cada vez mais relevância e adquirindo um caráter estratégico no ambiente corporativo, que têm ampliado seus investimentos no uso de geotecnologias e imagens de satélites para gerenciar seus ativos.

Neste vasto universo do sensoriamento remoto, as imagens de radar ganharam espaço em muitas pesquisas nas mais diversas áreas, em parte incentivado pela disponibilidade de novos sensores (Tamiminia *et al.*, 2020). Os de abertura sintética (SAR) são imageadores ativos que operam na região de micro-ondas do espectro eletromagnético. O sistema transmite radiação e registra o sinal retroespalhado do alvo criando uma apresentação semelhante a uma imagem 2D da área imageada (Matikainen *et al.*, 2016).

Vreugdenhil *et al.* (2019) afirmam que, com o lançamento da série de satélites Sentinel do Programa de Observação da Terra chamado Copernicus, vinculado à *European Space Agency* (ESA), especialmente com o Sentinel-1, passou-se a contar com imagens com resolução temporal e espacial sem precedentes.

Apesar das particularidades das imagens SAR, a gratuidade de cenas do sensor Sentinel-1 e de softwares de processamento justificam sua aplicação para as mais variadas demandas (Lohberger; Stängel; Atwood; Siegert, 2017); (Washaya; Balz; Mohamadi, 2018). Dentre estas, a detecção de mudanças tem sido um campo de pesquisa ativo em sensoriamento remoto há certo tempo (Jianya, *et al.* 2008), abordada em vários campos de interesse: monitoramento humanitário, crescimento urbano, análise comercial, entre outros (Navaro; Trabelsi; Saporiti, 2018).

O princípio é o mesmo aplicado em pesquisas brasileiras desenvolvidas por Rodrigues *et al.* (2019), que visou detectar o desmatamento da cobertura vegetal do Cerrado. O processo exige que sejam definidos, no mínimo, dois momentos comparáveis, um primeiro que representa uma condição adotada como inalterada, e

---

<sup>2</sup> Parte das pesquisas relacionadas neste capítulo foi apresentada no evento internacional IEEE PES T&D Conference & Exposition realizado em 2022 na cidade de New Orleans/Luisiana (EUA).

um segundo que representa a condição mais recente, permitindo que sejam identificadas as alterações neste lapso de tempo.

Existem diferentes processos matemáticos para proceder com a comparação entre as imagens. As pesquisas de Shaoqing e Lu (2008) apontam que, do ponto de vista da precisão, a aplicação do método de proporção é mais confiável que a imagem gerada pelo método de subtração.

No método de proporção um valor de *pixel* de uma imagem é dividido pelo *pixel* correspondente de outra imagem – do mesmo local, mas de diferentes períodos. Se os *pixels* correspondentes tiverem o mesmo valor, entende-se que não houve mudança. Na região alterada, a proporção será muito maior do que 1 ou muito menor que 1, de acordo com a direção das mudanças (Hardin; Jackson; Otterstrom, 2007). Não há mudança detectada quando o *pixel* resultar no valor 1.

Nestes termos, a proporção da imagem refletirá: mudança simples; ou pontos sem mudança; ou mudança significativa positivas; ou negativas para indicar as mudanças, mas um valor limite é necessário para selecionar a definição de significativo (Shaoqing; Lu, 2008).

### 3.2 JUSTIFICATIVA

Dentre os sensores SAR que disponibilizam imagens gratuitas está a missão Sentinel-1. Trata-se de um sistema de abertura sintética polarimétrica dupla, que resulta em um melhor reconhecimento dos alvos. O sensor atua em trajetória sincronizada com o sol, quase-polar e circular (Esa, 2021)

As respostas para detecção de mudança obtidas a partir das imagens SAR registradas pelo sensor Sentinel-1 podem auxiliar no processo de monitoramento de uma LT para sugerir alteração significativa, direcionando as equipes de campo para fiscalização *in loco*. O material produzido, atualizável sistematicamente em função da resolução temporal do sensor, nestes termos, passa a ser um aliado para que se identifiquem áreas com indicativo de mudança.

O primeiro satélite da constelação a entrar em operação foi o Sentinel-1A, em 2014, seguido do Sentinel-1B em 2016 ambos sensores SAR. Segundo Tamiminia *et al.* (2020), desde sua disponibilidade, uma tendência crescente no uso destes produtos tem sido observada. Ambos os satélites, Sentinel-1A e Sentinel-1B, partilham a mesma órbita com uma diferença de fase de 180°. Com os dois satélites

em operação, a repetição do ciclo é de 6 dias e desta forma a constelação passa a ter uma frequência de repetição com visada ascendente e descendente. (GEE, 2020).

O período de revisita é um fator-chave para identificar a dinâmica de determinado ambiente, fundamentais para garantir boas respostas para o adequado monitoramento. Além disto, a gratuidade para acessar as imagens torna sua aplicação mais viável economicamente, considerando o apelo atualizável do modelo - alcançado pelo intervalo curto entre um imageamento e outro em uma mesma área.

A proposição apoia o processo de planejamento e tomada de decisão para evitar que as ocupações avancem sobre as áreas ao longo do sistema de transmissão que possuem restrições de utilização, subsidiando, desta forma, a gestão territorial sob este aspecto.

### 3.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Muitos são os parâmetros que podem potencializar as análises a partir de imagens SAR e por este motivo, o uso desta tecnologia tem se popularizado, impulsionado pela ampliação do número de sensores em órbita, cada vez mais voltados às observações terrestres (Moreira *et al.* 2013).

O imageamento por radar se aplica a uma infinidade de demandas, incluindo mapeamentos 2D, 3D e 4D (Moreira, *et al.*, 2013). Tais insumos também oferecem bons resultados para detecção de mudança, pois garantem uma forma confiável, contínua e global de monitorar os processos dinâmicos na superfície da Terra (Navaro; Trabelsi; Saporiti, 2018).

As particularidades e diferenças das imagens SAR em relação as imagens ópticas exigem que haja familiaridade do usuário com as técnicas de Sensoriamento Remoto (Providelo; Arrais, 2017), uma vez que os dados são exibidos em termos de valores de intensidade e amplitude (Moreira *et al.* 2013).

Neste processo, existem adequações que devem ser realizadas nas imagens brutas para que se possa alcançar um resultado mais compreensível em termos de interpretação. Algumas correções aplicadas estão especificadas nos metadados do produto, para que as imagens de radar de diferentes datas, sensores ou geometrias sejam comparáveis entre si (Veci; Braun, 2021).

A aquisição de imagens pelos radares se dá de maneira distinta dos sensores óticos, pois registra as imagens em visada lateral com direção de iluminação

geralmente perpendicular à linha de voo, a partir de uma faixa contínua ao longo da trajetória do satélite (Esa, 2021). Neste processo, também são diferenciais construtivos do sensor a polarização, que corresponde a figura geométrica que o vetor descreve no espaço, podendo ser elíptica, circular ou linear. Segundo Kuplich (2017), os radares imageadores em geral trabalham com polarização linear, que pode ser Vertical ou Horizontal (V ou H). A co-polarização VV e HH emite e recebe sinal na mesma polarização, seja horizontal-horizontal ou vertical-vertical. A polarização cruzada VH e HV emite na posição vertical e recebe na posição horizontal ou emite na posição horizontal e recebe na posição vertical.

Outros efeitos adversos da arquitetura do sistema provocam uma textura granulada na imagem, chamado *speckle* (Esa, 2020), dificultando a interpretação. O ruído causa variação pseudo-aleatória das intensidades de radar observadas, e é uma característica inerente da radiação coerente usada nas imagens SAR (Matikainen *et al.*, 2016).

Mesmo demandando alto desempenho computacional para minimizar tais particularidades, este tipo de sensor oferece produtos independente do período do dia e das condições atmosféricas (Moreira, *et al.* 2013), vantagens fundamentais em relação às imagens ópticas, já tão fortemente exploradas em diferentes pesquisas, mas que possuem limitador de visibilidade, principalmente nas regiões tropicais onde a incidência de nuvens é recorrente. Para Matikainen *et al.* (2016) este é o benefício mais importante das imagens SAR e as torna particularmente interessantes para aplicações que demandem monitoramento constante.

Esta condição, atrelada à alta resolução temporal justificam sua aplicação para detecção de mudanças, como aplicado nos estudos de Shaoqing e Lu (2008), que discutiu formas de analisar o processo e a tendência de mudanças.

Para os autores a detecção de mudança é uma tecnologia que, a partir dos dados de observação (imagens), apura as mudanças dentro de um determinado intervalo de tempo. Para Jianya *et al.* (2008), abordagens de detecção de mudanças podem ser caracterizadas em dois grandes grupos, bi-temporal, que mede as mudanças com base em uma escala de tempo de duas “épocas”, e trajetória temporal, que analisa as mudanças com base em uma escala de tempo contínua.

O processo de comparação apoia-se na posição de cada *pixel* nas duas imagens. O quociente da aritmética provoca uma estatística para determinar se uma

mudança ocorreu ou não entre as duas datas de aquisição naquela posição (GEE, 2021).

Para Shaoqing e Lu (2008) a proporção de imagens é um método que mais se aproxima da realidade quando comparado à subtração das cenas. Segundo os autores, a divisão se aplica à detecção de mudanças em áreas urbanas, sendo muito útil para a extração de detalhes de vegetação e texturas.

As cenas de interesse podem ser combinadas no processo de detecção de mudança, por meio de ferramentas próprias oferecidas nos softwares de processamento como para apontar a diferença em nível de *pixel*.

O processo automatiza a detecção de alterações entre as imagens selecionadas, sejam elas antrópicas ou naturais. O produto resultante indica onde foram detectadas mudanças significativas, mas significativo não implica necessariamente em interessante. Nestes termos, a avaliação é sensível à interpretação, devendo ser respeitado o contexto e os valores de intervalo considerados para alcançar uma resposta efetiva para mudança.

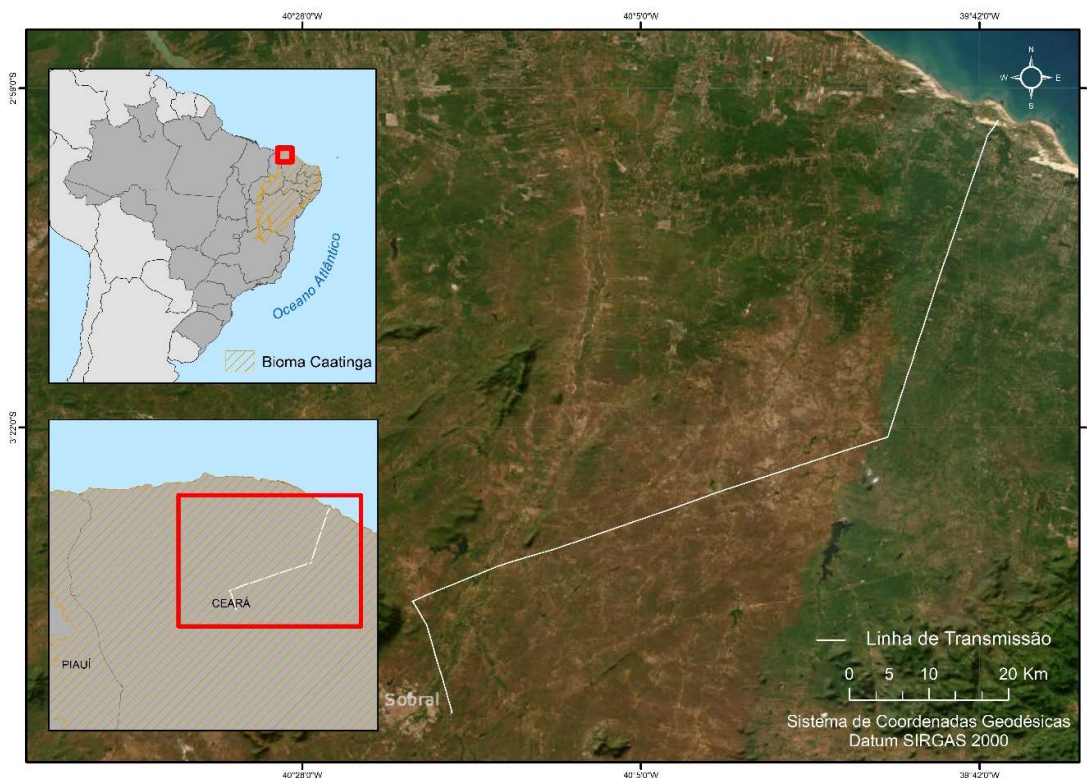
Este é o princípio utilizado para identificar áreas que sofreram alteração de uso do solo, principalmente para padrão de edificações próximo a LT. Como modelo é possível obter um resultado atualizado em função de cada revisita, que aponte as áreas onde são percebidas maiores alterações, direcionando as equipes de campo para fiscalizações *in loco*.

O potencial tende a contribuir com a identificação prévia às ocupações indevidas, uma vez que por apoiarem-se em insumos gratuitos, podem ser atualizados a cada revisita do satélite. Por se tratar de imagens de radar não há interferência climática e por isso a sistemática de aquisição de imagens é possível, permitindo que se alcance um material direcionador a cada 12 dias para a latitude de pesquisa.

### 3.4 ÁREA DE ESTUDO

Para aplicação dos estudos buscou-se um traçado próximo às áreas já estabelecidas e do qual se tenha acesso às informações. Tais requisitos foram atendidos pela Linha de Transmissão (LT) Icaraizinho, que transmite a energia em 230kV gerada pelo parque eólico pertencente ao Grupo CPFL. A LT está localizada no estado do Ceará, nordeste brasileiro, inteiramente no bioma Caatinga, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Localização e traçado da LT Icaraizinho, pertencente ao bioma Caatinga.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

São 241 torres distribuídas ao longo de 119 km de extensão entre a subestação Sobral III e a subestação Icaraizinho nos municípios de Sobral e Amontada, respectivamente. A pesquisa procura somar-se aos estudos aplicados no bioma Caatinga, que apesar de ser exclusivamente brasileiro, é um dos que recebe menor atenção da comunidade científica.

Os limites do bioma abrangem cerca de 10% do território nacional e nele se concentra uma população estimada em 28 milhões de habitantes. (Ganem *et al.*, 2020). Segundo os autores poucas são as pesquisas apoiadas em sensores orbitais imageadores e em técnicas de classificação de imagem, dentre outros recursos geotecnológicos para identificar e mapear a Caatinga. O estudo demonstrou que o restrito universo de estudos envolvendo o bioma limita-se a explorar imagens ópticas, sobretudo da série Landsat, com algumas pesquisas recentes com Sentinel-2, que é óptico (Ganem *et al.* 2020)

Dados cartográficos da Caatinga em escala de bioma a partir de imagens de radar só foram produzidos no país pelo projeto RADAMBRASIL realizado de 1975 a



1985 (Ganem *et al.*, 2020), evidenciando serem pesquisas recentes no contexto para a região. O presente estudo, ainda que não pesquise em específico sobre o bioma, pelo menos figura como mais uma iniciativa que direciona as atenções à gestão territorial neste ambiente expressivo em termos de extensão e importância nacional.

### 3.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O processamento de detecção de mudança, nos termos sugeridos, exige que sejam escolhidas duas imagens SAR para que seja possível o efeito comparativo. A escolha está detalhada no subitem que segue apresentado.

#### 3.5.1 Materiais

Os produtos do Sentinel-1 podem ser adquiridos em quatro modos distintos: SM (*Stripmap Mode*), IW (*Interferometric Wide Swath Mode*), EW (*Extra-Wide Swath Mode*) e WV (*Wave Mode*). A principal diferença é a largura de faixa imageada e a resolução espacial. O modo de aquisição mais utilizado é o IW, conforme destacado por Saraiva (2015). A

Tabela 1, adaptada de Esa (2020), apresenta os detalhes.

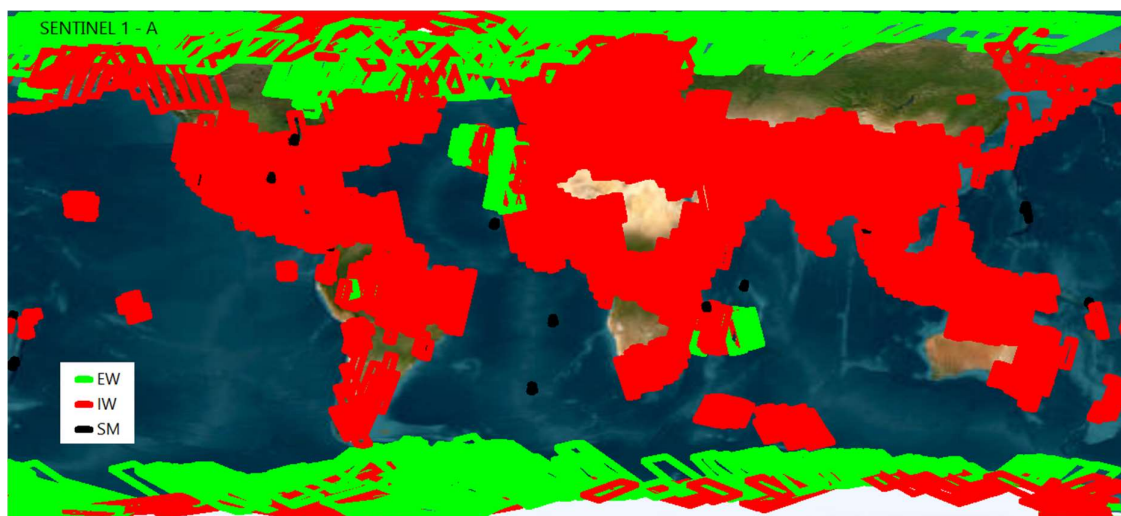
Tabela 1 – Detalhes sobre os produtos do satélite Sentinel-1.

| Modo                                   | Ângulo Incidente | Resolução Espacial | Largura da Faixa | Polarização        |
|----------------------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| <b>Stripmap (SM)</b>                   | 20° - 45°        | 5 x 5 m            | 80 km            | HH/HV, VV/VH,HH,VV |
| <b>Interferometric Wide Swath (IW)</b> | 29° - 46°        | 5 x 20 m           | 250 km           | HH/HV, VV/VH,HH,VV |
| <b>Extra-Wide Swath (EW)</b>           | 19° - 47°        | 20 x 40            | 400 km           | HH/HV, VV/VH,HH,VV |
| <b>Wave (WV)</b>                       | 22° - 35°        | 5 x 5              | 20 x 20 km       | HH, VV             |
|                                        | 35° - 38°        |                    |                  |                    |

Fonte: Adaptado de Esa (2020).

De maneira geral o modo interferométrico é destinado às áreas terrestres, mas também opera sobre mares e áreas polares. Um registro da cobertura do Sentinel-1-A em seus diferentes modos de aquisição é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Imageamento Sentinel-1A.



Fonte: Elaborado pela autora com dados Esa (2021) e *basemaps* do ArcGIS 10.4.

Os polígonos vermelhos na Figura 10 indicam a atuação do satélite A no modo IW, que abrange grande parte dos continentes. O modo *EW* está destacado em verde e o modo *SM* em preto na Figura 10. O registro da cobertura do Sentinel-1B é igualmente apresentado Figura 11.

Figura 11 – Imageamento Sentinel-1B.



Fonte: Elaborado pela autora com dados Esa (2021) e *basemaps* do ArcGIS 10.4.

Os polígonos vermelhos na Figura 11 indicam a atuação do satélite B da missão no modo IW, que recobre as demais regiões do Brasil não atendidas pelo satélite A. O modo *EW* está destacado em verde e modo *SM* destacado em preto.

É importante reforçar que dentre as particularidades dos produtos Sentinel-1 especialmente os adquiridos através dos modos IW, estão os três níveis de processamento: Nível-0, Nível-1 e Nível-2. Os produtos do Nível-0 consistem em dados brutos. Estes produtos são a base a partir da qual os produtos de alto nível são produzidos. Tecnicamente o conceito de imagem só é introduzido após o processamento de Nível 1, que reorganiza as amostras de Nível 0 em intervalos de armazenamento (Esa, 2020).

As etapas de processamento envolvidas para produzir produtos de Nível 1 incluem processamentos para geração de produtos SLC (*Single Look Complex*) e GRD (*Ground Range Detected*). Os produtos SLC são amostras complexas que preservam a informação de fase necessárias para calcular a coerência (Esa, 2020).

No formato GRD o produto tem *pixels* de resolução espacial aproximadamente quadrados com *speckle* reduzido a partir do processo *multilook*, ou seja, o produto já incorpora alguns processos necessários à facilitação da análise.

É importante frisar que apesar dessas otimizações, os produtos GRD oferecem apenas a intensidade dos alvos detectados, conforme descrito por GEE (2020). Apesar disto, trata-se da variável necessária, e por isso suficiente para avançar com a detecção de mudanças.

Nestes termos estes são os insumos aplicados no processo de detecção de mudança a partir da ferramenta *change detection* do software SNAP (*Sentinel Applications Platform*) também desenvolvido pela Esa (*European Spatial Agency*).

### 3.5.2 Método

As etapas que compõem o método proposto iniciam com o processo de aquisição das imagens, em função dos filtros estabelecidos. Na sequência parte-se para o pré-processamento das imagens, devido às particularidades inerentes ao sistema SAR. Ao final, com as imagens readequadas, parte-se para a aplicação da ferramenta para processamento das diferenças entre as duas imagens selecionadas.

### 3.5.2.1 Aquisição

Foram adquiridas as imagens do Sentinel-1 que compreendem parte do traçado da LT Icaraizinho. Uma cena foi definida para ser o padrão, aqui chamada T0, utilizada como referência de comparação com a cena mais recente, T1, sobre a qual será indicada mudança em relação à anterior (T0). No contexto de detecção de mudança o adequado é escolher a data da imagem T1 a mais recente disponível, para que se alcancem resultados mais atuais em relação à dinâmica do local.

Ao acessar o *site*<sup>3</sup> da ESA, onde são mantidas as imagens de toda a constelação Sentinel para *download*, é importante prezar por alguns parâmetros de busca, conforme visto em etapas anteriores: definir o modo de aquisição e o tipo de imagem, que no caso da pesquisa será IW; priorizar as imagens *Ground Range Detected* – GRD e de nível 1, que já vem algumas correções prévias incorporadas, com pixel de 10m x 10m em Alta Resolução (*HR - High Resolution*).

A escolha da data de captura, tanto para T0 quanto para T1, deve evitar coincidir com períodos de chuva, pois aumento da umidade que resulta em maior refletividade e menor retroespalhamento do alvo, devido à influência da constante dielétrica (KUPLICH, 2017).

Por alterar o retroespalhamento pode indicar mudanças que não sejam significativas do ponto de vista de mudança. Neste caso, é necessário observar a dinâmica sazonal, pois as condições meteorológicas locais presentes durante o tempo de aquisição da imagem podem afetar os resultados, fator que deve ser considerado para a escolha das cenas a serem utilizadas.

A LT Icaraizinho, por se localizar na Caatinga, está menos suscetível a eventos de chuva, visto que o bioma tem por característica manter longos períodos de seca - de seis a onze meses dependendo do local (Ganem *et al.*, 2020) com período chuvoso curto, geralmente de janeiro a maio. Ainda assim, para selecionar imagens sem chuvas, utilizou-se um código previamente preparado no *Google Earth Engine* (GEE) a partir de linguagem em *script*, que aponta se houve chuvas para uma data definida.

O código se baseia nos registros do Satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*) que detecta precipitação de chuva ou neve em todo o globo terrestre.

---

<sup>3</sup> <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

A representação dos volumes é projetada em cores sobre a área visualizada – onde não há indicação de cor entende-se não ter sido detectada precipitação.

A cena T0 escolhida foi adquirida em 26 de setembro de 2020, época compreendida no período seco do bioma Caatinga, sem registro de chuvas para o dia da captura e para três dias anteriores a este, conforme registrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Recortes da plataforma *Google Earth Engine* para a data T0.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

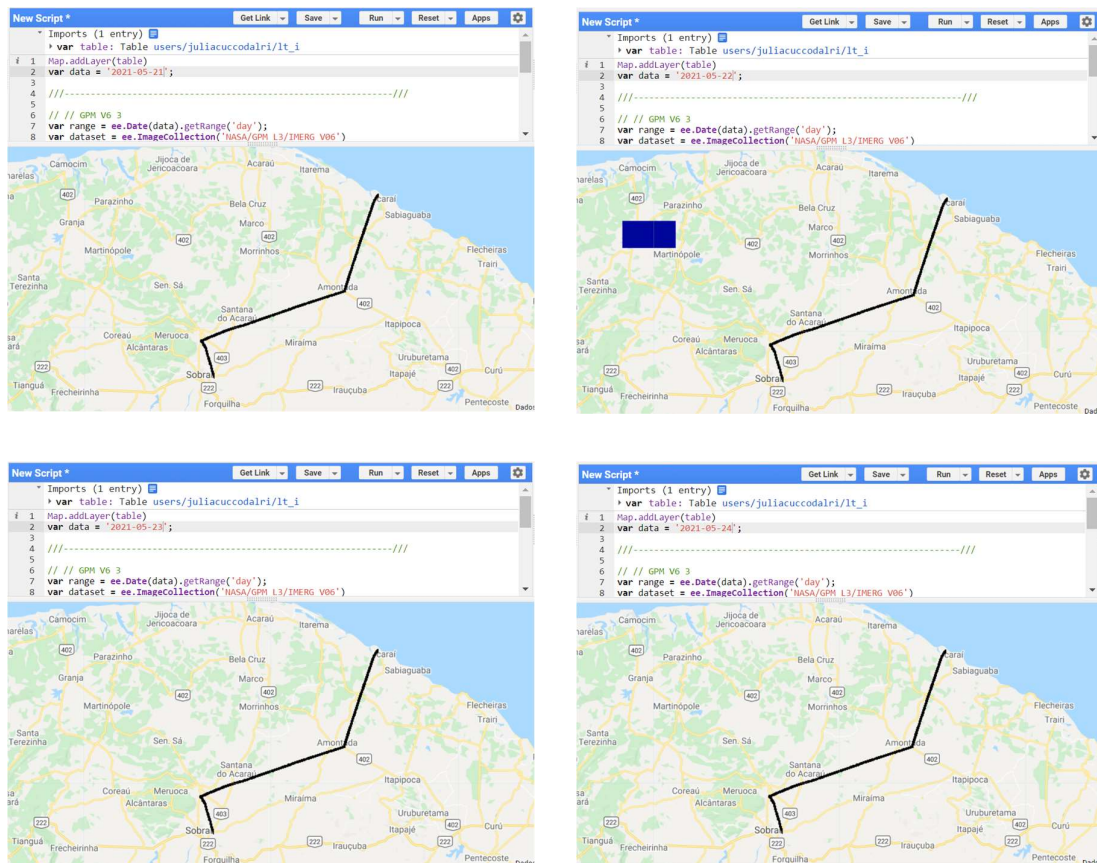
O Quadro 1 apresenta os registros de 23/09/2020 à esquerda superior; de 24/09/2020 à direita superior; de 25/09/2020 à esquerda inferior; e de 26/09/2020, data da captura da imagem T0, para a área da LT Icaraizinho (traço preto). Onde não há indicação de um quadrado (*pixel*) de cor azul não houve chuva registrada.

A cena T1 foi adquirida em 24 de maio de 2021, data também validada em relação a ocorrência de chuvas para até três dias que antecederam a captura da



imagem. O registro de conferência em relação às chuvas para o T1 definido segue apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Recortes da plataforma *Google Earth Engine* para a data T1.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No Quadro 2 os registros de 21/05/2021 estão à esquerda na parte superior; os registros de 22/05/2021 estão à direita na parte superior; os registros de 23/05/2021 estão à esquerda na parte inferior; e os registros de 24/05/2021 - data da captura da imagem estão à direita na parte inferior. Denota-se que no período observado não houve chuvas para a área da LT Icaraizinho (traço preto), pois onde não há indicação de um quadrado (*pixel*) de cor azul não houve chuva registrada.

É importante pontuar que a cena T1 foi escolhida por ser a mais recente disponível quando se realizaram os testes e que atendia o critério de 3 dias anteriores sem registro de chuvas, considerando que datas posteriores estavam compreendidas no período chuvoso.

Da mesma forma o T0 foi escolhido atendendo este critério, que culminou no mês de setembro do ano anterior, de modo que se configurou um intervalo de sete meses, que permite avaliar os resultados alcançados pela metodologia proposta. A apresenta a descrição dos termos.

Figura 12 – Metadados das imagens T0 e T1 escolhidas para compor o modelo.



Fonte: Esa (2020) adaptado pela autora.

Os termos em azul claro indicados na Figura 12 são da imagem T0 e os termos em azul escuro se referem à imagem T1. Em cinza estão os significados relacionados aos termos circulados. A partir dos metadados das imagens escolhidas, observa-se que ambas foram obtidas pelo sensor A, que é o responsável pelo recobrimento nesta área. As imagens possuem alta resolução identificados pela letra H (*High*) e ambas estão na Classe padrão S (*Standard*).

### 3.5.2.2 Pré-processamento

Definidas e de posse das cenas, iniciou o pré-processamento com um *subset*, que é um recorte da área de estudo, etapa que economiza tempo e memória para realização dos processos subsequentes.

Em seguida foi necessário aplicar órbita, que é uma correção de deslocamento para as cenas escolhidas. Ao selecionar a função *apply orbit* o software SNAP busca o arquivo que contém os parâmetros necessários na pasta onde está a imagem (arquivo matricial).

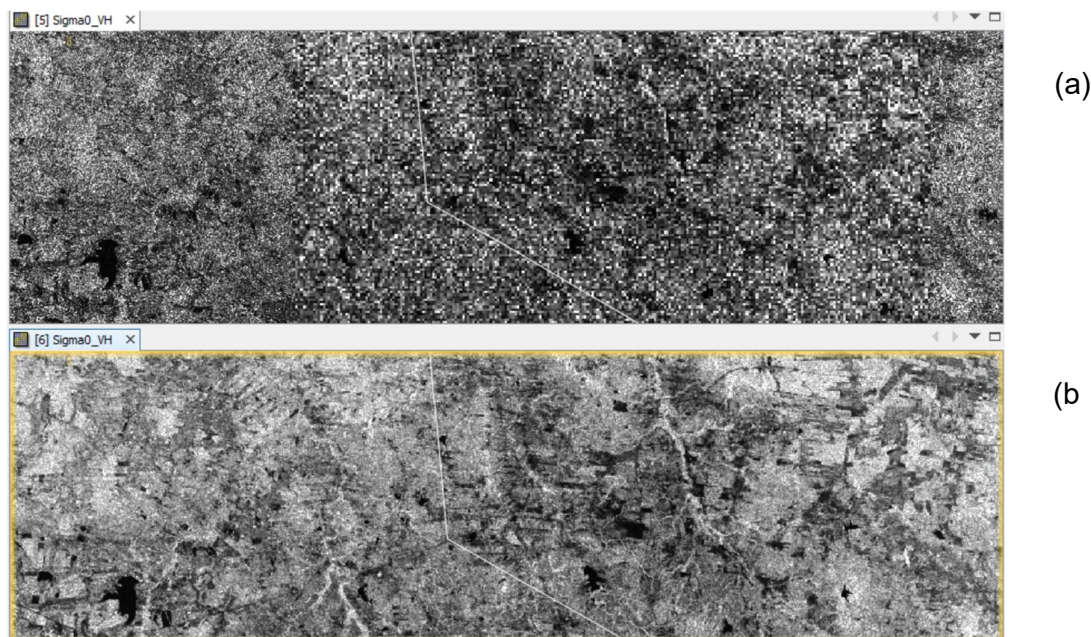
A mesma lógica é adotada pelo software para realização da calibração radiométrica e está programada – via ferramenta *Radiometric/Calibrate* do menu Radar para adicionar os parâmetros contidos nos arquivos da imagem. Apesar de admitir entrada de produtos de outros satélites, por se tratar de um programa produzido por iniciativa da Agência Espacial Europeia (ESA), seus processos são

direcionados aos produtos Sentinel, também produzidos por ela, o que justifica a automatização de alguns critérios de correção.

Outra etapa importante é a filtragem, que reduziu o *speckle* – ruído inerente à imagens SAR. O filtro escolhido dentre outros foi o *Refined Lee*, que calcula a média da imagem enquanto preserva as bordas das imagens, pois considera os *pixels* vizinhos com características de dispersão semelhantes (VECI; BRAUN 2021), o que pode ser uma prática interessante considerando que áreas antropizadas tendem a se espalhar sem uma quebra brusca de parâmetro.

A Figura 13 apresenta um extrato da cena de T0 que recobre parte da LT Icaraizinho. É possível verificar a diferença na textura da imagem não filtrada (a), em comparação com a filtrada (b) que confere melhor visualização. Os segmentos de reta em cor branca no centro da imagem pertencem a parte do traçado da LT Icaraizinho.

Figura 13 – Visualização de parte da banda VH da imagem T0. No extrato (a) sem filtro; extrato (b) aplicado *Refined Lee*.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Outro processo fundamental compreendido no pré-processamento das imagens SAR é a correção de distorção sofrida pelas imagens de radar devido a projeção de uma cena tridimensional em função do alcance (eixo x) e azimute (eixo y) do sistema (MOREIRA *et al.* 2013).



Segundo Veci e Braun (2021) esse processo de ajuste conhecido como correção de terreno elimina distorções ortorretificando as imagens a partir de um MDE (Modelo Digital de Elevação) calculado por imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de 30 metros de resolução espacial. O processo corrige distorções e degradações nos dados e georreferencia a imagem sendo a saída padrão em coordenadas geodésicas referenciadas ao *datum* SIRGAS 2000 (Código EPSG – *European Petroleum Survey Group* 4674).

### 3.5.2.3 Detecção de mudanças

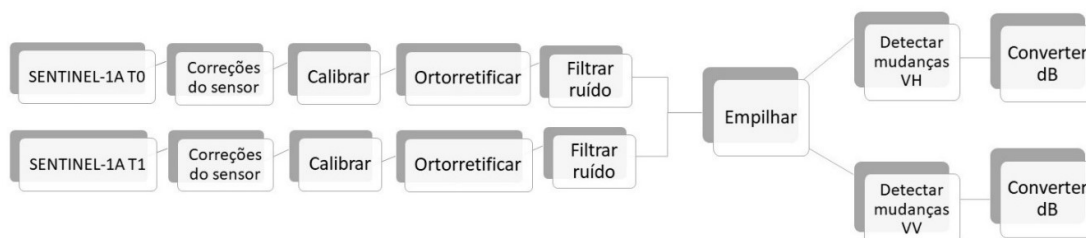
Para avançar com a detecção de mudança no programa SNAP buscou-se ferramentas específicas no menu direcionado as imagens de radar, tendo localizada a ferramenta *change detection*. A ferramenta exige que ambos os produtos (T0 e T1) se tornem um produto único. O processo é o empilhamento (*collocation*), que reúne em uma única saída as imagens e suas bandas ao se determinar quem será adicionada como *master* e quem será adicionada como *slave*, que no processamento foi T1 e T0, respectivamente. Com um único produto, aplicou-se a ferramenta *change detection* para verificar as respostas em relação à detecção de áreas que sofreram alteração. Um processamento foi realizado para as bandas VH e outro processamento foi realizado para as bandas VV, polarizações disponíveis para esta região.

Após o processamento para as bandas VH, uma única banda foi gerada, chamada *ratio*, como produto que indica as áreas que sofreram alteração, conforme depreendido do processo realizado entre as bandas T0 e T1. O mesmo processo foi feito para as bandas VV, resultando em outra banda *ratio*.

Para facilitar a leitura dos valores de *pixel* resultante do processamento, realizou-se a conversão dos valores para decibéis (dB), artifício que normaliza a distribuição da amostra no histograma. O processo traduz os valores de *pixel* em uma escala logarítmica (função log) onde os valores brilhantes são deslocados para a média, enquanto os valores escuros se estendem sobre uma faixa mais ampla (BRAUN, 2020). Esta etapa não é obrigatória e não altera o conteúdo de informação da imagem, mas é aconselhável para criar contraste na imagem, facilitando a identificação de diferentes classes. O processo de conversão para dB foi realizado para a banda *ratio* da polarização VH e da polarização VV.

O resumo das etapas de pré-processamento e processamento realizado no software SNAP está apresentado no Fluxograma ilustrado na Figura 14:

Figura 14 – Fluxograma das atividades realizadas para detecção de mudança.



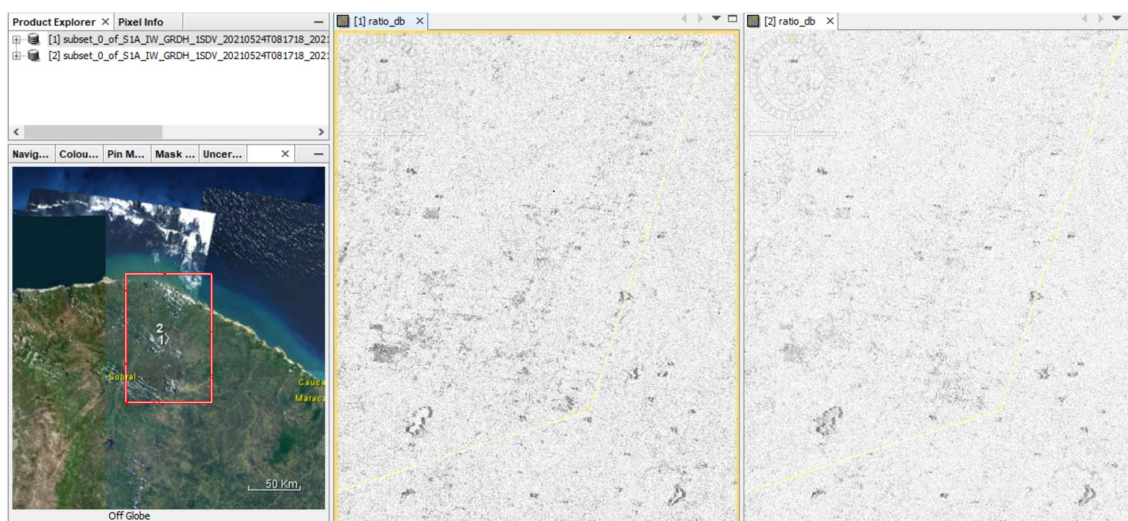
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir da execução destes processos obteve-se como resultado dois produtos que estão apresentados no subcapítulo 3.5.

### 3.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos gerados a partir do processo de detecção de mudança estão apresentados na Figura 15, que mostra uma parte dos dois produtos gerados.

Figura 15 – Produto gerado pelo *Change Detection* (VH à esquerda e VV à direita).



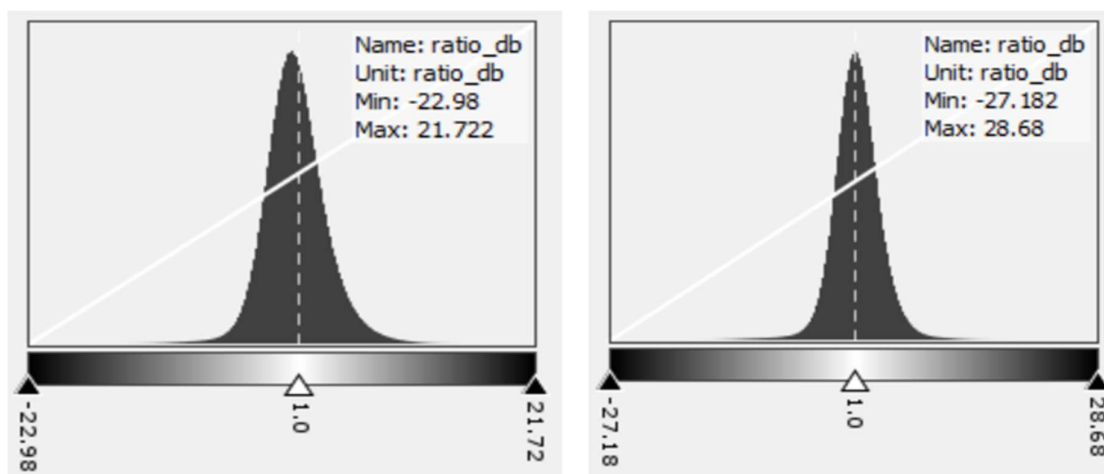
Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A coloração clara na Figura 15, tanto na cena da esquerda (banda VH) quanto na cena da direita (banda VV) representa pixels com valor próximo de 1, ou seja, onde não se percebeu alteração e os tons cinza mais intensos indicam locais em que ocorreram maiores discrepâncias de reflectância, mostrando alteração significativa entre o uso no T0 e o uso no T1.

Na comparação entre as bandas (VH e VV) indica-se que valores mais proeminentes para diferença de reflectância foram percebidos no processamento com bandas com polarização cruzada (VH), apesar do intervalo de valores encontrados (máximo e mínimo), ter ficado menor, entre -22.98 e 21.72 nesta polarização.

Para VV o intervalo obtido compreendeu valores entre -27.18 e 28.68, conforme indicado na Figura 16, que apresenta os histogramas com a distribuição dos valores para os dois produtos, à esquerda a polarização VH e à direita, VV.

Figura 16 – Histograma de distribuição dos valores obtidos com o processamento *change detection* - à esquerda VH e à direita VV.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

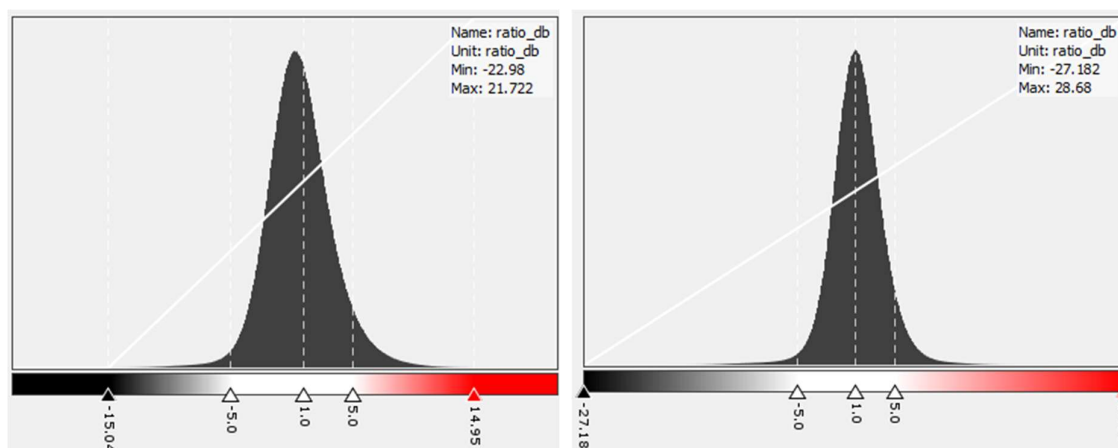
Conforme demonstra a Figura 16 a equalização da rampa de cores foi escolhida para que os valores próximos de 1, que indicam “não-mudança” sejam apresentados em cor clara, e à medida que se afastam, representando “mudança” sejam representados em cor escura.

O resultado da divisão entre os *pixels* de ambas as imagens deve ser muito maior que 1 ou muito menor que 1 de acordo com a direção das mudanças. Neste ponto é importante que seja definida uma forma de filtrar os pontos de mudança

(acima ou abaixo de 1,0) que de fato sejam mais relevantes para a pesquisa, escolha que é frequentemente definida a partir do histograma da imagem de proporção (Shaoqing; Lu, 2008).

Segundo Kuplich (2017), os coeficientes de retroespalhamento das feições antrópicas são maiores que de vegetação pouco rugosa e de superfícies de águas calmas. Com base nesta premissa, para filtrar alterações não significativas extrapolou-se o entendimento de “não alterado” para o intervalo entre -5 e +5, conforme o histograma de distribuição dos valores, ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Novo histograma de distribuição dos valores obtidos com o processamento *change detection* – à esquerda VH e à direita VV.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

As cores diferentes sugeridas na Figura 17 representam os valores positivos e negativos. A intenção foi diferenciar potenciais áreas de mudanças antrópicas - objeto de interesse - que no modelo tendem a ser representadas pela cor vermelha, das demais mudanças significativas que podem ocorrer com a vegetação.

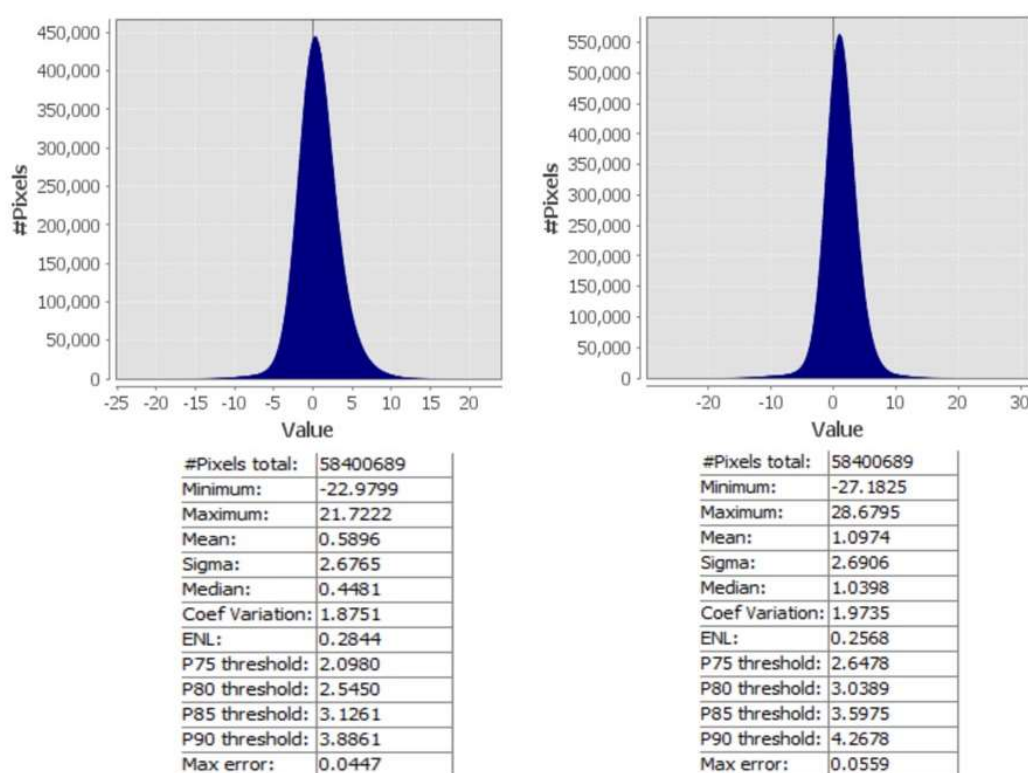
Estas tendem a serem representadas pela cor preta e quanto mais intensa as cores, independentemente da cor, maior a alteração em T1 (de 24 de maio de 2021) em relação a 26 de setembro de 2020 (T0).

A metodologia foi aplicada em ambas as polarizações disponíveis, mas os resultados entre elas, apesar de muito próximos, podem esboçar uma prevalência entre o que pode ser considerada a melhor polarização, considerando a demanda do estudo proposto.

Com os resultados estatísticos, o modelo gerado com a polarização cruzada (VH) apresentou menor erro máximo no processamento, bem como menor sigma, que representa o desvio-padrão dos valores.

Na polarização cruzada observou-se também um menor intervalo entre os valores máximo e mínimo (21,72 e -22,98, respectivamente) quando comparado à polarização VV, que respondeu com um máximo de 28,68 e mínimo de -27,18. Um comparativo entre estes detalhes segue ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Histograma de distribuição dos valores (à esquerda VH e à direita VV).



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Para Kuplich (2017), as co-polarizações são relacionadas com a rugosidade da superfície (espalhamento superficial) e as polarizações cruzadas estão mais relacionadas com o interior dos objetos (espalhamento volumétrico). Considerando os dois produtos gerados (VH e VV), avaliou-se os resultados obtidos para ambos.

Os pontos com tons avermelhados mais proeminentes em trechos mais adensados ao longo da LT foram marcados. Escolheu-se os pontos vermelhos pois representam valores positivos, uma vez que os alvos de interesse (edificações)

costumam retroespalhar valores altos, que na equação de proporção devem se manter positivos. A partir das coordenadas registradas para estes pontos escolhidos, correlacionou-se ao ponto correspondente nas imagens de alta resolução espacial.

As imagens gratuitas do programa Google Earth Pro foram utilizadas nesta etapa uma vez que se desconhece um mapeamento específicos das edificações existentes próximas e ao longo do trecho que pudessem ser utilizados para confrontação. Ainda que possam existir deslocamentos, a etapa foi considerada base para a validação dos resultados, pois não se dispõe de imagens de satélite de alta resolução que não as do Google Earth Pro que possam atender a demanda.

Testes foram realizados com as imagens do Satélite Planet, disponíveis via convênio institucional, porém as imagens de três metros de resolução espacial não permitiram visualizar com clareza as alterações que são facilmente identificáveis nas imagens de melhor resolução espacial disponíveis no programa Google Earth Pro, decidindo-se por este meio para apresentar os resultados.

Considerando se tratar de uma validação sem rigor geométrico, sendo a identificação visual o critério para apontar se de fato houve mudança no uso praticado nos pontos selecionados, se justifica a validação aplicada, apoiada na série histórica de imagens que podem ser recuperadas na plataforma.

O processo comparativo iniciou pela busca das imagens próximo da data da cena T0 (setembro de 2020) e outra imagem de acervo próxima da data da cena T1 (maio de 2021) no acervo (linha do tempo) do programa Google Earth Pro. A imagem próxima ou antes do T0 é datada em setembro de 2017 e a imagem mais recente próximo do T1 é abril de 2021.

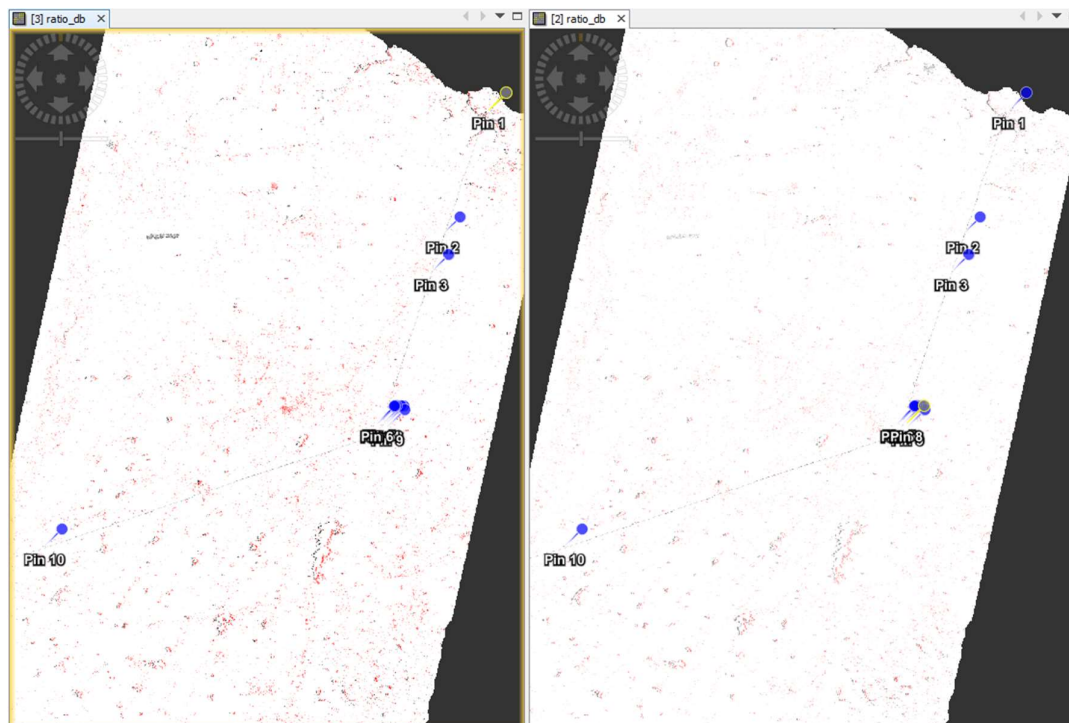
Mesmo que haja deslocamento e distorções nas imagens disponíveis no programa, usou-se as coordenadas como base para identificação próxima de alguma alteração no uso do solo praticado.

Os pontos escolhidos não se limitaram rente ao traçado, uma vez que se busca nesse momento validar os resultados encontrados, ou seja, dentre os pontos escolhidos, ainda que sejam edificação, não representam ocupações pois não necessariamente estão sobre área de restrição imposta pelo sistema de energia. A linha em cor preta que consta em todos os recortes do modelo representa o traçado da LT de estudo.

Foram marcados dez pontos (*pins*) nos modelos de mudança, conforme ilustrado na

Figura 19, priorizando os mais preponderantes em coloração avermelhada, próximos às áreas com ocupações consolidadas e que estejam isolados, podendo configurar uma alteração mais pontual.

Figura 19 – Modelo de detecção de mudança (VH à esquerda e VV à direita).

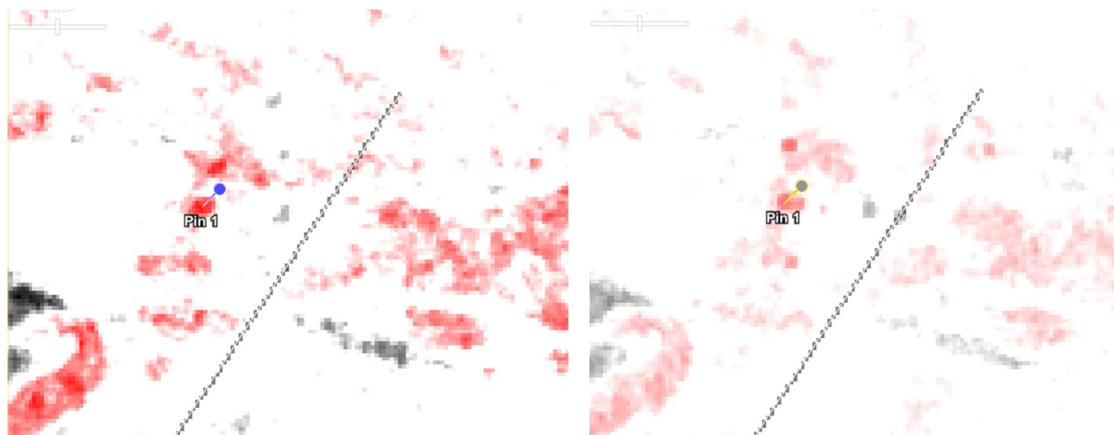


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O ponto 1 (observado na Figura 19 na parte superior da imagem) escolhido para conferência localiza-se nas coordenadas  $03^{\circ} 01' 18''$  S  $39^{\circ} 41' 01''$  W e é destacado em vermelho em ambas as polarizações, com maior intensidade na banda VH (à esquerda na Figura 11): 14,35. Na banda VV (à direita do Quadro 3) o valor calculado foi 17,77.



Quadro 3 – *Pin 1* sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pela correlação com as imagens do Google Earth observou-se tratar de estrutura metálica que faz parte da geração de energia eólica, conforme Quadro 4.

Quadro 4 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 na localização do *Pin 1*.



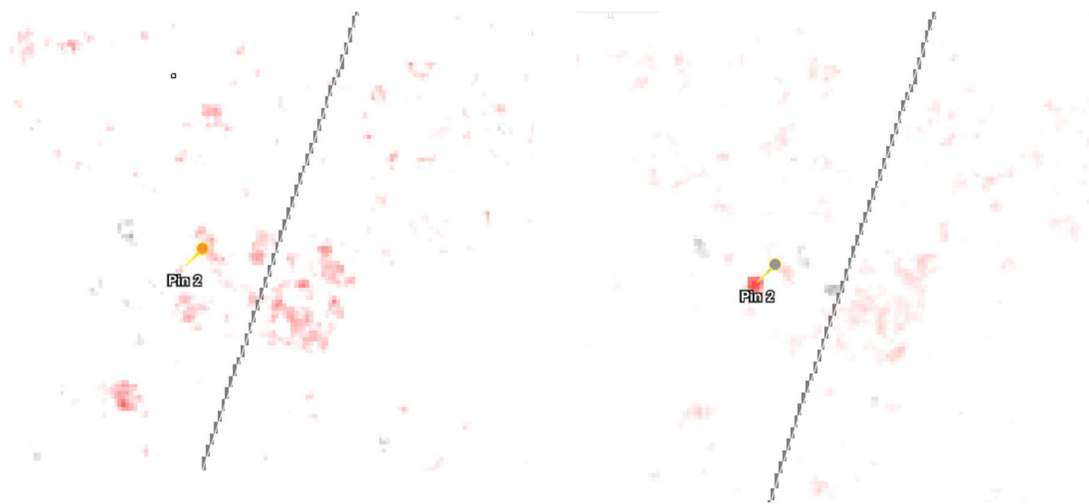
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Apesar de a estrutura existir em ambas as imagens de conferência (2017 e 2021), o alto valor de reflectância indicado pode ser justificado pela movimentação das pás, que produz uma imagem de diferença dependendo do momento da passagem do satélite.

O ponto 2 localiza-se nas coordenadas 03° 09' 27" S / 39° 44' 04" W e é destacado em vermelho em ambas as polarizações, com maior intensidade na banda VV (à direita do Quadro 5) que registrou como razão da reflectância o maior valor entre os dez *pins*: 20,92. Na banda VH (à esquerda do Quadro 5) o valor obtido foi 4,69.



Quadro 5 – *Pin 2* sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A diferença entre os valores denota que se trata de duas interpretações distintas em função do retorno do alvo, que responde de acordo com o que cada polarização registra, resultando em um valor diferente após aplicar a proporção.

A cor clara do *pin 2* no modelo da polarização VH se justifica pelo intervalo extrapolado para não mudança (entre - 5 e + 5). A identificação da feição nas imagens sugere se tratar de uma edificação presente em 2017 e 2021 (à esquerda e à direita respectivamente no Quadro 6).

Quadro 6 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 na localização do *Pin 2*.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Pela limitação de interpretação das imagens não é possível afirmar se houve mudança na edificação para justificar a classificação como “mudança” de fato.

O ponto 3 localiza-se nas coordenadas  $03^{\circ} 11' 55''$  S /  $39^{\circ} 44' 48''$  W e é destacado em vermelho apenas na banda VV (à direita do Quadro 7 que teve registrado como razão da reflectância em dB: 11,37. Na banda VH (à esquerda do Quadro 7) o valor calculado foi 0,50. Neste ponto se registrou diferença abrupta entre os valores de reflectância quando comparadas as polarizações, assim como no *pin 2*.

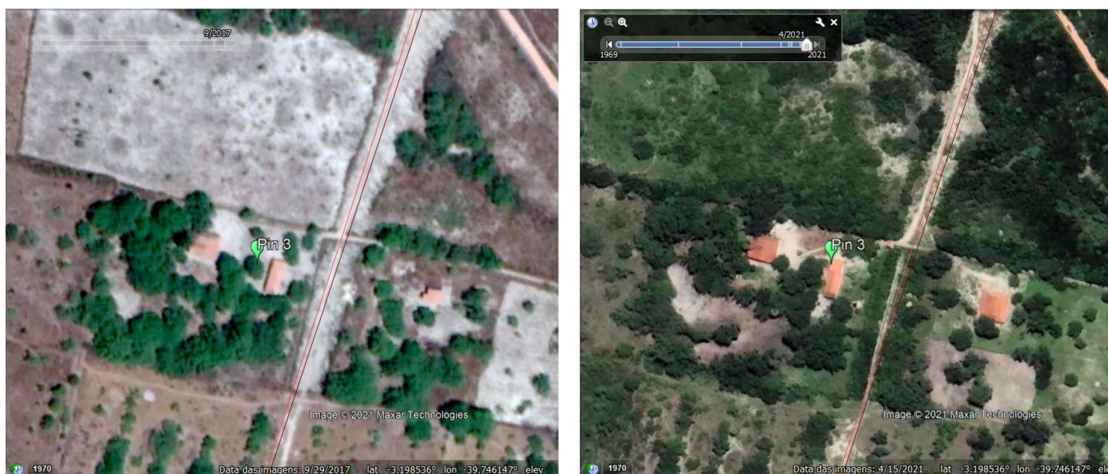
Quadro 7 – *Pin 3* sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A identificação da feição nas imagens indica se tratar de uma edificação presente em 2017 e 2021 (à esquerda e à direita respectivamente Quadro 8).

Quadro 8 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 na localização do *Pin 2*.

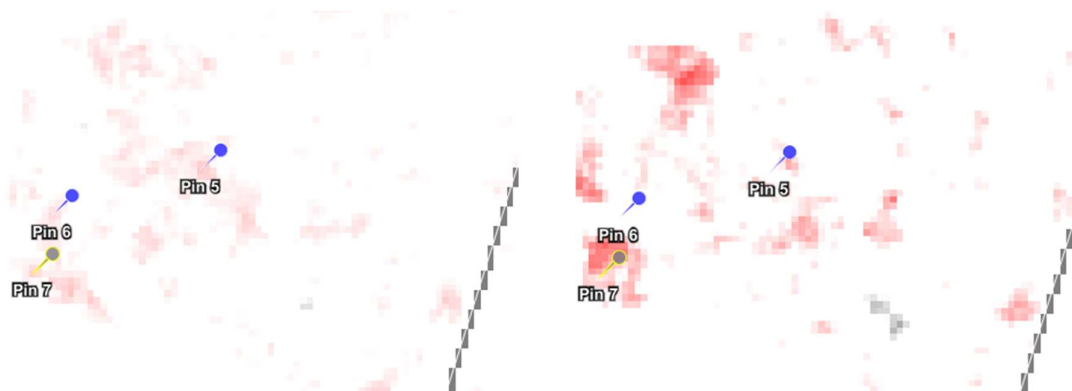


Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O Quadro 8 mostra em detalhe a proximidade com a LT, que está representada pela linha vermelha em ambas as imagens. Assim como no ponto 2, não é possível identificar se houve alteração na edificação ou se é uma superestimação do modelo. Algumas árvores isoladas na imagem de 2017 não são observadas na imagem de 2021. Pelo possível deslocamento das imagens o ponto 3 pode indicar esta alteração, pois a área onde estavam as árvores é próxima a ele.

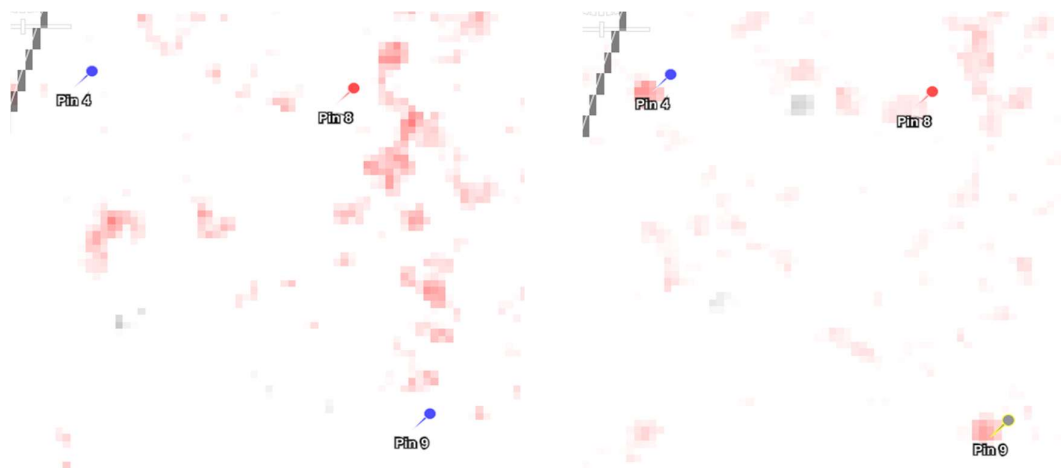
Os pontos 5, 6 e 7 foram escolhidos próximo a um núcleo urbano, assim como os pontos 4, 8 e 9. Na polarização VH foram registrados valores de razão de reflectância em dB entre 1 e 6 e na polarização VV entre 6 a 12 dB. A representação destes pontos em ambos os modelos segue ilustrado no Quadro 9 e no Quadro 10.

Quadro 9 – Pins 5, 6 e 7 (polarização VH à esquerda e VV à direita).



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Quadro 10 – Pins 4, 8 e 9 (polarização VH à esquerda e VV à direita).



Fonte: Elaborada pela autora (2021).



Dentre os pontos indicados no Quadro 9 e no Quadro 10, em 5 deles fica evidente que houve construção ou ampliação ao comparar as imagens de 2017 e 2021 (Quadro 11 e Quadro 12). Apenas o *pin* 5 aparenta ser edificação presente em ambas as datas, que assim como nos *pins* 2 e 3, pode ser ampliação da construção ou superestimação do modelo.

Quadro 11 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 nos *pins* 5, 6 e 7.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quadro 12 – Comparativo entre as imagens de 2017 e 2021 nos *pins* 4, 8 e 9.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nesta área pode-se assumir, de acordo com o depreendido da validação realizada, que as feições dos *pins* 4 a 9, com exceção do *pin* 5, correspondem à mudança, pois não havia edificação em 2017 e em 2021 são observadas edificações.

O ponto 10, último dentre os selecionados, localiza-se nas coordenadas  $03^{\circ} 29' 57''$  S  $40^{\circ} 10' 13''$  W e é destacado em vermelho nas duas polarizações. A maior intensidade é observada na banda VH (à esquerda do Quadro 13), com razão da reflectância em dB: 11,63. Na banda VV (à direita do Quadro 13) o valor é de 13,68.

Quadro 13 – *Pin 10* sobreposto ao modelo (polarização VH à esquerda e VV à direita).



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A partir da identificação da feição nas imagens parece se tratar de uma área úmidas com lagoas observadas em 2017 e 2021 (Quadro 14). Existem edificações na área próxima ao ponto 10 que parecem se manter iguais nas duas datas.

Quadro 14 – Comparativo entre a imagem de 2017 e 2021 no *Pin 10*.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Visualmente, pelas respostas apresentadas nos produtos gerados, pode-se sugerir melhores resultados com a co-polarização, ou seja, VV, pois dos 10 pontos escolhidos para conferência, 5 foram considerados assertivos para mudanças de edificação, que é a alteração de maior interesse. Nos outros 3 pontos, apesar de não indicarem mudança, tratavam-se igualmente de edificação, restando apenas 2 pontos onde não foi possível perceber resultados de mudança.

Em relação aos valores resultantes da razão entre T0 e T1, estes não parecem ser lineares, condição esperada uma vez que podem existir diferentes valores derivados da divisão. Pequenas diferenças podem ensejar valores de resposta muito distintos entre feições com as mesmas características físicas (edificação), devido aos diferentes materiais que as compõem e que podem responder de maneira também distinta no modelo de divisão proposto, caso sejam muito ou pouco alteradas ao longo do tempo. A Tabela 2 ilustra essa ausência de linearidade entre os valores registrados nos *pixels* que compõe os modelos VH e VV.

Tabela 2 – Dados extraídos do produto de detecção de mudanças.

| <i>Pin</i> | Ratio dB VH | Ratio dB VV | Feição percebida   | Alteração sugerida |
|------------|-------------|-------------|--------------------|--------------------|
| 1          | 14,35       | 17,77       | Estrutura metálica | dinâmica           |
| 2          | 4,69        | 20,92       | Edificação         | inalterada         |
| 3          | 0,50        | 11,37       | Edificação         | inalterada         |
| 4          | 3,07        | 12,27       | Edificação         | criada             |
| 5          | 2,94        | 9,96        | Edificação         | inalterada         |
| 6          | 1,94        | 8,71        | Edificação         | criada             |
| 7          | 5,81        | 9,02        | Edificação         | criada             |
| 8          | 3,98        | 6,56        | Edificação         | criada             |
| 9          | 0,95        | 12,67       | Edificação         | criada             |
| 10         | 11,63       | 13,86       | Lagoa              | ampliada           |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ainda que os *pins* 4, 6, 7, 8 e 9 tenham indicado alteração (novas edificações), os valores obtidos, sobretudo no modelo VV, não correspondem exclusivamente às edificações, uma vez que o *pin* 10 tem valor semelhante ao *pin* 9 apesar de a princípio se tratarem de lagoa e edificação, respectivamente.

No modelo VH os valores para edificação aparecem no intervalo 0.50 e 5.81, e as outras feições (estrutura metálica e lagoa) aparecem com valores mais afastados, o que pode sugerir, uma tendência dos valores em relação às feições correspondentes, ainda que o modelo VH não tenha considerado assertivo no indicativo de alteração para o intervalo criado (entre -5 e +5), o que pode ser facilmente alterado.

Os resultados encontrados demonstram em avaliação preliminar que as imagens SAR do Sentinel-1 são promissoras para detectar alterações, incluindo possíveis edificações. É importante considerar que no modelo gerado existem outros pontos indicados como de mudança, em sua maioria ao longo de superfícies com água, que não foram detalhados por estarem distante da LT.

Pela dinâmica hídrica da região, que permanece seca por um grande período e subitamente recebe umidade em um curto intervalo, muitas mudanças detectadas podem estar relacionadas a essa característica – principalmente devido a data da imagem T1 (cena de mudança), que é de maio, último mês do período chuvoso na região, que tipicamente inicia em janeiro segundo Associação Caatinga (2021).

Como a intenção foi utilizar como alteração a imagem mais recente disponível quando da realização dos processamentos, essa foi a cena que cumpriu os requisitos de escolha, conforme já detalhado, apesar de caracterizar um solo mais úmido e com vegetação mais vigorosa, devido às chuvas decorridas no período.

As alterações podem ser percebidas tanto na vegetação, que responde com outro padrão, quanto às superfícies que acumulam água, sejam rios ou lagoas, que não são objeto de interesse tratando-se da segurança do sistema de transmissão.

É possível que ao se usar uma base hidrográfica como máscara, possa-se alcançar um resultado que ignore estas áreas, do produto final, direcionando as atenções aos pontos que realmente possam indicar alteração por edificação, que é a feição de maior interesse quando se trata de fiscalização das linhas de transmissão.

### 3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As imagens de radar possuem especial vantagem para caracterizar alvos devido a sua sensibilidade em relação aos parâmetros não identificáveis em imagens ópticas. As facilidades de processamento, a gratuidade e a frequência com que recobrem uma mesma área justificam o crescente interesse do meio científico.

Explorar o potencial das imagens Sentinel-1 para detecção de mudanças é um caminho que vem sendo explorado para diversas demandas, e podem ser aproveitadas em ações de planejamento e gestão. Para a presente pesquisa buscou-se encontrar meios de monitorar as LTs do país que estejam percebendo pressão antrópica, apresentando uma metodologia que atenda ao setor como apoio na missão de manter os ativos em plenas condições operacionais, livre de perturbações que possam comprometer a transmissão de energia.

Os resultados se mostraram promissores para otimizar o monitoramento das LTs. Os insumos de imageamento e de processamento gratuitos permitem monitorar os trechos a cada 14 dias sem impedimento de recobrimento devido às condições atmosféricas, alcançando um material diagnóstico para este intervalo de tempo.

Apesar das vantagens, é importante reforçar que mesmo com alta resolução espacial as imagens SAR ainda são bastante grosseiras para avaliar detalhes ao longo da área de interesse. Além disso, por ser um sistema que forma imagens a partir do alcance de visada lateral, existem deformações que tornam a análise de imagens SAR desafiadora no caso de alvos complexos.

A metodologia não substitui a verificação *in loco*, mas tem a intenção de auxiliar as equipes de campo apontando as áreas com indícios e que por isso demandam fiscalização. Com um material cartográfico indicativo de alteração à disposição das concessionárias, o processo de verificação será mais pontual, seja com imageamento óptico de alta resolução espacial ou mesmo *in loco*. Neste contexto a fragilidade do sistema frente à pressão antrópica pode ser potencialmente minorada a partir da ação preventiva ou antecipada, contribuindo para que se mantenha o sistema de transmissão em plenas condições operacionais.

Conhecer a dinâmica do lugar em relação ao regime de chuvas ou de seca pode ser igualmente importante para que os resultados encontrados sejam mais assertivos, de modo que a mudança identificada realmente aponte para um padrão diferente, e não apenas características naturais submetidas a outras condições que alterem sua reflectância.

Ampliar as cenas e reduzir o tempo entre uma avaliação e outra podem ser caminhos a serem explorados para um resultado de maior qualidade, para além das outras práticas que podem ser consideradas, conforme apontado na discussão para que os parâmetros de detecção sejam potencializados.



A metodologia apresentada não esgota as possibilidades, apenas se limita em um universo mais amplo à aplicação dos processos de detecção para apontar usos inadequados ao longo dos trechos de transmissão.

A importância do sistema justifica as iniciativas que visam mantê-lo em segurança e obediente às regras impostas por normativas, para que sejam evitados acidentes e desligamentos que comprometam o fornecimento ou encareçam a prestação do serviço, tornando-a limitada àqueles que possam suportar esses custos.

## 4 SUSCETIBILIDADE AO RISCO DE EROSÃO APOIADA EM GEOTECNOLOGIAS<sup>4</sup>

### 4.1 INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão de energia é constituído por estruturas físicas compostas por torres e cabos. Esse sistema perpassa distintas paisagens, percorrendo longas distâncias, em cujo traçado observa-se marcante mudança nas condições naturais do terreno (Li *et al.*, 2021). A instalação das torres inevitavelmente perturba e danifica o ambiente (Chunxia *et al.*, 2020) e isso resulta em diferentes graus de suscetibilidade a erosão, em pontos dispersos (Silva *et al.*, 2019).

Ao longo do traçado formado pelas torres normalmente existem diferentes tipos de solo, formas de relevo e espécies vegetais que respondem distintamente a estes impactos (Li *et al.*, 2021). Embora seja um processo natural, as atividades antrópicas potencializam a magnitude das erosões (Parveen; Kumar, 2012).

No Brasil, a instalação de um sistema de transmissão de energia é regida pela Norma Técnica ABNT NBR 5422 (1985), a qual orienta que a supressão vegetal deve ser reduzida ao mínimo necessário. Ainda assim, a retirada da vegetação pode ser total para viabilizar o acesso e a instalação, o que predispõe a superfície do solo ao processo erosivo. Além disso, o constante tráfego de veículos para manutenção em condição de ausência de vegetação torna o solo vulnerável e intensifica a degradação (Silva *et al.*, 2019).

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 em termos tradicionais é extremamente morosa, e depende de dados de precipitação determinados em campo, registrados em pluviógrafos, que em muitos locais não

---

<sup>4</sup> As pesquisas relacionadas neste capítulo foram submetidas e aguardam publicação na Revista Brasileira de Geografia Física – RBGF.

existem. Além disto, acompanhar locais sensíveis unicamente baseado em observações de campo é demorado e não rentável (Dissanayake; Morimoto; Ranagalage, 2019).

Neste contexto, técnicas de Sensoriamento Remoto utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG), podem ser uma alternativa para alcançar os dados necessários para uma avaliação de risco à erosão, viável nessa escala geográfica (Bagwan; Gavali, 2020).

O potencial e alcance de dados obtidos via sensoriamento remoto motivam a aplicação e justificam a proposição que pretende sugerir a suscetibilidade ao risco de desencadeamento de erosão ao longo dos traçados das Linhas de Transmissão (LT).

Partindo-se deste pressuposto, pretende-se construir uma metodologia empírica com poucos requisitos de entrada, gerenciados espacialmente em ambiente computacional, apontando as áreas que podem estar mais suscetíveis a esta degradação ao longo das linhas de transmissão – sobretudo próximo às torres.

## 4.2 JUSTIFICATIVA

O uso de técnicas de geoprocessamento aliado à geração de modelos matemáticos para reproduzir mudanças de espaço tem sido frequente nas publicações sobre o assunto, principalmente para representar os fatores que estimam a perda de solo por erosão hídrica. (Claudino *et al.*, 2018).

No contexto da caracterização de risco à erosão, a distribuição das chuvas é um dado importante, pois altera as perdas de água e solo por erosão hídrica, que varia no tempo, em função da alteração na intensidade, duração e frequência de ocorrência das chuvas (Amaral *et al.*, 2008). Por outro lado, locais sem instrumentos específicos para registrar estes detalhes são realidade em grande parte do território brasileiro, o que impõe limitação à aplicação das equações tradicionais.

Ainda que se disponham de dados pluviométricos e climatológicos advindos da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento) ou produzidos pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), como descrito nos estudos de Souza Filho (2019), as áreas de pesquisa são reduzidas à localização destes ou dependerão de cálculos de aproximação para correlacioná-los.

Iniciativas com viés mais amplo do ponto de vista da representação têm utilizado modelos de simulação de cenários como alternativa para avaliar o risco de erosão do solo (Lense *et al.*, 2021).

Na presente proposição são trazidas outras 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. Para tanto, aplicar técnicas de geoprocessamento em dados advindos de imagens de satélite foram a base para construção da metodologia de suscetibilidade ao risco à erosão ao longo de linhas de transmissão de energia.

Mesmo não sendo considerada uma degradação abrupta em termos de iminência, a erosão, se não solucionada a tempo, pode, de fato, desestabilizar as estruturas físicas do sistema, sejam torres ou subestações, prejudicando seu funcionamento e todos que dele dependem. Quando próximas às torres, as erosões podem provocar danos às estruturas das torres, colocando a cadeia de transmissão em risco devido à instabilidade da estrutura do solo.

A proposição identifica áreas suscetíveis ao risco de erosão, a partir do arranjo de fatores que influenciam no desencadeamento de erosões em determinada área próximo ao sistema de energia e se destaca em termos de gestão territorial pela relevância do tema, replicação possível e zero custos para aquisição dos dados de entrada.

#### 4.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os fatores físicos considerados na proposição assemelham-se em partes aos preconizados por Wischmeier e Smith (1978) nas equações amplamente conhecidas para estimar a perda de solo – tal como a USLE (*Universal Soil Loss Equation*), uma vez que dados sobre precipitação, sobre o tipo de solo, sobre a cobertura/uso da terra e relevo são base para qualquer avaliação de erosão.

Apesar de ter sido utilizada como base ampla teórica, os fatores considerados não espelham a aquisição e seus requisitos originais, sendo esta justamente a contribuição da metodologia proposta: trazer novas possibilidades para determinação da suscetibilidade ao risco de erosões.

Disponer de dados gratuitos, ainda que adquiridos de forma remota, a partir de satélites sensores e imageadores, organizando-os em termos de modelagem simplificada representa ganhos para além do controle erosivo ao longo das LTs: estabelece a ampliação da aplicação da ciência pelo alcance global dos dados – principalmente os relacionados aos volumes de chuvas – principal agente erosivo.

Para a precipitação, apoiou-se nos registros disponibilizados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a partir dos sensores do satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*), que monitoram e gravam os volumes de chuva. Neste caso a interação entre volume e tempo de precipitação foram representadas por pesos, e é quem deve indicar a erosividade nos termos propostos.

O fator que envolve declividade e comprimento de declive é igualmente resultante do produto obtido a partir dos dados de sensores orbitais, neste caso, do radar da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). A forma de aquisição e manipulação dos dados seguem o descrito por Bertoni e Lombardi Neto (2008), que aplica álgebra no mapa envolvendo constantes previamente estabelecidas.

Para os demais fatores (dados sobre a resistência do solo e a cobertura da terra) buscam-se mapeamentos previamente produzidos em escala nacional – também gratuitos, relacionados à erodibilidade e ao uso e manejo da terra, obtidos respectivamente pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias) e pelo MapBiomass, iniciativa não governamental com viés científico.

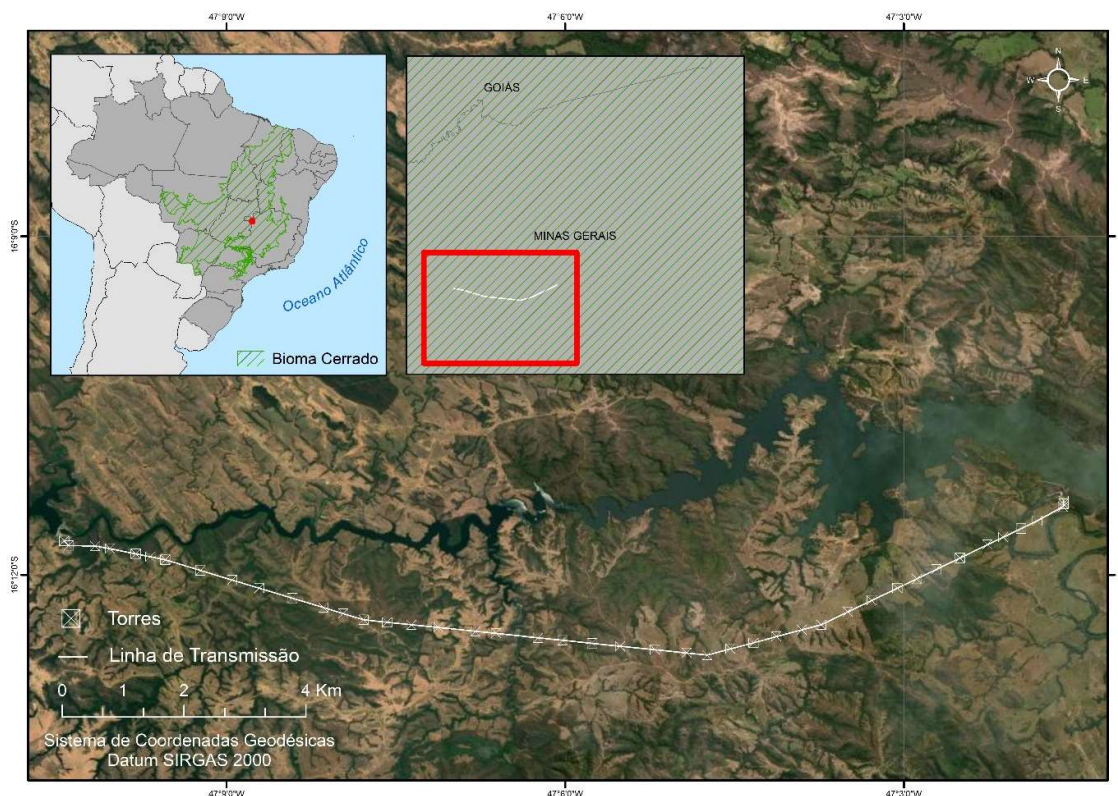
Estabelecidos os cinco fatores, observou-se que estes se relacionam entre si, pois as práticas de manejo, por exemplo, podem impactar na erodibilidade dos solos (Dedecek, 1989). Por outro lado, ficou clara a representatividade não uniforme entre estes fatores para o desencadeamento das erosões. Neste 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 (Devátý *et al.*, 2019); (Lense *et al.*, 2021), cabendo por isso atenção na construção da metodologia para que estes sejam preponderantes em algum grau em relação aos demais.

Esta condição pode ser expressa em forma de hierarquia conforme orientado no Método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), desenvolvido por Saaty (2008), onde se destacam em valores os fatores mais relevantes em detrimento daqueles que sozinhos não são determinantes para estabelecer a degradação.

#### 4.4 ÁREA DE ESTUDO

Tratando-se do tema erosão alguns pontos são fundamentais para que se estabeleça a condição gatilho para desencadeamento dos processos, e um deles está relacionado às características das chuvas, que dependem do regime climático de cada região. Para aplicação da metodologia utilizou-se como traçado piloto a Linha de Transmissão (LT) Mata Velha, que possui cerca de 16 km de extensão. O sistema opera em 138 kV e está localizada no noroeste do estado de Minas Gerais, próximo da divisa com o estado de Goiás. No traçado existem 43 torres distribuídas entre a Subestação Mata Velha e a Subestação Unaí Baixo, de responsabilidade do Grupo CPFL. A Figura 20 ilustra a localização da LT Mata Velha.

Figura 20 – Localização e traçado da LT Mata Velha, pertencente ao bioma Cerrado.



Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

A LT está inteiramente inserida no bioma Cerrado, que tem duas estações bem definidas: uma seca e outra chuvosa (Costa; Rodrigues, 2015). As diferenças sazonais entre as chuvas que ocorrem nos meses de inverno das que ocorrem apenas

no mês de janeiro podem ser muito expressivas. Ainda que possam ocorrer no inverno – pleno período seco, as chuvas são tão insignificantes que podem ser desconsideradas no contexto de risco à erosão.

Um dos estudos de Dedeczek (1988) estabelece uma divisão entre as chuvas convectivas (menor volume, curta duração e alta intensidade) e as chuvas frontais (grande volume, longa duração e baixa intensidade) para diferenciar o potencial erosivo das chuvas que ocorrem no período chuvoso. O autor concluiu que todos os índices de erosividade apresentaram melhores correlações com as chuvas convectivas do que com as frontais. Por outro lado, as chuvas frontais, que têm menor potencial erosivo, causam maiores perdas de solo devido à umidade antecedente.

Segundo Silva *et al.* (1997), as chuvas frontais ocorrem de dezembro a fevereiro. Nos demais meses do período chuvoso ocorre o domínio de chuvas convectivas (outubro, novembro, março e abril), predominando as chuvas isoladas (Dedeczek, 1988). De maio a setembro os índices pluviométricos mensais reduzem-se bastante, podendo chegar à zero, caracterizando a estação seca (Marcuzzo; Cardoso; Faria, 2012).

O período seco que antecede as chuvas também contribui para o desenvolvimento das erosões à medida que provoca o ressecamento dos solos, pois favorece o desprendimento das partículas com o impacto das gotas da chuva, facilitando o carreamento no período chuvoso (Guerra, 2012).

Desta forma, é notável que a chuva assume um papel central no desenvolvimento dos processos erosivos, porém fica evidente também que as particularidades do bioma exigem atenção quando da elaboração de uma proposição que se pretende basear em dados dinâmicos – aqueles que envolvem volumes de chuva – para estabelecer uma condição de suscetibilidade à erosão neste ambiente.

#### 4.5 MATERIAIS E MÉTODO

Trata-se de um modelo empírico que pretende indicar áreas com suscetibilidade ao risco de erosão ao longo de traçados de transmissão de energia tendo como base uma LT localizada no bioma Cerrado. Neste contexto se estabelece que a torre é uma estrutura vulnerável quando se observa determinado conjunto de fatores físicos suscetíveis à ação da chuva, pois estes podem romper o solo, favorecendo a instabilidade da estrutura.

A proposta metodológica se baseia na soma de camadas matriciais que contém dados que correspondem a diferentes fatores físicos: chuva; acumulado de chuva, erodibilidade, uso da terra e topografia, adquiridos a partir de dados de sensoriamento remoto de forma gratuita. Estas camadas foram previamente reclassificadas com pesos e depois combinadas a partir do somatório – respeitando valores de hierarquia entre os fatores – para entregar um modelo preditivo que apoie ações de gestão. Os subitens que seguem descritos detalham o princípio aplicado.

#### **4.5.1 Materiais**

Especificamente em relação ao fator chuva, para se estimar a capacidade de causar erosão – ou seja, sua erosividade, o tamanho da gota e a energia cinética com que ela toca a superfície do solo são as características que distinguem as chuvas com maior poder erosivo. (Fachin; Pereira; Thomaz, 2019)

Essas características estão relacionadas com a intensidade e com o volume de chuva sendo tradicionalmente avaliadas por meio de índices que medem a habilidade de causar erosão baseado nas características físicas das chuvas.

Na presente pesquisa os volumes são obtidos a partir do banco de dados do GPM (*Global Precipitation Measurement*), uma plataforma que registra a precipitação ocorrida em todo o mundo a cada 30 minutos.

Os dados podem ser baixados gratuitamente no *site* da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a cada 4 horas no modo IMERG *Early*. A cada 14 horas há uma atualização e então um novo formato é disponível, chamado IMERG *Late*. Depois de 3 meses os dados ficam disponíveis em um formato definitivo chamado modo IMERG *Final*. O que muda entre os produtos é a forma de processamento da informação, os que levam mais tempo para estarem disponíveis passam por mais validações e ajustes (Nasa, 2022).

Os registros apresentam apenas o volume de chuvas precipitado, que depois deve ser aliado ao tempo de precipitação para estabelecer os pesos que caracterizam maior ou menor potencial erosivo. Neste ponto, busca-se trazer implicitamente a intensidade ao combinar intervalos de volume e de tempo. O fator chuva, para fins metodológicos, avaliará as chuvas ocorridas a cada 2 horas, ou seja, será considerada uma única chuva o volume registrado neste intervalo e poderá ser obtida a partir dos registros IMERG *Early* que são disponibilizados em tempo quase real.



Os mesmos dados da constelação GPM, porém no modo IMERG *Late* foram utilizados para obtenção do fator acumulado de chuvas, que podem influenciar na infiltração da chuva observada no momento em análise.

Segundo Tucci (2001) o escoamento superficial é determinado a partir das características da precipitação e da capacidade de infiltração de água no solo e acontece quando a intensidade de precipitação se torna maior do que a velocidade de infiltração, ou quando a capacidade de retenção de água tiver sido ultrapassada (Santos; Lollo, 2016).

A intenção ao adicionar este fator à proposição é considerar a condição de umidade do solo na determinação do fator erosividade, uma vez que caso esteja saturado, o solo não absorverá as chuvas subsequentes. Este cenário amplia a possibilidade de desencadeamento de processos erosivos decorrentes do escoamento superficial mesmo com volumes recentes pouco significativos.

Os dados do GPM, tanto para compor o fator chuva recente (2 h) quanto para compor o fator acumulado de chuvas (24 h, 96 h, 360 h), são baixados no formato matricial e trabalhados em ambiente SIG como camadas de informação. Os volumes de chuva são representados por pesos previamente determinados na metodologia: maiores pesos para maiores volumes de chuvas em determinado espaço de tempo; menores pesos para menores volumes de chuva. O detalhamento dos respectivos pesos é apresentado no subitem que trata do método.

Para incluir na metodologia dados referentes ao solo utilizou-se o Mapa da Erodibilidade dos Solos à Erosão Hídrica do Brasil, escala 1:250.000 Este mapa, segundo Embrapa (2020) é baseado na interpretação especialista de erodibilidade dos solos nas unidades de mapeamento do Mapa de Solos elaborado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

O mapa considera granulometria, estrutura, conteúdo de carbono orgânico, permeabilidade, profundidade, presença ou ausência de camada compactada e pedregosidade do solo. A classificação proposta pela Embrapa foi utilizada sendo apenas relacionadas as classes do mapeamento aos respectivos pesos que representam maior ou menor suscetibilidade ao risco de desenvolvimento de erosões.

Em relação ao uso e cobertura do solo, Bertoni e Lombardi Neto (2008) destacam que é possível relacioná-los como redutores dos efeitos da chuva, ou seja, sua relevância é tamanha uma vez que pode reduzir a ação da água, que é o mais importante agente de erosão.

Para incluir este fator na metodologia o mapeamento prévio utilizado é a Coleção 6 da Iniciativa MapBiomas, que classifica o território nacional a partir de imagens Landsat com resolução espacial de 30 metros (Souza et al., 2020). Este mapa estabelece classes naturais e antrópicas que foram mapeadas para aplicação em escala de até 1:100.000. Neste caso, as classes onde se pressupõe uma condição de solo vegetado ou com uma cobertura que o deixará protegido do impacto da chuva receberá menor peso. O maior peso será atribuído às classes que apontem solo exposto e compactado, mais suscetível e com menor capacidade de infiltração.

O último fator considerado envolve o relevo, que para Claudino *et al.*, (2018) é o que mais contribui para modelos de erosão, pois influencia diretamente na intensidade e na força do escoamento superficial. No contexto da USLE o relevo é representado pelos valores de comprimento do declive e do grau de declividade unidos em um único fator. Dentre os demais, este é o fator que mais se utiliza das geotecnologias para aquisição de dados em diferentes proposições (Capoane, 2019).

Na presente proposição, para replicar o comprimento de declive e o grau de declividade os dados advém do MDT (Modelo Digital de Terreno) obtido via imageamento SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). O MDT serve para gerar os insumos necessários. As equações são realizadas nos produtos matriciais resultantes destes processamentos gerando-se finalmente o dado que representa o fator topografia. Neste caso os valores são adimensionais e seguem a proposta de Bertoni e Lombardi Neto (2008) para estratificar as classes, pressupondo-se que pesos menores são atribuídos às áreas mais planas e pesos maiores para as mais íngremes.

Com todos os dados de entrada em formato matricial à disposição, passa-se para a etapa do método. Neste ponto, é prerrogativa estabelecer os pesos e como os fatores serão integrados entre si para formar um único produto. Para tanto, se faz necessário criar uma hierarquia, para que seja possível traduzir de forma algébrica a relevância de um fator em detrimento de outro no contexto das erosões, aproximando a proposição da assertividade.

As etapas apoiaram-se principalmente no programa ArcMap versão 10.4 da ESRI. A plataforma R também foi utilizada para converter via linguagem de programação os dados IMERG fornecidos pelo GPM, que vêm em formato RT-H5 para o formato .GeoTIFF. Além disto, utilizou-se ainda o programa QGIS para ações de processamento do fator topografia pela facilidade de execução em algumas rotinas.

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

#### **4.5.2 Método**

Para correlacionar as características de cada um dos fatores à condição mais ou menos suscetível à erosão, definiram-se os pesos que seriam atribuídos aos *pixels* de cada arquivo matricial – individual para cada fator. Pela metodologia, pesos maiores indicam maior suscetibilidade e pesos menores indicam menor suscetibilidade ao risco de erosão.

##### **4.5.2.1 Determinação dos pesos**

Os valores numéricos para os pesos foram determinados a partir da 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 intervalo de pesos aplicado foi de 1 ao 144, estando entre estes os pesos: 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89. O peso 0 foi atribuído às classes nulas do ponto de vista do risco à 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.

Para o fator chuvas os pesos foram correlacionados em função dos volumes observados em 2 horas. Neste caso, as chuvas menores que 10 milímetros (mm) neste intervalo foram consideradas nulas, uma vez que Silva *et al.* (1997) concluíram se tratar de volume sem potencial erosivo em estudos realizados no Cerrado.

Devido ao período de análise do fator chuva ser relativamente curto (2 h) as classes deste fator foram propostas a cada intervalo crescente de 10, 20, 30 e 40 mm, determinados empiricamente com base nos estudos realizados por Cardoso, Ullmann e Bertol (1997). A primeira classe, com valor acima de 10 mm recebeu peso 21, sendo a classificação conforme Tabela 3:

Tabela 3 – Classes e respectivos pesos atribuídos ao fator Chuva.

| <b>Volume de Chuva em 2h</b> | <b>Peso</b> |
|------------------------------|-------------|
| < 10 mm                      | 0           |
| Entre 10 e 20 mm             | 21          |
| Entre 20 e 40 mm             | 34          |
| Entre 40 e 70 mm             | 55          |
| Entre 70 e 110 mm            | 89          |
| > 110 mm                     | 144         |

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Com a determinação dos pesos para o fator chuva, o mesmo processo foi realizado para estabelecer as classes do fator acumulado de chuvas. Neste caso, apoiou-se nos trabalhos de Huggins (1979) onde há uma categorização do que o autor chama de umidade antecedente. O autor determina três categorias: Condição I, onde os solos estão relativamente secos – umidade do solo baixa; Condição II onde há umidade do solo devido ao evento de chuva recente; e Condição III, onde os solos são muito mais úmidos e estão quase saturados, condição que corresponderia a situações de chuva.

Para trazer dados mais detalhados do ponto de vista da saturação do solo às condições propostas por Huggins (1979), dividiu-se o fator Acumulado de chuvas em três períodos de análise: o acumulado nas últimas 24 horas, o acumulado nas últimas 96 horas e o acumulado nas últimas 360 horas.

Para cada período um volume de chuvas foi considerado não erosivo (chuvas abaixo de 10 mm; 40 mm; e 70 mm, respectivamente aos acumulados em 24 h; 96 h e 360 h). Além disto, um maior número de classes foi proposto para o período de 24 h, por ser o mais relevante entre os três, considerando sua proximidade com o momento de análise no que diz respeito à saturação do solo. A classificação dos volumes, intervalos e pesos propostos são indicados na Tabela 4:

Tabela 4 – Classes e respectivos pesos atribuídos ao fator Acumulado de chuva.

| <b>Acumulado de chuva em 24 horas</b> | <b>Peso</b> | <b>Acumulado de chuva em 96 horas</b> | <b>Peso</b> | <b>Acumulado de chuva em 360 horas</b> | <b>Peso</b> |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|----------------------------------------|-------------|
| < 10mm                                | 0           | < 40 mm                               | 0           | < 70 mm                                | 0           |
| Entre 10 e 25 mm                      | 5           | Entre 40 e 60 mm                      | 3           | Entre 70 e 140 mm                      | 2           |
| Entre 25 e 40 mm                      | 8           | Entre 60 e 90 mm                      | 5           | Entre 140 e 210 mm                     | 3           |
| Entre 40 e 55 mm                      | 13          | Entre 90 e 140 mm                     | 8           | Entre 210 e 280 mm                     | 5           |

|                    |    |                    |    |                    |    |
|--------------------|----|--------------------|----|--------------------|----|
| Entre 55 e 85 mm   | 21 | Entre 140 e 200 mm | 13 | Entre 280 e 350 mm | 8  |
| Entre 85 e 115 mm  | 34 | > 200 mm           | 21 | > 350 mm           | 13 |
| Entre 115 e 150 mm | 55 |                    |    |                    |    |
| > 150 mm           | 89 |                    |    |                    |    |

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Observa-se que cada um dos períodos obedeceram uma lógica para sua determinação, para as 24 horas, seis intervalos foram propostos, sendo os três primeiros a cada 15 mm, e os três últimos a cada 30 mm. A última classe engloba todos os valores acima de 150 mm. Atribuiu-se intervalos menores nas chuvas de menor volume, e intervalos mais espaçados nas chuvas mais intensas – onde já são observados volumes expressivos.

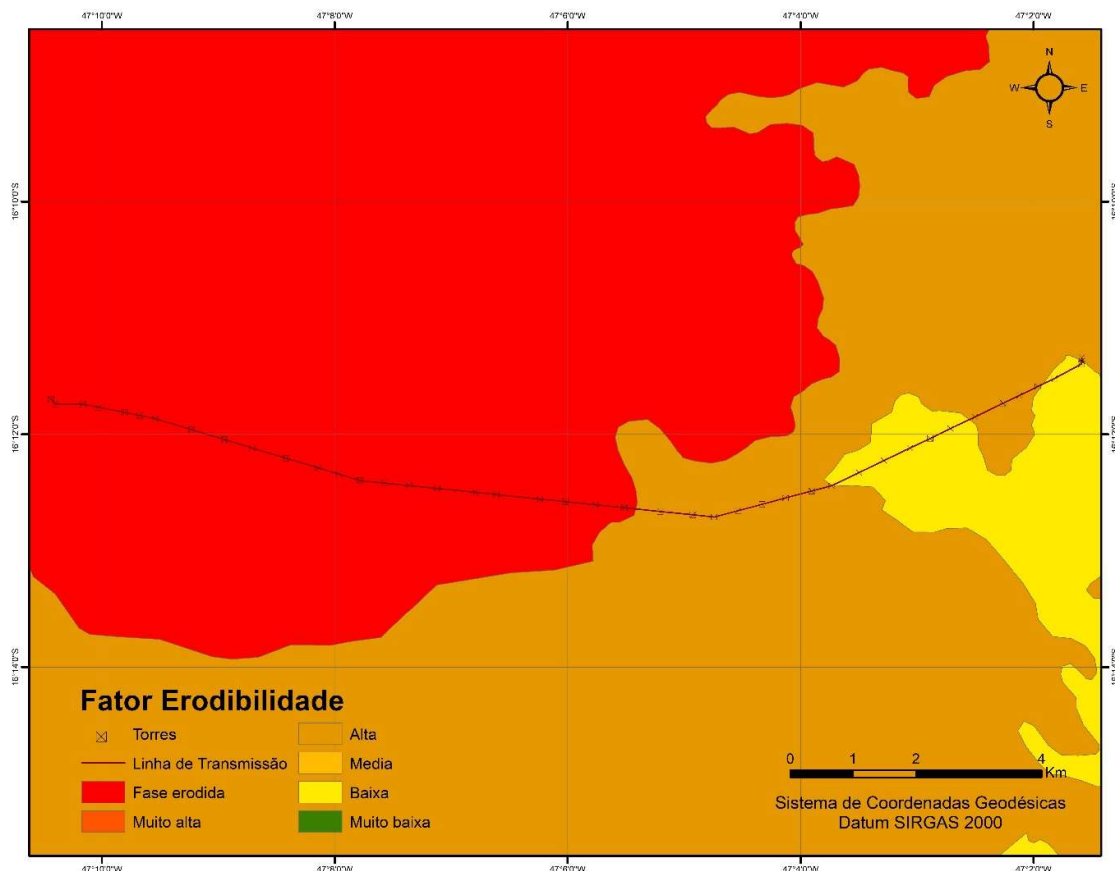
O período de 96 h adotou intervalos crescentes iniciando em 20 mm, 30 mm; e depois em 50 mm e 60 mm, até alcançar o volume de 200 mm. Da mesma forma, o período de 360 h teve suas particularidades para determinação dos intervalos, que neste caso foi constante, variando a cada 70 mm devido a ampla margem de tempo considerada.

É importante destacar que cada período proposto (24 h, 96 h, 360 h) resulta em um arquivo que representa o somatório de precipitação registrada (acumulada), ou seja, somam-se todos os arquivos de chuva das últimas 24 h de determinada área de interesse para criar a variável Acumulado de chuva 24h, que passa a ser um único arquivo. O mesmo se faz com as outras duas variáveis: somam-se os arquivos de chuvas das últimas 96 h, criando-se um segundo arquivo que representa este somatório e em seguida somam-se os arquivos de chuva das últimas 360 h. Com os três arquivos gerados individualmente é possível correlacionar os pesos – determinados na Tabela 4 em função dos volumes registrados nos *pixels*.

Realizadas as atribuições de pesos aos fatores dinâmicos – que se relacionam com a chuva – inicia-se a classificação por pesos para os fatores chamados estáticos: Erodibilidade, Uso da terra e Topografia. Para os dois primeiros a determinação das classes já estava incorporada nos arquivos originais, para o último, as classes foram determinadas de acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2008).

Para o fator Erodibilidade utilizou-se o mapeamento realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias – Embrapa, na escala 1:250.000. A Figura 21 apresenta o mapeamento na área onde está localizada a LT Mata Velha.

Figura 21 – Recorte do mapeamento de Erodibilidade ao longo da LT Mata Velha.



Fonte: Elaborado pela Autora (2022) com dados da Embrapa (2020).

O mapa em formato vetorial é disponibilizado de forma gratuita para *download*, sendo necessário convertê-lo para o formato matricial, neste caso, para que cada pixel assuma um peso dentre as classes.

O peso mais baixo considerado (5), foi relacionado à classe denominada pela Embrapa como “Muito baixa erodibilidade”, ou seja, mais resistente ao desencadeamento de um processo erosivo. No outro extremo, o maior peso (55) foi atribuído à classe “Fase erodida”. Segundo IBGE (2007), a classe Fase erodida corresponde às áreas que apresentam erosão classificadas como forte (sulcos rasos frequentes), muito forte (sulcos profundos/ravinas frequentes) e extremamente forte (sulcos muito profundos/voçorocas frequentes). É a classe considerada mais propensa ao desenvolvimento de processo erosivo, pois já está identificado uma erosão no local. A Tabela 5 indica as classes e os respectivos pesos propostos.

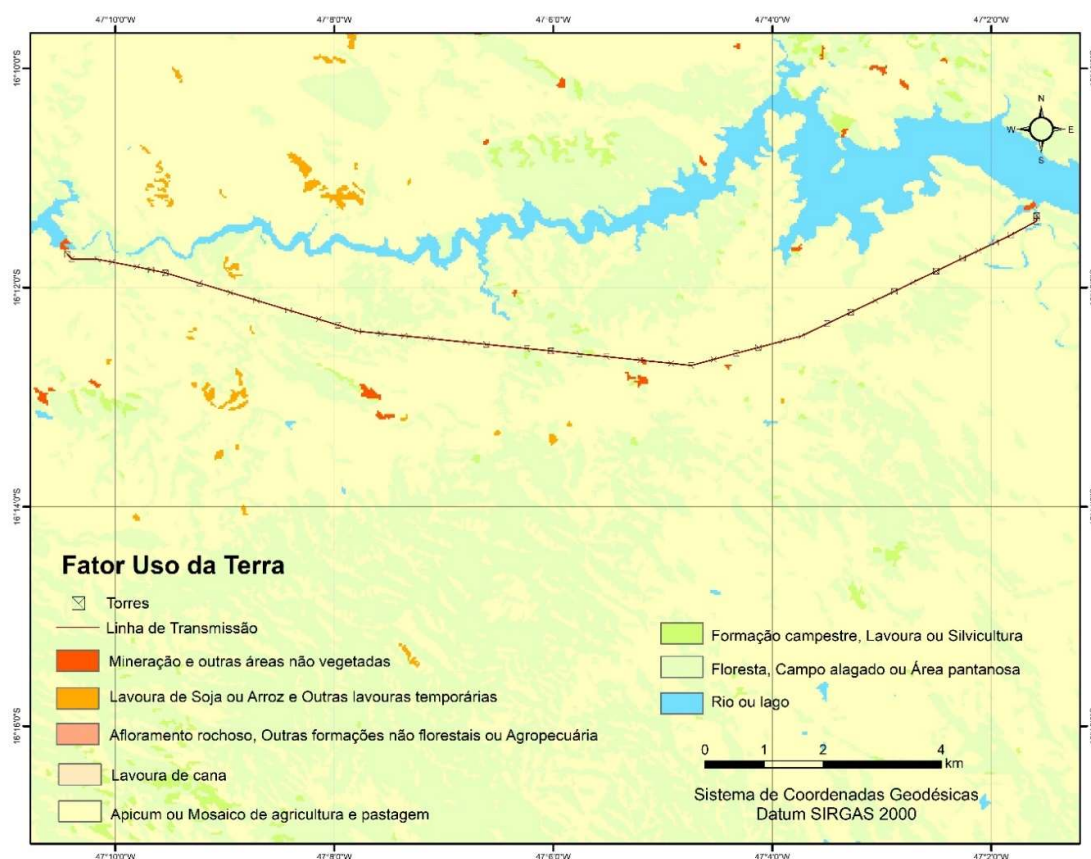
Tabela 5 – Classes contidas no mapeamento da Embrapa (2020) e os respectivos pesos atribuídos ao fator Erodibilidade.

| Erodibilidade | Peso |
|---------------|------|
| Muito baixa   | 5    |
| Baixa         | 8    |
| Média         | 13   |
| Alta          | 21   |
| Muito Alta    | 34   |
| Fase erodida  | 55   |

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

As classes de dunas e outras não contempladas no fator erodibilidade foram desconsideradas por estarem presentes no fator Uso da terra conforme classificados pelo MapBiomas na Coleção 6, que é a mais recente disponível. A Figura 22 apresenta o arquivo com suas classes na área onde está localizada a LT Mata Velha.

Figura 22 – Recorte do mapeamento de uso e cobertura ao longo da LT Mata Velha.



Fonte: Elaborado pela Autora (2022) com dados do MapBiomas (2020).

Neste caso, para estabelecer os pesos, as classes foram agrupadas de acordo com a suscetibilidade que representavam. Quanto mais protegida a terra, como é o caso das áreas já alagadas ou vegetadas com florestas, menor o peso atribuído (3). Na outra ponta, com maior peso (55) estão as classes mineração e outras áreas não vegetadas, por caracterizarem mais suscetibilidade à erosão. A Tabela 6 indica as classes e os respectivos pesos propostos.

Tabela 6 – Classes contidas no mapeamento do MapBiomas (2020) e respectivos pesos atribuídos ao fator Uso da Terra.

| Uso da terra                                                           | Peso |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| Floresta ou campo alagado ou áreas pantanosas                          | 3    |
| Formação campestre ou lavoura perene ou silvicultura                   | 5    |
| Apicum ou mosaico de agricultura e pastagem                            | 8    |
| Lavoura de cana                                                        | 13   |
| Afloramento rochoso ou outras formações não florestais ou agropecuária | 21   |
| Lavoura de soja ou lavoura de arroz ou outras lavouras temporárias     | 34   |
| Mineração e outras áreas não vegetadas                                 | 55   |

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

A lógica neste caso foi agrupar os usos que tem parâmetros próximos em relação à cobertura do solo. Para Arabameri e Pourghasemi (2019), em condições naturais, a vegetação ajuda a manter o solo no lugar e protegê-lo do impacto direto das chuvas. Neste contexto as lavouras foram avaliadas como cobertura vegetal, mas de forma distinta em função do tempo que se fazem presentes como proteção para o solo e pela forma de manejo comumente praticado.

Avançando para determinação dos pesos do último fator chamado topografia, utilizou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) gerado a partir das imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Com o MDT obteve-se o mapa de declividade (D) em formato matricial expresso em porcentagem; em seguida, o mesmo MDT foi utilizado para obtenção do comprimento de rampa, que se baseia na delimitação das Bacias Hidrográficas. O MDT ainda foi utilizado para gerar a rede de drenagem.

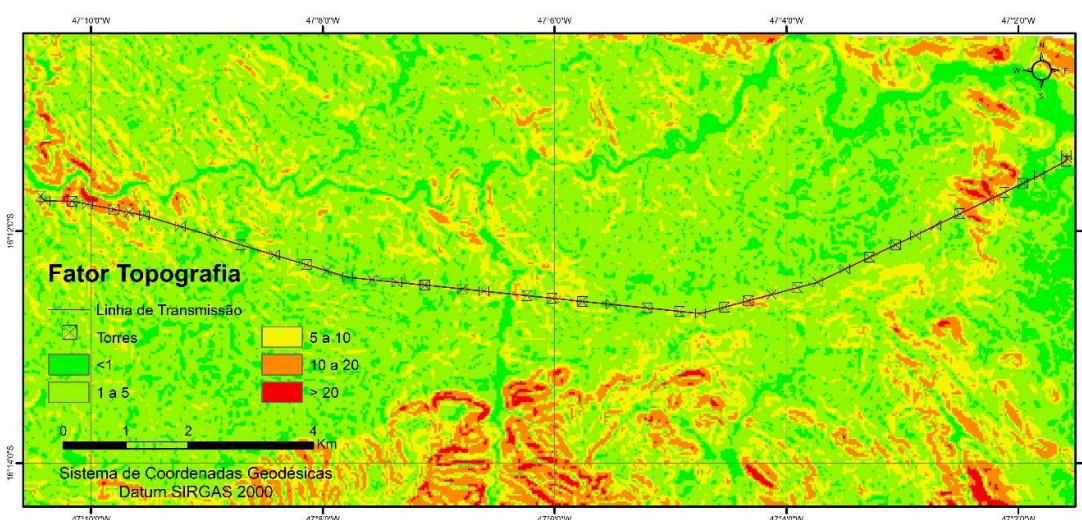
Ambos os arquivos (bacias hidrográficas e rede de drenagem) foram convertidos em formato vetorial realizar a expressão  $C = A / 4 \cdot L$ , onde C é o comprimento de rampa; A corresponde à área da bacia hidrográfica; e L ao comprimento total da drenagem. Este arquivo foi convertido para o formato matricial



sendo possível prosseguir com as outras etapas necessárias ao cálculo deste fator. Neste ponto, finalmente aplicou-se a expressão algébrica  $FT = 0,00984 \cdot C^{0,63} \cdot D^{1,18}$ , onde FT é o Fator Topografia; C é o Comprimento de rampa – arquivo matricial e D é a declividade – arquivos matriciais recém gerados. A expressão foi realizada na *Raster calculator* disponível no programa ArcMap.

A partir do produto da expressão, obteve-se um novo arquivo matricial para ser reclassificado conforme Bertoni e Lombardi Neto (2008), apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Recorte do Fator topografia ao longo da LT Mata Velha.



Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

As cinco classes adimensionais apontadas na Figura 23 receberam um peso. A Tabela 7 apresenta os valores atribuídos.

Tabela 7 – Classes propostas por Bertoni e Lombardi Neto (2008) e respectivos pesos atribuídos ao fator Topografia.

| Topografia | Peso |
|------------|------|
| < 1        | 1    |
| 1 a 5      | 2    |
| 5 a 10     | 3    |
| 10 a 20    | 5    |
| > 20       | 8    |

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Para correlação das classes com os respectivos pesos considerou-se o relevo como variável energética da proposição. Iniciou-se atribuindo o menor valor da sequência de Fibonacci (1), por subentender que em relevos planos é mínima a contribuição deste fator para favorecer o desencadeamento de processos erosivos.

Neste caso, obedecendo o número de classes determinadas por Bertoni e Lombardi Neto (2008) o valor correspondente ao maior peso (8) está relacionado aos terrenos mais acidentados, que tendem a potencializar a velocidade do escoamento e contribuir com o desenvolvimento de processos erosivos.

#### *4.5.2.2 Aplicação da hierarquia*

Com os pesos aplicados em todas as classes dos fatores envolvidos, uma segunda etapa da metodologia consistiu em determinar valores hierárquicos entre os fatores para finalmente obter o mapa final de suscetibilidade ao risco de erosão.

Presumindo ser possível determinar os fatores prevalentes no contexto da erosão como realizado nas pesquisas de Martins, Bergmann e Schmidt (2021), aplicou-se a proposta de hierarquia sugerida por Saaty (2008), chamada AHP (*Analytic Hierarchy Process*). O processo de AHP busca representar a relação de importância entre os fatores, considerando que pela natureza distinta, alguns são mais determinantes que outros para o desencadeamento de uma erosão. Ao comparar os fatores aos pares, atribuindo notas para cada conjunto julgado, obteve-se em porcentagem qual a relevância individual de cada fator no modelo.

O fator uso da terra foi considerado o mais relevante e o grau de relevância esteve estimado em 34 %; em seguida, está o fator chuva, com 29 %. Com 15 % está o fator acumulado de chuva, que recebe este peso após suas variáveis (24 h, 96 h, 360 h) receberem uma hierarquia prévia entre si (conforme detalhado em seguida). Por último, os fatores erodibilidade e topografia receberam 11 % cada um em relação à importância no modelo, totalizando 100 %.

A relação de importância obtida por meio da aplicação da AHP atende conceitualmente a hierarquia entre os fatores, destacando o uso da terra praticado e o volume de chuvas como principais responsáveis do conjunto para o desencadeamento de um processo erosivo.

Uma especificidade do fator acumulado de chuva é ser composto por três arquivos matriciais somados, um que representa a chuva das últimas 24 h, outro que

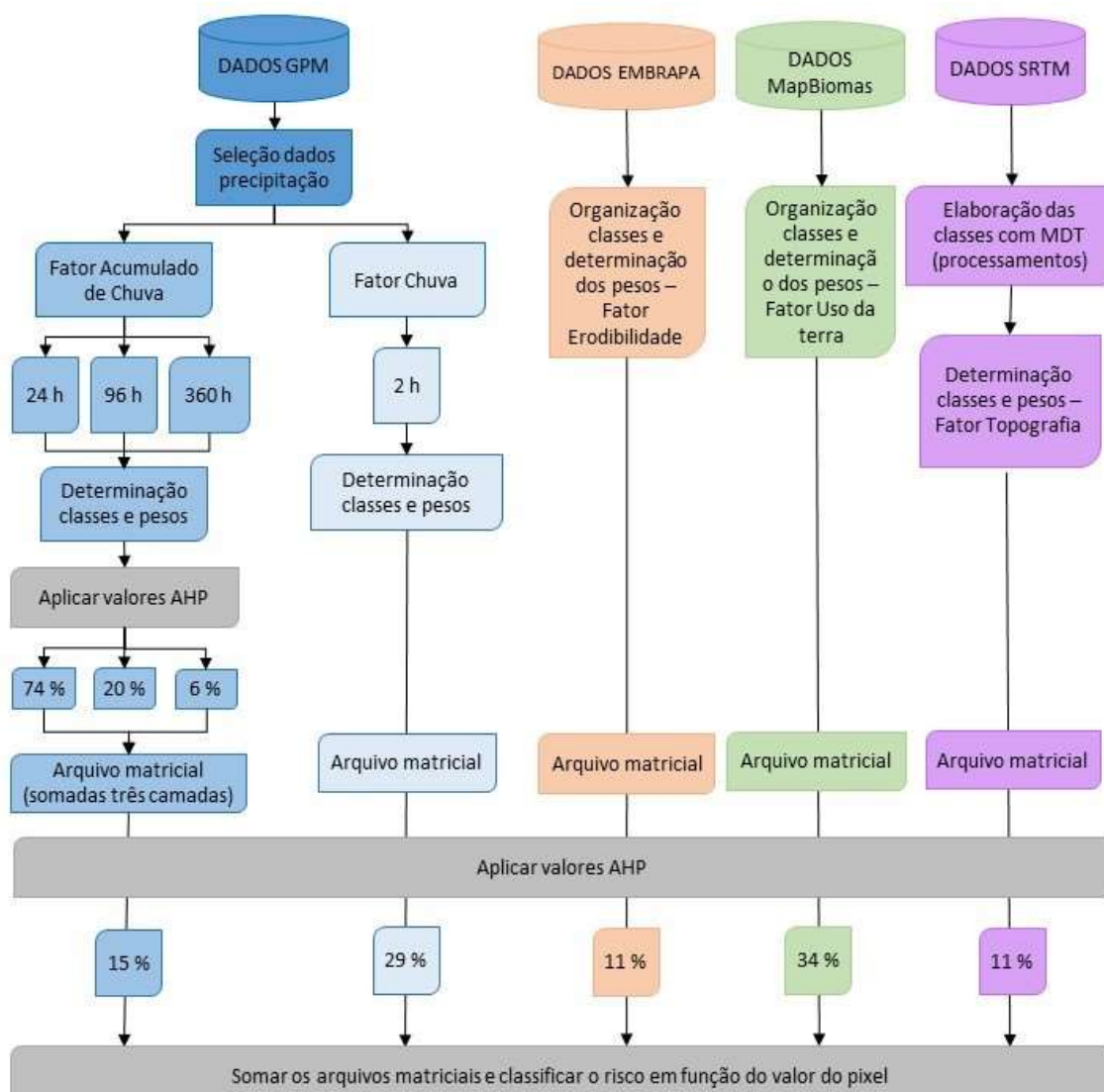
representa a chuva das últimas 96 h e o último, relacionado à chuva do período de 360 h. Tais variáveis receberam uma classificação de importância entre si antes de serem somadas para compor o arquivo do fator Acumulado de chuva.

Partiu-se do princípio que as chuvas ocorridas nas últimas 24 h são mais relevantes para composição do fator acumulado de chuva que as ocorridas em 96 h e 360 h, isso porque as chuvas mais recentes têm menos tempo para infiltrar, ou no caso de um solo já encharcado, menos tempo para evaporar quando comparado com os volumes precipitados ao longo de um maior espaço de tempo.

Desta forma, a variável 24 h recebeu 74 % de relevância quando comparado às variáveis 96 h e 360 h, que receberam respectivamente 20 % e 6 %. Neste caso, aplicou-se a relevância determinada individualmente a partir da multiplicação nos arquivos matriciais, que em seguida são somados para que sigam na metodologia como um único arquivo matricial que representa o fator acumulado de chuva.

A expressão algébrica que resulta no mapa de suscetibilidade ao risco de erosão gerado é  $(\text{chuva} * 0,29) + \{ [ (\text{acumulado de chuva 24 h} * 0,74) + (\text{acumulado de chuva 96 h} * 0,20) + (\text{acumulado de chuva 360 h} * 0,06) ] * 0,11 \} + (\text{Erodibilidade} * 0,11) + (\text{uso da terra} * 0,34) + (\text{topografia} * 0,11)$ . O modelo proposto está melhor organizado na forma de fluxograma, conforme apresenta a Figura 24.

Figura 24 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para produção do modelo.



Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Ao final o mapa de suscetibilidade ao risco de erosão é resultado da multiplicação de cada arquivo por seu valor hierárquico, congregando-os em um único arquivo, que apresenta o modelo final a partir da soma destes arquivos matriciais.

#### 4.5.2.3 Classificação do risco

Os valores registrados nos *pixels* após a álgebra são adimensionais e foram agrupados em cinco intervalos empíricos classificados em termos linguísticos alinhados ao aplicado pelo Grupo CPFL. Os intervalos foram propostos considerando

o menor e maior valor possível na metodologia considerando o cenário com menor risco a erosão e maior risco a erosão respectivamente.

As classes são: risco raro para valores até 10; risco baixo para valores entre 11 e 20, risco possível para valores entre 21 e 35, risco provável para valores de 36 a 50; e risco quase certo para valores maiores que 50, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação final da suscetibilidade ao risco de erosão.

| Valor resultante | Risco à erosão |
|------------------|----------------|
| Até 10           | Raro           |
| 11 a 20          | Baixo          |
| 21 a 35          | Possível       |
| 36 a 50          | Provável       |
| > 50             | Quase certo    |

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Da forma como foi construída a metodologia pode-se alcançar como valor mínimo da somatória o valor próximo de 2 nas situações onde não é observada chuva significativa (acima dos valores mínimos estabelecidos). Como valor máximo, considerando os piores cenários erosivos previstos, o valor máximo é 78. A partir destes valores tomados como máximo e mínimo considerou-se o intervalo para as classes sugeridas, indicadas na Tabela 8.

A escala de suscetibilidade à erosão nesta etapa da metodologia foi pensada para manter o intervalo de cinco classes, assim como a publicação de Valladares *et al.* (2012) que envolveu um modelo multicritério para mapas de suscetibilidade à erosão em áreas rurais. 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. Outras pesquisas, como a de Souza *et al.* (2017) também explorou metodologias semelhantes com critérios próximos para a classificação de processos erosivos, mas neste caso ao longo de ferrovias, que em parte se assemelha às LTs pelo traçado linear.

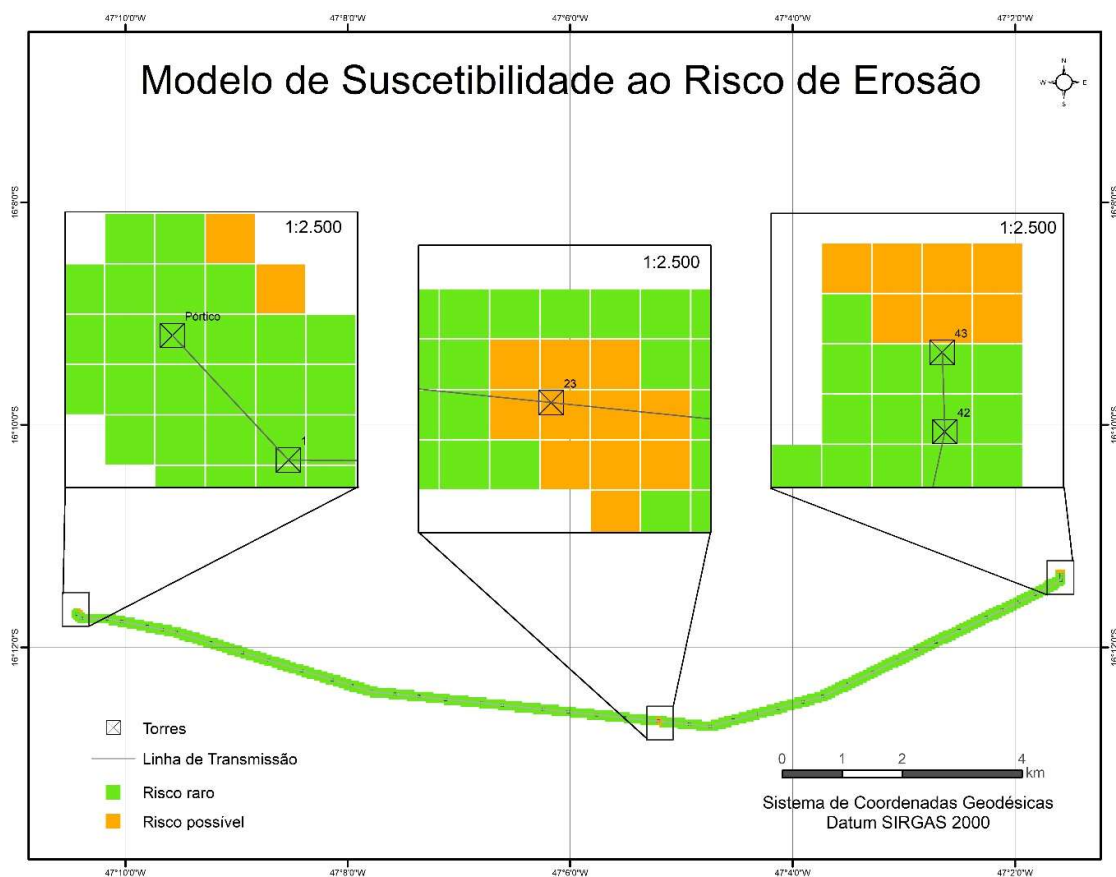
Com o mapa produzido, representado conforme proposto, dispõem-se de um material indicativo de risco à erosão. Apontam-se os locais que – em função do arranjo de condições físicas combinado aos volumes de chuva ocorrido, demandam maior atenção das equipes de campo para contenção dos pontos que indicam maior

chances para o desencadeamento do processo. A possibilidade de atualização horária em função dos volumes de chuva sem custos de aquisição de dados garante uma resposta muito próxima mesmo se apoiando em insumos obtidos de maneira remota.

#### 4.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da forma como foi construída, a metodologia resulta em um mapa de suscetibilidade de risco à erosão para dia e horário em análise. A especificação se deve por ser um modelo dinâmico, com possibilidade de atualização horária em relação aos dados de precipitação. A Figura 25, apresenta o modelo que representa a suscetibilidade ao risco à erosão para o dia 06 de abril de 2022, com o registro de precipitação entre 5h00min e 7h00min da data citada, e o fator acumulado de chuvas utilizou a mesma referência para compilar os dados, conforme metodologia.

Figura 25 – Resultado do modelo de suscetibilidade (06 de abril de 2022 - 7h00min).



Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

A Figura 25 apresenta a localização das áreas de risco a erosão. Neste caso, é possível observar que o traçado da LT Mata Velha foi amplamente classificado com risco raro à suscetibilidade à erosão. Porém, em alguns pontos – destacados na Figura 25, encontra-se a classificação intermediária, chamada risco possível.

Nestes pontos existem 3 torres que demandam atenção: a torre relacionada com nome operacional Pórtico, que está a cerca de 50 metros da área com risco possível; a de nome operacional 23, que inspira maior atenção, visto que está sobre a área mapeada com risco possível; e a torre de nome operacional 43, que tem sua estrutura visualmente rente à área com mesma classificação.

Especificamente neste período não houve chuvas registradas, nem nas últimas duas horas, tampouco no período anterior em 15 dias, que representa o acumulado de chuvas em 360 h. Cabe lembrar que as chuvas em duas horas em volume menor que 10 mm são desconsideradas, ou seja, o sistema as entende como “sem chuva”. O mesmo vale para o acumulado de chuva, sendo desconsiderados volumes menores que 10 mm, 40 mm e 70 mm, para 24 h, 96 h e 360 h, respectivamente. Estes volumes para os intervalos de tempo sugeridos podem ser tratados como chuvas “não-erosivas” sendo justificada a anulação de peso na metodologia para tais volumes.

É importante pontuar também que o momento analisado corresponde ao final da estação de chuvas no Cerrado e por isso os acumulados naturalmente tendem a ser menores. Este cenário acende um alerta, uma vez que este risco apontado no mapeamento não está considerando ocasiões de chuvas, pois não ocorreram. Com chuva os pesos incidem em função do volume e então se agravará o *status* de risco.

Ao dissecar o resultado gerado pelo modelo, observa-se que as áreas onde estão as torres 23 e 43 são classificadas com alta erodibilidade pela Embrapa (peso 21); o uso da terra praticado remete a áreas com mineração ou não vegetadas conforme mapeado pelo Mapbiomas (peso 55) e em relação ao fator topografia, trata-se de área de valor adimensional entre 1 e 5 (peso 2) correspondente a áreas com comprimento de rampa e declividade pouco proeminentes.

A área de risco mapeada como possível, próxima a torre chamada pórtico, apesar de mais afastada da estrutura, tem classes mais preocupantes em relação à erodibilidade e à topografia. Trata-se de área de fase erosiva segundo Embrapa recebendo peso 55 por conta disto e em relação à topografia recebe peso 3, referente ao valor adimensional entre 5 e 10 – área mais declivosa. Em relação ao uso a terra praticado, tem peso 55, por se tratar de outras áreas não vegetadas.

Destes três fatores estáticos, a erodibilidade em função das condições do solo e o tipo de uso da terra são os que impõem maior preocupação. Ainda que dois dos três pontos com risco possível não estejam sob a torre - a dinâmica erosiva pode exigir intervenção preventiva nestas áreas, revegetando mesmo que com espécies rasteiras – pelas limitações exigidas em função da altura dos cabos.

Acerca da vegetação, Guerra (1994) pondera que a caracterização da cobertura vegetal passa a ser um fator de maior relevância quando se trata de determinar o nível de proteção dos solos, pois a ameniza os danos da erosão de várias maneiras: por meio dos efeitos espaciais da cobertura vegetal, dos efeitos de energia cinética da chuva e do papel da vegetação na estabilidade dos agregados de solos.

No período de seca, as concessionárias podem utilizar o mapeamento como documento norteador sobre em quais pontos ao longo das torres há um arranjo de fatores estáticos (que não mudam tão rapidamente quanto os volumes de chuva) que já indicam suscetibilidade à erosão.

O mapeamento tem esta finalidade - apontar pontos que mesmo sem a atuação dos fatores dinâmicos (relacionados às chuvas), suscitam cuidados. Nestes locais é importante que sejam tomadas medidas – principalmente de cobertura do solo, para que em ocasiões de chuva volumosa, em que o risco invariavelmente se elevará, o solo não sofra erosão, ou para que os danos, caso ocorram, sejam menores.

É importante frisar que em momentos sem chuvas – recente e pretérita – a classificação de risco à erosão vincula-se exclusivamente aos fatores chamados estáticos: Erodibilidade - produzido pela Embrapa; Uso da terra - produzido pelo MapBiomass; e Topografia - que é produzido a partir das imagens do radar SRTM.

Ou seja, ainda que haja alterações *in loco* em algum destes parâmetros posteriores ao imageamento/mapeamento a atualização do risco somente será possível quando estiverem disponíveis novos dados para estas entradas.

O MapBiomass costuma atualizar suas bases anualmente, porém não há indicação de periodicidade de atualização dos dados da Embrapa. Por outro lado, ainda que as imagens do SRTM possam ser obtidas diariamente - favorecendo a atualização constante, dos três fatores estáticos é o que menos sofre alterações de ordem natural, não exigindo reprocessamentos frequentes.

É importante destacar que a possibilidade de atualização constante no período chuvoso também se configura como uma ação preventiva, para que pontualmente se avalie as áreas que receberam maiores volumes em determinado período –



naturalmente elevando o risco à erosão por este motivo. Neste caso estas áreas que demandam observação *in loco* podem ser facilmente identificadas, agilizando o processo de agendamento de vistoria como prioridade ou não em função da classificação obtida.

Algumas ressalvas são necessárias do ponto de vista operacional da metodologia: os dados do GPM estão disponíveis passadas 4 horas no modo *Early*, o que justifica o termo “tempo quase real” aplicado. O tamanho do *pixel* do modelo é de 30 metros, o que determina baixa resolução espacial.

Ainda que o contexto possa exigir um mapeamento com melhor resolução, a origem dos dados é compatível com a generalização e se mantém a relevância do mapeamento, sobretudo considerando a extensão das LTs.

A simbologia do modelo pode ser explorada de diferentes formas, é possível detalhar por valor do *pixel* e observar aqueles que estão próximos do valor limítrofe para avançar na classificação do risco.

Além disto, a forma de representar o risco pode ser aperfeiçoada, seja por torre ou por vão, esse último não justificando a generalização por entender que o elemento suscetível é a torre em um primeiro momento, e não os cabos (que estão mantidos entre as torres, compondo o vão).

Frisa-se ainda que a proposição não pretende desabonar metodologias específicas, como a USLE, amplamente aplicada, tampouco outras pesquisas que se apoiam em dados coletados *in loco* com instrumentais e processos consagrados para determinação da perda de solo. Trata-se tão somente de uma iniciativa para orientar a gestão das áreas no entorno das torres que compõem o sistema de transmissão de energia a partir de dados gratuitos.

A intenção é direcionar as ações para as áreas sensíveis, assim avaliadas pelo arranjo de fatores considerados, tomando o modelo como norteador no contexto do planejamento territorial ambiental sob aspecto das erosões.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Direta ou indiretamente todos os fatores foram adquiridos a partir de análises subsidiadas por satélites. Ainda que limitados à escala, os dados para alimentar o modelo metodológico são acessados gratuitamente, condição que garante irrestrita propagação, exigindo apenas o conhecimento técnico para a replicação.

Em decorrência da supressão da cobertura vegetal necessária à instalação do sistema de energia e pelas restrições para sua manutenção quando da operação, as Linhas de Transmissão demonstram ser uma infraestrutura que pode impactar de maneira negativa nos ambientes sensíveis a degradação do solo.

O estudo apresentou uma metodologia que busca contribuir com determinação do risco ao desenvolvimento de erosões a partir de fatores reconhecidamente importantes, porém obtidos e arranjos de forma simplificada, favorecendo sua replicação. Insumos espacializados, atualizáveis e gratuitos foram prezados na proposição do modelo metodológico que congregou de maneira empírica pesos e hierarquias aos fatores dinâmicos e estáticos.

O resultado obtido permitiu observar que se estabelece um risco ao conjunto de fatores estáticos, sendo este potencializado à medida que são adicionados os fatores dinâmicos: volumes de chuva precipitam no período observado e volumes acumulados. A inovação da proposição torna-se notória, entre outros aspectos, pela utilização de dados da constelação GPM, que registra os volumes de chuvas continuamente para todo o globo terrestre e dispõe seus dados sem custos.

Por fim, vale ressaltar que o estudo e o princípio metodológico apresentados se estruturam em uma condição de avaliação macro da área de interesse, sendo considerado um primeiro procedimento para avaliação de suscetibilidade ao risco de desencadeamento de processo erosivo em um processo iterativo e dinâmico.

Uma vez obtida a resposta, faz-se necessário proceder com o levantamento de dados e aprofundar as análises pontuais (escala maior de trabalho/detalhe) do local, atualizando a real suscetibilidade a erosão.

A validação *in loco* pode indicar a necessidade de atualização à medida que comparativos de campo sejam vinculados aos resultados apresentados pelo modelo.

Nos termos sugeridos, a proposição permite que sejam realizadas adaptações na metodologia para aproximá-la condições e biomas, contribuindo para o monitoramento de erosões ao longo de todas as LTs do país.

## 5 REALIDADE AUMENTADA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO<sup>5</sup>

### 5.1 INTRODUÇÃO

As Linhas de Transmissão (LT), enquanto um sistema formado por torres e cabos, ocupa determinada porção de terra. O setor demanda alta confiabilidade de seus componentes para entregar energia de forma contínua, sem intercorrências (Sermet; Demir; Kucuksari, 2018).

Uma das ameaças ao pleno funcionamento do sistema é a erosão, que avançando em direção à torre, pode instabilizar a estrutura, comprometendo os cabos e, por conseguinte, a transmissão de energia. Para estimar áreas sensíveis à erosão, modelos requerem parâmetros específicos para indicar a suscetibilidade ao risco de erosão frente à ação da chuva, assim como proposto na modelagem apresentada no capítulo 4. Porém, para que surtam o efeito preventivo esperado, faz-se necessário aproximar os modelos elaborados das ações em campo.

Do ponto de vista da gestão territorial, por se tratar de infraestrutura linear de reconhecida extensão, o monitoramento *in loco* e constante passa a ser um desafio concreto (Li *et al.*, 2021). Especificamente para o monitoramento de processos erosivos, a dinâmica envolvida no tema exige que novas tecnologias intuitivas sejam aliadas (Klein, 2021), potencializando resultados que são propostos nas modelagens.

Dentre os recursos apoiados em inteligência artificial, a Realidade Aumentada (RA) é uma das ferramentas que permite uma visão do mundo real com informações adicionais (Mezzomo; Kawamoto; Braz, 2020), o que tende a facilitar a interação com os materiais produzidos.

Voltada ao setor de transmissão de energia, a aplicação da RA agrega vantagens ao oferecer meios que permitam uma visualização mais realista e por isso, simplificada no contexto técnico, acessível ao entendimento das equipes de campo.

Apoiar-se em modelos preditivos, como os sugeridos no Capítulo 4 direcionam idas a campo, tornando-as mais pontuais com base no que apontam os mapas. Ainda assim, um número reduzido de equipes com conhecimento específico ao tema está à disposição.

---

<sup>5</sup> As pesquisas relacionadas neste capítulo não foram submetidas à publicação.

Nestes termos, apresenta-se uma aplicação de Realidade Aumentada para atender as demandas de representação virtual do risco ao desenvolvimento de erosões durante as inspeções de campo.

Com a aplicação proposta, além de facilitar a identificação da suscetibilidade determinada a partir dos dados processados no modelo, promove-se o registro de novas informações – diretamente de campo, vinculadas à sua posição geográfica.

Desta forma é possível tanto receber informações e “concretizá-las” de forma virtual, quanto alimentar o banco de dados a partir de novos registros virtuais, trazendo informações valiosas, obtidas *in loco*, devidamente posicionadas no espaço.

Os objetivos direcionam a pesquisa a explorar os mecanismos da RA como forma inovadora complementar para o monitoramento das erosões, apontando promissores resultados a partir dos recursos de simulações e interação, configurando o diferencial desta proposição.

De posse destas premissas, encontram-se subsídios para apresentar este recurso como aliado, tornando mais eficiente sob a perspectiva das erosões o monitoramento e a gestão dos ativos.

## 5.2 JUSTIFICATIVA

Os recentes avanços na tecnologia de sistemas computacionais e de dispositivos eletrônicos em geral viabilizaram a introdução de interfaces ainda mais interativas, que permitem que usuários tenham a impressão de que objetos virtuais sejam parte do ambiente real (Mezzomo, Kawamoto, Braz, 2020). Os objetos virtuais são representações projetadas em formato tridimensional a partir da tela à disposição do usuário e são capazes de ampliar a compreensão do espaço geográfico e de fenômenos associados, ao contrário da representação bidimensional - que limita o potencial dos dados espaciais (Klein, 2021).

Com esta tecnologia, espaço geográfico, paisagem, dados e mapas interagem sendo por isso um importante aliado para subsidiar o planejamento e a tomada de decisão (Pereira, 2017). Partindo-se deste pressuposto, a RA se apresenta como uma das ferramentas de computação tangíveis para compreender a realidade física a partir de uma experiência virtual interativa (Prado; Araújo; Amaral, 2020).

A tecnologia facilita o entendimento, fazendo com que o agente se sinta mais capaz e motivado para a execução. A motivação decorre da dinâmica do sistema, que

auxilia na imersão, pois permite que o observador interaja como se essa informação virtual de fato existisse no mundo real (Werner, 2018).

Esta é uma das principais vantagens da RA segundo Bobrich e Otto (2002), pois a combinação de cenas reais e virtuais em tempo real faz com que seus usuários interajam simultaneamente. O processo apura a percepção a partir da interação que promove com o mundo real, e faz com o que os objetos virtuais exibam informações que o usuário não pode detectar sozinho (Machado; Farinhaki; da Silva, 2013), sendo este um valioso subsídio para gestão territorial em termos de monitoramento.

Sob esta perspectiva, e a partir desta premissa vinculou-se os modelos indicativos de suscetibilidade ao risco de erosão – gerados no Capítulo 4 a uma plataforma de Realidade Aumentada desenvolvida pelo Engenheiro de Software Gustavo Vargas de Andrade.

A aplicação chamada ErosiAR é fruto do Trabalho de Conclusão de Curso publicado pelo autor no ano de 2022, e desponta como iniciativa capaz de contribuir sobremaneira com o processo de gestão territorial sob o aspecto, estreitando a relação entre as equipes de campo e os produtos cartográficos gerados.

A aplicação se propõe a auxiliar na localização das áreas sensíveis apontadas no modelo e permite ainda simular diferentes volumes de chuva para a área destacada, que pode ou não se basear em previsões meteorológicas, de forma a avaliar como se comporta o risco depois da alteração.

Ao localizar estas áreas, a aplicação prevê também que as equipes de inspeção – ainda que sem conhecimento específico sobre o tema erosão, reportem as condições reais observadas nestes locais pré-estabelecidos ou em outros que julgarem relevante.

Com a ferramenta em funcionamento, especificamente no setor elétrico, as empresas ampliam sua capacidade de monitoramento para manter o sistema em segurança para a suscetibilidade ao risco de erosão, pois habilita muito mais equipes a reportarem condições sobre o tema de forma orientada, que contribuem intuitivamente quanto a este aspecto.

A aplicação ErosiAR, conforme estruturada, confere autonomia às equipes de campo e principalmente validação dos indicativos de erosão sugeridos pelo modelo de suscetibilidade ao risco de erosão, que é um dos aspectos sensíveis que podem ameaçar a operação do sistema de transmissão de energia do país.

De posse destas informações é possível planejar diferentes ações com base na localização da ocorrência e do nível de emergência da operação, para que se acione a equipe mais próxima ou minimamente se antecipe a próxima vistoria.

### 5.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Mecanismos apoiados em inteligência artificial podem oferecer ganhos de entendimento do espaço (Pereira, 2017), pois superam as limitações vinculadas às duas dimensões e ao caráter estático dos mapas tradicionais impressos promovendo imersividade e interatividade (Pereira; Centeno, 2016).

Autores como Lobo e Christophe (2020) destacam que a RA desponta como tecnologia mais indicada quando se pretende projetar elementos virtuais em determinada localização geográfica. Esta condição permite que dados gerados por computador pareçam coexistir no mesmo espaço que o usuário se encontra (Mezzomo; Kawamoto; Braz, 2020).

Werner (2018) reforça que a RA é uma tecnologia onde recursos complementam o mundo físico, sincronizando elementos virtuais com o mundo real, em oposição à Realidade Virtual (RV), que coloca o usuário em um ambiente virtual, ou seja, isolado dos sentidos do mundo real físico (Braud, *et al.*, 2017).

Segundo Erra e Capece (2017), embora o uso esteja amplamente centrado na indústria de jogos e entretenimento, a RA tem o potencial de revolucionar os processos de negócios e fluxos de trabalho corporativos (Global Industry Analysts 2015).

No Brasil, especificamente para o setor elétrico iniciativas foram aplicadas para manutenção dos sistemas de energia, como divulgado na pesquisa de Carmo, Kelner e Reis (2010), desenvolvida junto a CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco, empresa brasileira subsidiária da Eletrobrás.

Os autores propuseram destaques visuais por meio de RA para identificar as partes de componentes elétrico, como forma de eliminar dúvidas durante o processo de manutenção, para reduzir de ocorrência de erros, principalmente em uma fase crítica do procedimento.

Outras empresas como a EDP e a Copel têm iniciativas mais recentes baseadas em óculos que não requerem uso das mãos. Especificamente nas pesquisas da Copel o aplicativo Copélia emprega Realidade Aumentada para

treinamento e manutenção auxiliando seus usuários na operação de religadores. Esses recursos permitem que eletricitas generalistas executem tarefas que, de outra forma, seriam executadas exclusivamente por profissionais qualificados (Bastos *et al.*, 2021).

Empresas estrangeiras também vêm apostando na tecnologia para visualização de diagnósticos, facilitando a resolução de problema ainda durante a inspeção. A Vorarlberger Energienetze GmbH, operadora de redes de eletricidade e gás natural na Áustria, tem utilizado a RA em um estágio piloto para mapear a localização de cabos e tubulações subterrâneos. (Leica-Geosystems, 2022).

Outras concessionárias como Duke Energy e conEdison, com sede nos EUA; EDF localizada no Reino Unido; e KEPCO, da Coreia do Sul, também tem experimentado os recursos para melhorar a segurança operacional para reduzir acidentes. (Globaldata Energy, 2019). A partir da RA implementada, os técnicos em campo podem acessar documentações para ampliar a consciência situacional diretamente de seu dispositivo móvel.

Trabalhos como o publicado por Schindewolf e Schmidt (2012), tem explorado a aplicação da RA voltada à temática de erosão. Em comum com a presente proposição, a pesquisa propôs a aumentar a interatividade com os dados geográficos favorecendo a experimentação intuitiva.

As informações virtuais projetadas em ambiente real são o subsidio oferecido ao usuário para impactar positivamente sua cognição (Esfahani *et al.*, 2018). Isso porque a RA pode aprimorar as habilidades no processo de entendimento dos mapas de usuários - mesmo daqueles não familiarizados com esta forma de representação (Alzahrani; Alfouzan, 2022).

A interação proposta entre os elementos virtuais e o ser humano permite que os cenários – ainda que ajustáveis e virtuais, sejam percebidos como se fossem reais, possibilitando a localização, a manipulação e a interação com esses elementos (Carvalho; Canto, 2019).

## 5.4 MATERIAIS E MÉTODO

Trata-se de uma proposição que demonstra o uso da Realidade Aumentada (RA) para otimizar o processo de gestão das Linhas de Transmissão (LTs) tendo como base de representação o modelo de suscetibilidade ao risco de erosão.

Para promover a interação entre o usuário e o modelo proposto, o sistema do aplicativo deve ser intuitivo e permitir que o usuário se oriente por si só, de modo a não necessitar de conhecimento prévio para operá-lo.

Desenvolvê-lo em um dispositivo como *tablets* e *smartphones* também oferece vantagens para adaptação, principalmente por serem dispositivos pessoais, já incorporados ao manuseio diário - tão robustos quanto computadores, devido aos avanços na capacidade de memória e processador (Ternier *et al.*, 2012).

No caso concreto, as informações demonstradas em RA por meio do aplicativo ErosiAR são projetadas pela tela de um *smartphone* em forma de sinalizadores (placas) visualizado em três dimensões contendo informações sobre a suscetibilidade ao risco de erosão em determinada área estabelecida pelo modelo, ou adicionada em campo pelo usuário.

#### **5.4.1 Materiais - modelo**

O modelo de suscetibilidade ao risco de erosão, nos termos do que foi apresentado no Capítulo 4, envolve variáveis estáticas: Erodibilidade do solo; proveniente do mapeamento da Embrapa; dados de Uso da terra, disponibilizados pelo Mapbiomas; e os dados que representam a Topografia – gerados a partir de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

O modelo também é composto por variáveis dinâmicas: Acumulado de chuvas; e chuvas instantâneas ambas obtidas via registros dos satélites GPM (*Global Precipitation Measurement*).

Em cada variável existem classes que por pesos maiores, indicam maior risco à erosão; e por pesos menores, menor risco à erosão. Definidos os pesos para cada variável de acordo com a respectiva classe à que se refere é aplicado o valor de hierarquia definido pelo método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). O conjunto é somado, alcançando-se os valores finais – relacionados em cinco intervalos à uma escala de suscetibilidade ao risco de erosão. A Figura 24 apresentada no capítulo 4 ilustra as etapas de execução.

Com as variáveis do modelo previamente vinculadas a um único arquivo no formato *shapefile*, garantiu-se o detalhamento individual de cada uma das variáveis nas colunas, conforme observado na tabela de atributos demonstrada na Figura 26.



Figura 26 – Tabela de atributos do arquivo que congrega os pontos mapeados (linhas) e os pesos relacionados para cada um dos fatores (colunas) considerados.

| FID | Shape    | id                                     | Erodibilidade | Topografia | Uso da terra | Chuva 2h | Chuva 24h | Chuva 96h | Chuva 360h | Valor final |
|-----|----------|----------------------------------------|---------------|------------|--------------|----------|-----------|-----------|------------|-------------|
| 194 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 3          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 195 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 3          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 196 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 3          | 55           | 0        | 0         | 0         | 0          | 3           |
| 209 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 3          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 210 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 2          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 211 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 2          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 212 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 1          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 213 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 2          | 55           | 0        | 0         | 0         | 0          | 3           |
| 226 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 3          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 227 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 2          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 228 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 2          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 229 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 2          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 230 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 1          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 231 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 1          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 244 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 3          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |
| 245 | Point ZM | (8BED9247-2DB8-489D-8CC8-090C944F7837) | 55            | 3          | 8            | 0        | 0         | 0         | 0          | 1           |

Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

Os pesos indicados se relacionam às condições observadas em determinado momento. As colunas apresentam as informações detalhadas por fator e as linhas indicam os pontos do traçado da LT piloto.

A partir deste arquivo vetorial a coluna “Valor final” indica a classificação de risco do modelo, que, por conseguinte, relaciona-se a uma variável linguística sobre a suscetibilidade ao risco de erosão.

O valor 1 indica área com rara suscetibilidade ao risco de erosão de acordo com a metodologia proposta. O valor 2 indica baixa suscetibilidade ao risco; o valor 3 indica possível suscetibilidade ao risco; o valor 4 remete à provável suscetibilidade ao risco; e o valor 5 à suscetibilidade ao risco quase certo de erosão, nos termos indicados na Figura 1. Com base neste arquivo, os dados foram convertidos para o formato .json – sigla para *JavaScript Object Notation*, para serem vinculados ao aplicativo.

Os dados considerados estáticos só alteram a classificação de suscetibilidade ao risco de erosão em função de atualização pelas instituições responsáveis. Neste sentido, quando das simulações, estas envolvem apenas os valores de chuvas: tanto em relação ao acumulado (nas últimas 24 horas, 96 horas e 360 horas) quanto em relação à chuva das últimas duas horas, que são as variáveis dinâmicas do modelo. São estas as que produzem maior ou menor efeito na classificação de suscetibilidade ao risco de erosão, nas simulações permitidas em tempo real, segundo a hierarquia aplicada na modelagem.

### 5.4.2 Método - aplicativo

O aplicativo ErosiAR adotou o motor de jogos Unity, apoiando-se na biblioteca ARFoundation para moldar a relação entre o mundo real e os objetos na simulação (Andrade, 2022). Os objetos virtuais determinados são sinalizadores adicionados à realidade exatamente nas coordenadas onde o modelo indica maior suscetibilidade ao risco de erosão.

De acordo com Oufqir, El Abderrahmani e Satori (2020), muito se avançou em relação às formas de fazer com que o sistema reconheça objetos do mundo real para se situar. A evolução destas técnicas trouxe novos recursos em plataformas como as desenvolvidas pela empresa Google, chamada ARCore.

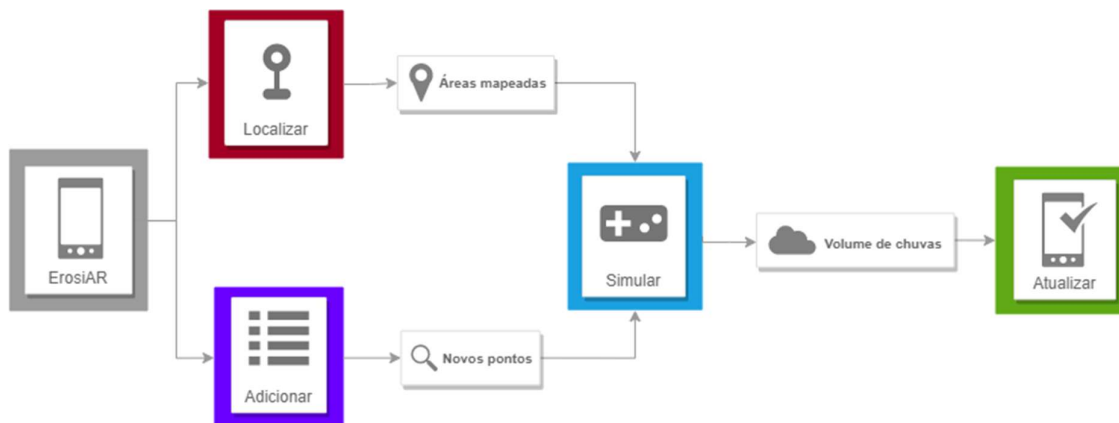
Neste sistema, entre outras possibilidades, a ambientação entre virtual e real pode ser realizada por meio do ARCore *Geospacial*. A ferramenta trabalha a partir dos dados do receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) do dispositivo registrando latitude, longitude e altitude geodésica. Em seguida o sistema, faz a correspondência das partes reconhecíveis desse ambiente com um modelo de localização fornecido pelo Sistema de Posicionamento Visual – em inglês *Visual Positioning System* - VPS, para determinar o local exato do usuário. (Google, 2022).

A tecnologia VPS baseia-se nas imagens do *Street View* do Google Maps, acumuladas há mais de uma década. Redes neurais profundas identificam partes do banco de imagens para que sejam relacionadas com partes do ambiente observado pela câmera do dispositivo. O processamento procura esta correspondência e quando exitosa estabelece a localização apoiada também a este parâmetro. (Google, 2022).

Cumprida esta etapa, o sistema está pronto para projetar as informações virtuais exatamente sobre as coordenadas previamente estabelecidas. Estes mecanismos são recursos específicos que foram incorporados à aplicação para garantir maior estabilidade e precisão no posicionamento dos marcadores, disponíveis a medida que atendam aos requisitos do sistema VPS.

Definidas as questões operacionais do aplicativo, as etapas consideradas na construção do ErosiAR estão apresentadas de forma simplificada no fluxograma ilustrado na Figura 27:

Figura 27 – Fluxograma das principais funções executadas pelo aplicativo ErosiAR.



Fonte: Elaborado pela Autora (2022).

A lógica e finalidade das funções de localização, adição e simulação são descritos de forma individualizada nos subitens que seguem apresentados.

#### 5.4.2.1 Localização

Os pontos de interesse, ou seja, que recebem classificação partir do nível “provável” de suscetibilidade ao risco de erosão, nos moldes do modelo estabelecido, são os que inspiram maiores cuidados.

Para que as equipes localizem estes pontos *in loco*, a aplicação projeta uma placa vertical em 3D sobre este local a partir da visualização na tela do *smartphone*.

A localização desta placa obedece às coordenadas vinculadas a estes pontos de interesse e são importados no ErosiAR previamente a partir de um arquivo em formato .json (Andrade, 2022).

Este processo de vinculação permite que um objeto 3D seja projetado virtualmente em qualquer latitude, longitude e altitude. A informação altimétrica, apesar de irrelevante na etapa de identificação dos pontos, é exigida como requisito na aplicação para projetar os sinalizadores. Fundamentalmente os dados de latitude e longitude são os que posicionam as placas, podendo na coordenada altimétrica assumir-se qualquer cota para materializá-las virtualmente (Andrade, 2022).

Neste contexto, os dados posicionais destes pontos importados não se modificam durante a experiência virtual, mas o referencial sim, pois ao atualizar a localização uma nova altitude pode ser calculada pelo aparelho. Desta forma, o

sinalizador pode parecer flutuar em determinado momento, pois é importante lembrar os dados elipsoidais são coletados e atualizados pelo dispositivo em tempo real.

Ainda que ocorra oscilação vertical do objeto virtual essa condição não atrapalha a localização do ponto de interesse, tampouco a projeção de objetos virtuais no mundo real (Google, 2022).

As mesmas etapas e processo de localização são executados pelo aplicativo quando se adicionam novos pontos. Estes trazem consigo as coordenadas para que minimamente as planimétricas sejam incorporadas ao banco de dados, tornando o processo de registro posicional *in loco* confiável.

#### 5.4.2.2 Adição

Adicionar novos pontos, materializando-os virtualmente a partir de um sinalizador, é um complementar de grande valia incorporado ao ErosiAR (Andrade, 2022), uma vez que *in loco* podem ser encontradas pelos usuários novas áreas com potencial erosivo. O autor reforça que este recurso traz mais funcionalidades ao aplicativo, vai além da visualização e passa à categoria de simulador.

Neste caso, ao inserir um novo ponto (sinalizador), o aplicativo direciona o operador a uma tela para adicionar informações sobre a feição erosiva, o uso da terra praticado e o relevo, conforme percebe a feição que pretende relatar.

Ainda que nos termos do modelo as informações exijam conhecimento técnico, a aplicação traz termos adaptados, que podem ser compreendidos a partir de uma linguagem mais simples, sobretudo para as variáveis Erodibilidade e Topográfico.

A Tabela 9 apresenta a classificação original do modelo (termos técnicos) e a classificação simplificada - que é habilitada quando se adiciona um novo sinalizador – para facilitar o entendimento e assertividade da classificação do novo ponto.

Tabela 9 – Classificação original e simplificada para cada um dos fatores considerados.

| Fator Erodibilidade | Classe original | Classe simplificada                                | Fator Uso da Terra | Classe original                                                        | Classe simplificada                          | Fator Topografia | Classe original | Classe simplificada |
|---------------------|-----------------|----------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|-----------------|---------------------|
|                     | Muito baixa     | Sem indícios de erosão                             |                    | Floresta ou campo alagado ou áreas pantanosas                          | Floresta ou área alagada                     |                  | <1              | Plano               |
|                     | Baixa           | Poucos indícios de erosão                          |                    | Formação campestre ou lavoura perene ou silvicultura                   | Plantio de grande porte                      |                  | 1 a 5           | Inclinação suave    |
|                     | Média           | Erosão presente, pouco extensa e/ou rasa           |                    | Apicum ou mosaico de agricultura e pastagem                            | Plantio de pequeno porte ou pastagem         |                  | 5 a 10          | Ondulado            |
|                     | Alta            | Erosão presente, extensa e/ou profunda             |                    | Lavoura de cana                                                        | Lavoura de cana                              |                  | 10 a 20         | Ondulado e íngreme  |
|                     | Muito alta      | Mais de uma erosão presente, extensa e/ou profunda |                    | Afloramento rochoso ou outras formações não florestais ou agropecuária | Rochas ou áreas impermeáveis ou agropecuária |                  | > 20            | Muito íngreme       |
|                     | Fase Erodida    | Voçoroca                                           |                    | Lavoura de soja ou lavoura de arroz ou outras lavouras temporárias     | Lavouras de pequeno porte ou temporárias     |                  |                 |                     |
|                     |                 |                                                    |                    | Mineração e outras áreas não vegetadas                                 | Mineração ou solo exposto                    |                  |                 |                     |

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Esta correlação apresentada na *Tabela 9 – Classificação original e simplificada para cada um dos fatores considerados*. Tabela 9 existe para que o ErosiAR possa reconhecer os termos simplificados e atribuir os pesos correspondentes aos termos originais - de acordo com a metodologia.

Esta alteração foi proposta para facilitar a compreensão das equipes de campo, que podem não estar familiarizadas com os termos utilizados na construção do modelo, mas que ainda assim podem avaliar as condições, adicionando suas impressões neste novo ponto criado.

#### 5.4.2.3 Simulação

Com o processo de localização estabelecido, tendo agregado a funcionalidade de inserção de sinalizadores, a etapa seguinte preocupou-se em integrar outra necessidade ao ErosiAR: criar simulações.

Da forma como planejado, as simulações permitem que o volume de chuvas, tanto para os acumulados quanto para as chuvas instantâneas sejam alteradas. Neste caso, o aplicativo responde com novos pesos – de acordo com a metodologia – indicando a suscetibilidade ao risco atualizada para esta situação simulada.

Para os pontos previamente adicionados na aplicação o agente já tem informações da suscetibilidade ao risco de erosão considerando as condições estáticas do local (Erodibilidade do solo, Uso da terra e Topografia), em função de um volume de chuva de determinada ocasião, que pode ser alterado em campo se previsões futuras venham sugerir outros volumes.

Neste caso, alterar os valores de chuva via simulação antecipa o cenário de suscetibilidade ao risco de erosão e desta forma pode-se conhecer antecipadamente e *in loco* qual será o risco caso as previsões pluviométricas se concretizem. A visualização em tempo real vale-se da tecnologia de RA para proporcionar uma maior imersão do usuário para com a simulação (Andrade, 2022).

A simulação também é uma função disponível para os sinalizadores que são adicionados *in loco* pelo agente. Ao identificar um ponto que a equipe julgue sensível sob este aspecto, além de registrá-lo, incluindo a localização por coordenadas – ficam disponíveis os *sliders* para que o operador sugira um volume de chuvas, tanto para as chuvas instantâneas quanto as chuvas acumuladas, verificando em tempo real qual a classificação de suscetibilidade ao risco de erosão que aquela área recebeu.

Os volumes que aparecem no aplicativo e os respectivos pesos atribuídos, conforme metodologia, são ilustrados na Tabela 10:

Tabela 10 – Apresentação dos pesos para os fatores dinâmicos.

| Fatores Dinâmicos              |                                |                                 |                                       |            |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------|
| 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       |
| <10 mm                         | < 40 mm                        | < 70 mm                         | < 10 mm                               | <b>0</b>   |
|                                |                                |                                 |                                       | <b>1</b>   |
|                                |                                | Entre 70 e 140 mm               |                                       | <b>2</b>   |
|                                | Entre 40 e 60 mm               | Entre 140 e 210 mm              |                                       | <b>3</b>   |
| Entre 10 e 25 mm               | Entre 60 e 90 mm               | Entre 210 e 280 mm              |                                       | <b>5</b>   |
| Entre 25 e 40 mm               | Entre 90 e 140 mm              | Entre 280 e 350 mm              |                                       | <b>8</b>   |
| Entre 40 e 55 mm               | Entre 140 e 200 mm             | > 350 mm                        |                                       | <b>13</b>  |
| Entre 55 e 85 mm               | > 200 mm                       |                                 | Entre 10 e 20 mm                      | <b>21</b>  |
| Entre 85 e 115 mm              |                                |                                 | Entre 20 e 40 mm                      | <b>34</b>  |
| Entre 115 e 150 mm             |                                |                                 | Entre 40 e 70 mm                      | <b>55</b>  |
| > 150 mm                       |                                |                                 | Entre 70 e 110 mm                     | <b>89</b>  |
|                                |                                |                                 | > 110 mm                              | <b>144</b> |

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

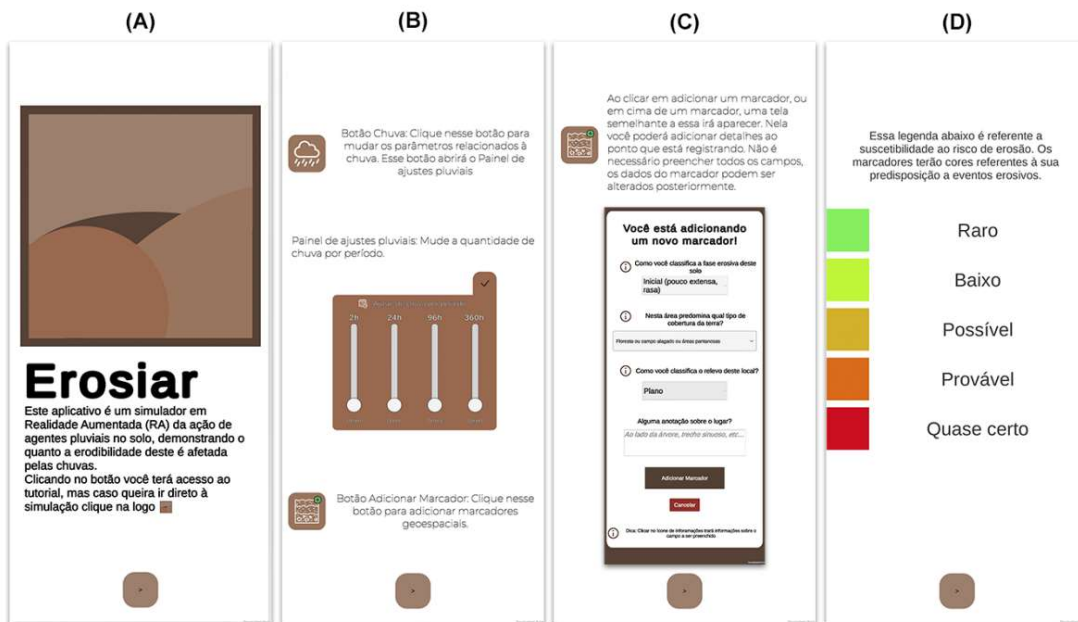
Para os novos pontos o aplicativo utiliza os critérios para o volume de chuva conforme Tabela 10, que segue as mesmas regras consideradas nos pontos estabelecidos em escritório, para que possa automaticamente fazer a correlação com os pesos correspondentes, a partir dos mesmos parâmetros.

Também nesta etapa é possível habilitar um campo para adicionar observações, para que, se necessário, se envie mais detalhes da área ao escritório, sendo mais um recurso de integração entre estes dois ambientes.

## 5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aparência final do aplicativo ErosiAR está apresentada na Figura 28, extraída de Andrade (2022), que ilustra as primeiras telas para situar o usuário quanto às suas funcionalidades, orientando os primeiros passos com a ferramenta.

Figura 28 – Telas de funcionalidades do aplicativo ErosiAR.



Fonte: Andrade (2022).

Segundo Andrade (2022), a Figura 28 apresenta na primeira tela indicada (A) uma explicação breve sobre a aplicação e sua finalidade. Na segunda tela (B) demonstram-se as ações de alteração de volume de chuvas, que podem ser modificados tanto para a chuva instantânea (últimas duas horas) quanto para os acumulados de chuva (nas últimas 24 horas, 96 horas e 360 horas). Nesta tela apresenta-se ainda um ícone que remete a criação de um novo sinalizador, que então é apresentado na terceira tela (C).

Na tela (C) apresentam-se as etapas para criação de um novo sinalizador, vinculado à localização atual do usuário, habilitando a possibilidade de adicionar informações pré-estabelecidas e comentários. Na última tela (D) há uma pequena explicação sobre os fatores de risco e sua relação com as cores, para que o usuário possa relacionar uma cor a um risco mais facilmente ao visualizar os sinalizadores.

A função primeira a que se destina o aplicativo ErosiAR é auxiliar na localização de pontos sensíveis apontados pelo modelo de suscetibilidade ao risco de erosão. Para Huuskonen e Oksanen (2018), os sinalizadores devem estar visíveis para que o usuário possa navegar pelo campo com segurança.

O marcador utilizado no ErosiAR é semelhante a uma placa e foi escolhido, segundo Andrade (2022), para facilitar a visualização em longas distâncias, devido ao



formato alongado. Cada um dos pontos do modelo importados previamente se tornam uma placa projetada, ou seja, adota-se esse padrão como um objeto virtual que tem sua base fixada nas coordenadas informadas – garantindo a vinculação com a localização real (Andrade, 2022). Um exemplo do sinalizador projetado a partir do aplicativo ErosiAR, é ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Dois diferentes sinalizadores indicando riscos em função da classificação do modelo.



Fonte: Adaptado de Andrade (2022)

A cor do sinalizador indicada na Figura 29 está diretamente relacionada com a suscetibilidade ao risco de erosão que está representando, conforme paleta apresentada na Figura 28 (D). Segundo Huuskonen e Oksanen (2018), as cores podem ser usadas nos objetos virtuais para melhorar a percepção, que no caso da Figura 29, correspondem a suscetibilidade ao risco de erosão “possível” e “quase certo” criados em locais diversos e com dados hipotéticos para os testes realizados.

As informações dispostas no sinalizador informam os pesos das respectivas classes mapeadas para os fatores estáticos relacionados ao modelo (Erodibilidade, Uso da terra e Topográfico), que em conjunto com o volume de chuvas – são a base

para o cálculo da suscetibilidade ao risco de erosão. É importante observar que em ambos os marcadores apresentados na Figura 29 os fatores estáticos são exatamente iguais, diferindo o risco devido aos fatores dinâmicos – relacionados às chuvas, que se sobressaem por representarem o principal agente erosivo no modelo.

A medida que os volumes de chuva são alterados nas simulações, a aplicação automaticamente altera a cor do sinalizador para que corresponda ao novo valor alcançado de suscetibilidade ao risco, obedecendo a metodologia. A Figura 30 ilustra esta condição, onde um sinalizador – posicionado em um mesmo local, apresenta dois diferentes níveis de risco em função do volume de chuva selecionado.

Figura 30 – Mesmo sinalizador com risco diferente em função do volume de chuvas simulado.



Fonte: Adaptado de Andrade (2022)

Na situação demonstrada na Figura 30 o usuário iniciou as simulações reduzindo os volumes de chuva, que podem ser alterados para as últimas 2 horas, 24 horas, 96 horas e/ou 360 horas a partir dos *sliders* destacados na parte inferior da tela (Andrade, 2022).

O valor final alcançado nestas simulações indica o efeito do fator dinâmico, em específico a chuva das últimas 2h, que nos termos do modelo é o grande agente erosivo. Na Figura 30 o risco “baixo” se justifica ao se selecionar um volume de chuva menor para as últimas 2 horas (primeiro *slider*). O risco “quase certo”, por outro lado, se apresenta ao selecionar neste mesmo ponto devido a um volume maior de chuvas nas últimas duas horas (selecionado no *slider*). Os demais *sliders* (que representam as chuvas acumuladas) se mantiveram iguais na simulação e não influenciaram na classificação de risco devido ao baixo peso determinado.

É importante frisar que da maneira como foi proposto, o modelo estabelece maior risco nas situações em que a chuva de momento (das últimas 2 horas) é registrada com volumes elevados, e a combinação desta variável com as demais é que constrói o risco final representado pelos sinalizadores.

Representar o efeito do volume de chuvas na classificação de suscetibilidade ao risco de erosão é uma das funções propostas pelo ErosiAR, apresentando os resultados das simulações em tempo real, de forma automática – à medida que se alteram os parâmetros. Tal recurso confere grande vantagem da aplicação, uma vez que cada usuário pode interagir conforme sua necessidade ou conforme orientado pelas previsões climáticas neste caso.

De acordo com Olsson *et al.* (2012), facilitar o acesso à informação e permitir que se interaja com ela são vantagens que tem tornado a RA cada vez mais procurada para diversas aplicações.

Para concluir as pretensões do aplicativo ErosiAR, a funcionalidade de adicionar pontos foi incorporada. A partir da tela ilustrada na Figura 28 (C), o usuário, ao identificar em campo um ponto que merece atenção do ponto de vista erosivo, pode marcar a localização com um sinalizador, registrando as coordenadas deste ponto.

Nesta etapa o usuário pode preencher os campos com informações relativas às três variáveis estáticas do modelo, a partir das classes organizadas na lista suspensa de acordo com a classificação simplificada, já ilustrada na Tabela 9.

É possível também adicionar informações em texto no campo observações, o que confere liberdade ao usuário em relatar algo além do especificado. Em seguida basta clicar em "Adicionar Marcador" para posicionar um novo marcador na RA.

O mecanismo permite que as novas informações fiquem armazenadas de forma organizada dentro do aplicativo, reduzindo a possibilidade de erros grosseiros

nestes registros e na localização, uma vez que as coordenadas são capturadas automaticamente pelo sistema ao receber a solicitação de criação de um novo ponto.

As funcionalidades propostas pelo aplicativo marcam a integração entre dados advindos de modelos baseados em mapas tradicionais - projetados virtualmente, e dados reais - obtidos em campo, adicionados de forma virtual à aplicação.

Nos termos em que foi construída, alcança-se um recurso que explora os benefícios de ambos os ambientes, sendo este o objetivo quando da concepção de sistemas de Realidade Aumentada (Paelke; Sester, 2010).

As perspectivas da RA voltada às demandas de concessionárias de serviços públicos, segundo pesquisas realizada pela Panasonic (2022) já direcionavam para a importância de sua aplicação com ganhos em eficiência operacional, segurança do trabalhador e acesso a informações em tempo real.

Neste contexto, afirma-se, desta forma, que as contribuições do aplicativo ErosiAR vão além de uma ferramenta para projetar objetos virtuais. Torna-se uma valiosa ferramenta de gestão territorial por oferecer uma plataforma simples, que não requer treinamento prévio, que para a demanda proposta, habilita muito mais agentes a promoverem a validação de dados temáticos sobre erosão, bem como permite que suas próprias impressões sejam registradas.

Ainda que demandem análise técnica, as observações das equipes de campo trazem aos modelos, informações reais de campo, ampliando-se os recursos para apoiar de forma consistente o processo de tomada de decisão.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aplicativo ErosiAR, conforme construído, garantiu a visualização de marcadores 3D posicionados sobre os pontos suscetíveis ao risco de erosão previamente estabelecidos por meio do modelo sugerido no Capítulo 4.

O mesmo mecanismo de visualização é acionado quando novos pontos são adicionados pelas equipes de campo, que mesmo sem conhecimento técnico específico relacionado ao tema, podem contribuir com suas impressões atualizando notas sobre os dados previamente adicionados no aplicativo. As adições de comentários estão habilitadas tanto para avaliar uma área sinalizada, quanto para justificar uma área que pode merecer atenção do ponto de vista específico das erosões.

Neste caso, a aplicação prevê orientar o usuário, no caso o agente de campo, a inserir um novo ponto de forma simplificada, relacionando suas impressões e demarcando este ponto com o sinalizador virtual, do qual posteriormente serão extraídas as informações registradas e suas coordenadas para que possa integrar um banco de dados específico de pontos a serem reavaliados, tanto na modelagem quanto *in loco* por especialistas.

Em termos de gestão territorial, o compartilhamento de dados e de espaços – reais e virtuais, possibilitados pelo aplicativo permitem gerar grandes ganhos nas etapas de planejamento baseado em dados geográficos, em demandas essencialmente dinâmicas, como as que envolvem aspectos erosivos.

O ErosiAR, por meio de suas funções, responde por simulador, que pode ser acionado para alterar volumes de chuva, passados ou previstos nestes pontos sinalizados para avaliar a suscetibilidade ao risco a erosão.

As possibilidades de alteração dos volumes de chuva com atualização em tempo real conferem maior autonomia às equipes de campo e favorecem a usabilidade dos produtos cartográficos gerados, confirmando as áreas que demandam maior atenção e monitoramento.

Ao permitir a marcação de novos pontos *in loco*, o aplicativo também contribui para que o banco de dados temático seja atualizado, figurando como um recurso onde ambos os setores: campo e escritório – interajam e contribuam com o processo.

Estas são as premissas reunidas no recurso tecnológico proposto, sugeridas como fundamentais para que se sintam efeitos positivos e reais no monitoramento de erosões, contribuindo com a gestão das LTs. Quando supervisionado com maior frequência, contribui-se para a plena operação do sistema, tornando menos recorrentes instabilidades e desligamentos sob este aspecto.

A proposição contribui para ampliar o contato com as condições de campo, uma vez que habilita equipes especializadas em outros temas a observarem também aspectos de degradação do solo de forma intuitiva, simplificada e eficiente, por meio da realidade aumentada embutida nos recursos do aplicativo ErosiAR.

É importante mencionar que atualmente ferramentas de Inteligência Artificial a exemplo da desenvolvida pela OpenAI chamada "ChatGPT 3" são uma realidade e podem auxiliar o processo de desenvolvimento de códigos para softwares. No entanto, o aplicativo ErosiAR foi desenvolvido anteriormente ao citado dispositivo-tecnológico

e por isso dependeu exclusivamente dos conhecimentos de seu programador, sem auxílio de outros recursos facilitadores.

A aplicação se torna uma poderosa ferramenta de gestão territorial que apoia as atividades em campo e subsidia análises futuras, permitindo que se construa um inventário de dados favorecendo a segurança dos sistemas de energia envolvendo esta e outras temáticas.

## 6 CONCLUSÕES

Quando se trata de gestão de ativos de transmissão de energia, as geotecnologias e o sensoriamento remoto são aliados importantes na construção de metodologias conceituais. Nesta pesquisa, tais recursos foram fundamentais ante às ameaças de erosão e ocupação irregular que podem acometer o sistema de transmissão de energia.

A representação visual dos ativos, da mesma forma, é determinante para ampliar o potencial de análise, contribuindo para a tomada de decisão das concessionárias, sobretudo nos processos que necessitam de informações posicionais e exigem detalhes do sistema e do entorno.

Em termos de visualização, a discussão sobre representação tridimensional permitiu identificar que as concessionárias dispõem de dados que suportam modelá-los neste formato, embora o consumo seja incipiente e esteja restrito a algumas aplicações. Contar com normativas formuladas pelo setor para orientar o processo de aquisição e compartilhamento é o caminho para impulsionar a visualização 3D em prol de uma representação fidedigna dos ativos de transmissão.

O principal limitador das pesquisas relacionadas a este tema foram o baixo retorno de respostas ao questionário elaborado, que não permitiu atingir uma amostra significativa para avaliar o consumo de dados 3D. Outro ponto limitador aos resultados foi a impossibilidade de testar as representações tridimensionais em uma LT piloto. Da forma como foi apresentado, trata-se de um capítulo teórico, porém, como recomendação, sugere-se explorar a visualização tridimensional em um caso prático, para observar os obstáculos e sobreposições a que o sistema está sujeito.

A partir da abordagem em termos de gerenciamento espacial de seus ativos, a pesquisa direcionou o leitor para temas que podem prejudicar o funcionamento das LTs, seja devido às ameaças de ocupação irregular ou por conta de desenvolvimento de feições erosivas. Nos capítulos que envolvem a proposição destes modelos, prezar por metodologias simplificadas, facilmente atualizáveis e apoiada em ferramentas gratuitas foram premissas que orientaram a pretensão preditiva deste trabalho.

No que diz respeito à detecção de mudança, as respostas obtidas pelas imagens de radar fornecidas pelo satélite Sentinel-1 destacaram áreas com alteração. As dificuldades técnicas e limitações envolveram respectivamente as adequações necessárias, devido às particularidades das imagens de radar e a forma de validação,

que dependeu de imagens disponíveis no programa Google Earth Pro pela limitação de acesso à outras imagens de alta resolução espacial que alcançassem o detalhamento encontrado nas imagens gratuitas da plataforma.

Ainda assim, a resolução temporal e a gratuidade das imagens justificam as pesquisas para detectar os locais mais dinâmicos de determinada região. Como recomendação para trabalhos futuros nesta temática sugere-se a inclusão mais cenas combinadas ao processo de detecção de mudanças oferecendo mais parâmetros para ao processo de diferenciação.

Ao registrar os focos de mudança, o modelo permitiu que fossem identificados os locais que demonstram dinamicidade, sendo um ponto de partida diretivo para ações que buscam prevenir ocupações irregulares ao longo das LT.

Para a segunda ameaça abordada, a metodologia proposta buscou identificar o risco à suscetibilidade ao desencadeamento de processos erosivos, e para tanto estabeleceu a fragilidade do solo em níveis. Conforme proposto, o modelo entrega uma classificação de risco para as condições mapeadas previamente – chamadas de fatores estáticos – que é alterada em função dos volumes precipitados – chamados de fatores dinâmicos. O apoio dos satélites que monitoram os volumes de chuva em intervalo horário nestes termos, são fundamentais para que se obtenha um modelo atualizável em tempo quase real, sendo este o grande diferencial da proposta. Ainda assim, os processos de aquisição dos dados de chuva – embora oferecidos de forma gratuita – caracterizam a dificuldade encontrada neste capítulo, por serem disponibilizados em outros formatos, o que exige trabalhá-lo em outras plataformas para inclusão no modelo. Como recomendação para trabalhos futuros nesta temática, sugere-se adaptar a metodologia para outros biomas de modo a criar um fluxo que atenda todas as LTs do país.

Especificamente para o modelo de erosão, com os níveis de risco estabelecidos, pesquisou-se sobre a aplicação de Realidade Aumentada para posicionar marcadores 3D de maneira virtual nos pontos onde se sugere maior atenção tornando a identificação *in loco* facilitada e efetiva.

Para esta demanda foi desenvolvido o aplicativo ErosiAR, que dentre outras funcionalidades previu que fossem incluídas impressões das equipes de campo. As adições de comentários foram habilitadas tanto para avaliar uma área marcada, quanto uma outra área criada pelo usuário, que pode, segundo sua interpretação precisar de atenção do ponto de vista específico das erosões.



Os mecanismos propostos contribuem, ainda que de maneira indireta, para atualização dos modelos previamente gerados, uma vez que para a temática de erosão é essencial contar com as percepções obtidas *in loco*.

Os recursos incorporados ao aplicativo representam uma forma inovadora de aproximar as equipes de campo, que mesmo sem conhecimento técnico específico relacionado, podem contribuir com sua percepção sobre o tema. Nestes termos, o ErosiAR, figura uma poderosa ferramenta para gerenciamento da temática erosiva e de outras que venham a ser incorporadas.

As limitações encontradas durante o desenvolvimento da proposta estão relacionadas aos testes, pois não foi possível realizá-los diretamente na LT piloto. Apesar disto, as potencialidades são inúmeras e replicáveis para outros modelos que tratam de outras temáticas, inclusive para os modelos de detecção de mudança.

Ao concluir a pesquisa, os temas combinados em capítulos independentemente de terem sido apresentados de forma individual, são os pilares de uma proposta de gestão territorial tanto para monitorar ameaças quanto para prezar por uma base de dados espacial que traga realismo à representação dos ativos, como subsidio à operação do sistema de transmissão de energia.

A partir dos estudos realizados, a autora apresenta sua contribuição científica e agradece ao Grupo CPFL e a Empresa Caruso Soluções Ambientais & Tecnológicas os apoios técnicos e financeiros viabilizados por meio do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D ANEEL/Brasil PD-00063-3075/2020.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR - Norma Brasileira 5422**: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica: procedimento. Rio de Janeiro. 1985. 57 p.

AKYÜREK, Duygu; KOÇ, Öykü; AKBABA, Ece; M.; SUNAR, Filiz. Land Use/Land Cover Change Detection Using Multi-Temporal Satellite Dataset: a case study in Istanbul new airport. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.L.], v. -3/4, p. 17-22, 6 mar. 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w4-17-2018>

ALZHRANI, Nouf Matar; ALFOUZAN, Faisal Abdulaziz. Augmented Reality (AR) and Cyber-Security for Smart Cities: A Systematic Literature Review. **Sensors**, [S.L.], v. 22, n. 7, p. 2792, abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22072792>.

AMARAL, André Júlio do; BERTOL, Ildegardis; COGO, Neroli Pedro; BARBOSA, Fabrício Tondello. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do Planalto Sul-Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 5, p. 2145-2155, out. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000500035>.

ANDRADE, Gustavo Vargas de. **ErosiAR**: uma aplicação em realidade aumentada para simulação de eventos erosivos. 2022. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Software, Universidade do Estado de Santa Catarina, Ibirama, 2022.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa n. 861**, de 26 de novembro de 2019. Dispõe sobre a definição da Base de Dados das Instalações de Transmissão de energia elétrica e dá outras providências.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Gestão Geoespacializada da Transmissão**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/ggt>. Acesso em 10 out. 2020

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Saiba mais sobre o setor elétrico brasileiro**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em 12 dez. 2021.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa n. 1005**, de 22 de fevereiro de 2022. Altera a Resolução Normativa ANEEL 905, de 8 de dezembro de 2020, que estabelece as regras dos serviços de transmissão de energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Regras de Transmissão, formada a partir da Consolidação da Regulamentação dos Serviços de Transmissão; e revoga as resoluções normativas listadas.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **A Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/a-aneel>. Acesso em 12 jan. 2023.

ARABAMERI, Alireza; POURGHASEMI, Hamid Reza. Spatial Modeling of Gully Erosion Using Linear and Quadratic Discriminant Analyses in GIS and R. **Spatial**

**Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences**, [S.L.], p. 299-321, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-815226-3.00013-2>.

ASSOCIAÇÃO CAATINGA. **Bioma Caatinga**. Disponível em: <https://www.acaatinga.org.br/sobre-a-caatinga/>. Acesso em 20 jul. 2021.

BAGWAN, Wasim Ayub; GAVALI, Ravindra Sopan. 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**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 2113-2126, 16 set. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

BAHU, J.M.; KOCH, A.; KREMERS, E.; MURSHED, S. M. Towards a 3D Spatial Urban Energy modelling approach. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S.L.], v. -2/1, p. 33-41, 13 set. 2013. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsannals-ii-2-w1-33-2013>.

BASTOS, Arthur; RIBEIRO, Samira; PINTO, Alano; MARQUES, Francisco; BALDISSIN, Diogo; REIS, Flavio. Augmented Reality for Training and Maintenance of Reclosers: a case study of a wearable application. **2021 IEEE 45Th Annual Computers, Software, And Applications Conference (Compsac)**, [S.L.], p. 532-537, jul. 2021. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/compsac51774.2021.00079>.

BERTONI, José; LOMBARDI NETO, Francisco. **Conservação do solo**. 6.ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355p

BOBRICH, Joachim; OTTO, Steffen. Augmented Maps. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 4, p. 502-505, 2002.

BRASIL. **Decreto n. 6666**, de 27 de novembro de 2008. Institui, no âmbito do Poder Executivo federal, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE, e dá outras providências. Brasília.

BRASIL. **Lei n. 9991**, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2000. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9991.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9991.htm). Acesso em 10 jan. 2022

BRAUD, Tristan; BIJARBOONEH, Farshid Hassani; CHATZOPOULOS, Dimitris; HUI, Pan. Future Networking Challenges: the case of mobile augmented reality. **IEEE 37Th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)**, [S.L.], p. 1796-1807, jun. 2017. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icdcs.2017.48>.

BRAUN, Andreas. Sentinel-1 Toolbox. **Synergetic use of radar and optical data: combination fo Sentinel-1 and Sentinel-2 and application of analysis tools**. 2020. Disponível em:

[http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Synergetic%20use%20of%20S1%20\(SAR\)%20and%20S2%20\(optical\)%20data%20Tutorial.pdf](http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Synergetic%20use%20of%20S1%20(SAR)%20and%20S2%20(optical)%20data%20Tutorial.pdf). Acesso em 19 maio 2021.

CALDAS, Vanessa Ingrid Saraiva Pereira; SILVA, Antônio Soares da; SANTOS, Jefferson Pereira Caldas dos. 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, p. 1415-1430, dez. 2019.

CAPOANE, Viviane. Susceptibilidade a erosão na bacia hidrográfica do córrego Guariroba, Campo Grande, Mato Grosso do Sul. **Acta Brasiliensis**, [s. l], v. 2, n. 3, p. 49-55, maio 2019.

CARDOSO, Célio Orli.; ULLMANN, Mario Nestor; BERTOL, Ildegardis. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **R. Bras. Ci. Solo**, [s. l], v. 22, n. 1, p. 131-140, dez. 1997.

CARMO, Ubiratan; KELNER, Judith; REIS, Bernardo. **Especificação de Procedimentos de Manutenção de Equipamentos Elétricos Usando Realidade Aumentada**. 2010. Disponível em: <https://www.chesf.com.br/pdi/Documents/Especifica%C3%A7%C3%A3o%20de%20Manuten%C3%A7%C3%A3o%20Utilizando%20Realidade%20Aumentada%20-%2000048-0065.2010-Ubiratan%20Carmo%20Rev%20Will.pdf>. Acesso em: 08 out. 2022.

CARVALHO, Wander Guilherme Rocha; CANTO, Tânia Seneme. Realidade aumentada móvel e a cartografia: aumentando, revelando e criando novas geografias. In: **TECCOGS** – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas, n. 19, p. 88-104. jan./jun. 2019.

CHAVES, Ana Carolina; GIUSTI, Fábio; STRAUCH, Julia Célia Mercedes. O Estado, a Regulação e a Questão Ambiental no Setor Elétrico Brasileiro: uma Análise sobre os Megaprojetos de Lajeado e Estreito. **RDP**, v. 18, n. 97, p. 321-348, jan./fev. 2021.

CHAVES, Michel E. D.; PICOLI, Michelle C. A.; SANCHES, Ieda D. Recent Applications of Landsat 8/OLI and Sentinel-2/MSI for Land Use and Land Cover Mapping: a systematic review. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 18, p. 3062, 18 set. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12183062>.

CHEN, Yangyu; LIN, Jiayuan; LIAO, Xiaohan. Early detection of tree encroachment in high voltage powerline corridor using growth model and UAV-borne LiDAR. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.L.], v. 108, p. 102740-102753, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2022.102740>.

CHUNXIA, Yang; XIAOFENG, Chen; LI, Li; XI, Chen; JIA, Hu; QIAN, Hong. Soil - Water Loss and Measures Measure composition of Overhead Power Transmission Lines in Hilly area. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 233, p. 01034, 2021. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202123301034>.

CLAUDINO, Wesley Vicente; SILVA, Edgley Pereira da; CAIONI, Charles; SILVA, Antonio Carlos Silveiro da; OLIVEIRA, Ademilson Sampaio de. Adequação de modelo a susceptibilidade à erosão de solos no âmbito de microbacia na borda sul-amazônica. **Revista de Ciências Agroambientais**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 157-166, 2018. Zeppelini Editorial e Comunicacao. <http://dx.doi.org/10.5327/z1677-606220192770>.

COSTA, Yasmmin Tadeu; RODRIGUES, Silvio Carlos. Relação entre Cobertura Vegetal e Erosão em Parcelas Representativas de Cerrado. **Rev. Geogr. Acadêmica**. v. 9, n. 2, p. 61-75, dez. 2015.

DEDECEK, Renato Antônio. Fatores de erosividade da chuva, enxurrada e perdas de solo sob condições do Cerrado. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 12, n. 23, p. 1431-1438, dez. 1988.

DEDECEK, Renato Antônio. Coberturas Permanentes do Solo na Erosão sob condições de Cerrados. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 4, n. 24, p. 483-488, abr. 1989.

DEVÁTY, Jan; DOSTÁL, Tomáš; HÖSL, Rosemarie; KRÁSA, Josef; STRAUSS, Peter. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion – Case studies from Lower Austria and Central Bohemia. **Land Use Policy**, [S.L.], v. 82, p. 674-685, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.058>.

DISSANAYAKE, Dmslb; MORIMOTO, Takehiro; RANAGALAGE, Manjula. 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**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 291-306, 22 out. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40808-018-0534-x>.

ELETROBRAS CHESF. **Chesf valida dados geográficos**. 2021. Disponível em: [https://chesf.gov.br/\\_layouts/15/Chesf\\_Noticias\\_Farm/Noticia.aspx?IDNoticia=959](https://chesf.gov.br/_layouts/15/Chesf_Noticias_Farm/Noticia.aspx?IDNoticia=959). Acesso em: 20 mar. 2023.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. **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](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_erodibilidade_solo). Acesso em: 01 fev. 2022.

ERRA, Ugo; CAPECE, Nicola. Engineering an advanced geo-location augmented reality framework for smart mobile devices. **Journal Of Ambient Intelligence And Humanized Computing**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 255-265, dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12652-017-0654-6>.

ESA (European Spatial Agency). **Acquisition Modes**. 2021. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes>. Acesso em: 12 fev. 2021

ESA (European Space Agency). **User Guide**. 2020. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/naming-conventions>. Acesso em: 04 nov. 2020.

ESFAHANI, Saleh Kaji; KOLIVAND, Hoshang; MADANI, Ramin; SALEHINIA, Majid; SHAFARIE, Mino. Augmented reality in smart cities: Applications and limitations. **Jornal of Engineering Technology**. 6. p. 28-45, 2018.

FACHIN, Paulo Angelo; PEREIRA, Adalberto Alves; THOMAZ, Edivaldo Lopes. Erosão por Salpico: padrões de chuva e produção de sedimentos em latossolo bruno. **Acta Geográfica**, [S.L.], v. 13, n. 32, p. 59-75, 30 ago. 2019. Universidade Federal de Roraima. <http://dx.doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v13i32.4991>.

FARIAS, Marta Emília Aires Cavalcante de; MARTINS, Maria de Fátima; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. 2030 Agenda and Renewable Energy: synergies and challenges to achieve sustainable development. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 17, p. 1-14, 20 dez. 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i17.23867>.

GANEM, Khalil Ali; DUTRA, Andeise Cerqueira; OLIVEIRA, Marceli Terra de; FREITAS, Ramon Moraes de; GRECCHI, Rosana Cristina; VIEIRA, Rita Marcia da Silva *Pinto*; ARAI, Egidio; Silva, Fabrício Brito; SAMPAIO, VAZ, Claudia Bloisi; DUARTE Valdete; SHIMABUKURO Yosio Edemir. Mapping Caatinga Vegetation using Optical Earth Observation Data: opportunities and challenges. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L.], v. 72, n. 50, p. 855-879, jan. 2020. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/revbrascartogr>

GEE - Google Earth Engine. **Tutorials**. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials>. Acesso em: 28 out. 2020.

GEE - Google Earth Engine. **Detecting Changes in Sentinel-1 imagery**. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/detecting-changes-in-sentinel-1-imagery-pt-1>. Acesso em: 10 out. 2021.

GLOBALDATA ENERGY. **Why augmented reality will increase safety and efficiency in utility sector**. 2019. Disponível em: <https://www.power-technology.com/comment/why-augmented-reality-will-increase-safety-and-efficiency-in-utility-sector/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

GOOGLE. **Build global-scale, immersive, location-based AR experiences with the ARCore Geospatial API**. 2022. Disponível em: <https://developers.google.com/ar/develop/geospatial>.

GUAN, Hongcan; SUN, Xiliang; SU, Yanjun; HU, Tianyu; WANG, Haitao; WANG, Heping; PENG, Chigang; GUO, Qinghua. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [S.L.], v. 130, p. 106987, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106987>.

GUERRA, Antônio José Teixeira. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA Antônio José Teixeira e CUNHA, Sandra Baptista da (Org.). **Geomorfologia: atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

GUERRA, Antônio José Teixeira. O Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, Antônio José Teixeira; SILVA, Antônio Soares da; BOTELHO, Rosangela Garrido Machado (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. Cap. 1. p. 17-50.

HARDIN, Perry J.; JACKSON, Mark W.; OTTERSTROM, Samuel M. Mapping, Measuring, and Modeling Urban Growth. In: JENSEN, Ryan R.; GATRELL, Jay D.; MCLEAN, Daniel. **Geo-Spatial Technologies in Urban Environments**. 2. ed. Usa: Springer, 2007. Cap. 8. p. 141-176.

HÜBNER, Cleice Edinara; OLIVEIRA, Francisco Henrique de; SANTO, Mariane Alves dal. Gestão da Informação Geográfica e Cadastral no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 67, p. 215-259, abr. 2015.

HUGGINS, L.F. (1979). **Small watershed hydrology**. Lafayette, Purdue University. Agricultural Engineering Departament. 1979. 67f.

HUUSKONEN, Janna; OKSANEN, Timo. Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.L.], v. 154, p. 25-35, nov. 2018. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.039>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 2007. ed. Rio de Janeiro: 2007. 316 p.

JIANYA, Gong; HAIGANG, Sui; GUORIU, Ma; QIMING, Zhou. **A Review of Multi-Temporal Remote Sensing Data Change Detection Algorithms**. In: The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: 2008. v. 37, p. 1595-1598.

JWA, Yoonseok.; SOHN, Gunho; KIM, Heungsik Brian. Automatic 3D Powerline Reconstruction Using Airborne LiDAR Data. **Laser Scanning**, França, v. XXXVIII p. 105-110, set. 2009.

KLEIN, Lucas Barros. **Construção de um Simulador de Realidade Aumentada para Aplicação na Engenharia Ambiental e Sanitária**. 2021. 64 f. TCC (graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2021.

KUDINOV, Dmitry. **PointCNN: replacing 50,000 man hours with AI replacing 50,000 man hours with AI**. 2019. Published in GeoAI. Disponível em: <https://medium.com/geoai/pointcnn-replacing-50-000-man-hours-with-ai-d7397c1e7ffe>. Acesso em: 22 mar. 2023.

KUPLICH, Tatiana. **Sensoriamento remoto por radar para estudos de vegetação**. OfitextoTalk. 2017. Palestra *on line* via Ofitexto. 29 jan. 2021.

KWOCZYŃSKA, Bogusława; DOBEK, Joanna. Elaboration of the 3D Model and Survey of the Power Lines Using Data From Airborne Laser Scanning. **Journal of Ecological Engineering**, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 65-74, 2016. <http://dx.doi.org/10.12911/22998993/63954>.

LEICA-GEOSYSTEMS. **Where is the line?** Augmented perception of utilities with AR and GNSS. Augmented perception of utilities with AR and GNSS. Elaborada por Renata Barradas Gutiérrez. Disponível em: <https://leica-geosystems.com/pt-br/case-studies/utilities/augmented-perception-of-utilities-with-ar-and-gnss>. Acesso em: 12 dez. 2022.

LENSE, Guilherme Henrique Expedito; PARREIRAS, Taya Cristo; MOREIRA, Rodrigo Santos; AVANZI, Junior Cesar; MINCATO, Ronaldo Luiz. Effect of Spatial-Temporal Variation of Land Use and Land Cover on Soil Erosion. **Revista Caatinga**, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 90-98, jan. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252021v34n110rc>

LI, Li; XIN, Hou Xin; XIAOFENG, Chen; XI, Chen; QIAN, Hong. Research on key technology of soil erosion control of transmission line project in Hilly Area. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 831, n. 1, p. 012007, ago. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/831/1/012007>.

LI, Xin; LI, Zijian; WANG, Haizhi; LI, Wanlin. Unmanned Aerial Vehicle for Transmission Line Inspection: status, standardization, and perspectives. **Frontiers in Energy Research**, [S.L.], v. 9, p. 1-13, 7 jul. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2021.713634>.

LOBO, Maria Jesús; CHRISTOPHE, Sidonie. Opportunities and challenges for Augmented Reality situated geographical visualization. **ISPRS Annals Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, [S.L.], v. 4, 2020, p. 163-170, ago. 2020. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-v-4-2020-163-2020>.

LOHBERGER, Sandra; STÄNGEL, Matthias; ATWOOD, Elizabeth C.; SIEGERT, Florian. Spatial evaluation of Indonesia's 2015 fire-affected area and estimated carbon emissions using Sentinel-1. **Global Change Biology**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 644-654, set. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13841>.

MACHADO, Renan Kruchelski; FARINHAKI, Ricardo; DA SILVA, Thiago Avelino. **Seta: Ambiente de Realidade Aumentada para Ensino de Algoritmos de Aprendizagem de Máquina**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MARCUZZO, Fernando Noronha; CARDOSO, Murilo Raphael Dias; FARIA, Thiago Guimarães. Chuvas no Cerrado da Região Centro-Oeste do Brasil: análise histórica e tendência futura. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 6, n. 2, p. 112-130, ago. 2012. <http://dx.doi.org/10.5216/ag.v6i2.15234>



MARTINS, Vinicius Emmel; BERGMANN, Mireli Duarte; SCHMIDT, Marcio Augusto Reolon. Integração de SIG com técnica AHP na identificação de locais com vulnerabilidade a erosão hídrica de uma microbacia hidrográfica em contexto de Mata Atlântica. **Revista de Geografia (Recife)** v. 38, n. 3, p. 136-153, jul. 2021.

MATIKAINEN, Leena; LEHTOMÄKI, Matti; AHOKAS, Eero; HYYPPÄ, Juha; KARJALAINEN, Mika; JAAKKOLA, Anttoni; KUKKO, Antero; HEINONEN, Tero. Remote sensing methods for power line corridor surveys. **ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [S.L.], v. 119, p. 10-31, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011>.

MEZZOMO, Maristela Denise Moresco; KAWAMOTO, André Luiz Satoshi; BRAZ, Giorgio Artur Garcia. **Manual de Instalação, Configuração e Uso da Caixa de Areia de Realidade Aumentada (SandBox)**. Campo Mourão: Nova História Assessoria e Gestão Cultural, 2020. 58 p. ISBN: 978-65-00-02260-5

MOREIRA, Alberto; PRATS-IRAOLA, Pau; YOUNIS, Marwan; KRIEGER, Gerhard; HAJNSEK, Irena; PAPATHANASSIOU, Konstantinos P. A tutorial on Synthetic Aperture Radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**. v. 13, p. 6-43, abr. 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6504845>. Acesso em 02 fev. 2021. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301

MUNIR, Nosheen; AWRANGJEB, Mohammad; STANTIC, Bela. Power Line Extraction and Reconstruction Methods from Laser Scanning Data: a literature review. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 973-996, 10 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15040973>.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **Global Precipitation Measurement**. Disponível em: <https://gpm.nasa.gov/science/precipitation-algorithms>. Acesso em: 10 maio 2022.

NAVARO, Bénédicte; TRABELSI, Angela; SAPORITI, Nicolas. From a change detection image to an operational alert system with Sentinel-1 time series. **Sixth International Conference On Remote Sensing And Geoinformation of the Environment (Rscy2018)**, [S.L.], p. 3-13, 6 ago. 2018. SPIE. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2326221>.

OLSSON, Thomas; KÄRKKÄINEN, Tuula; LAGERSTAM, Else; VENTÄ-OLKKONEN, Leena. User evaluation of mobile augmented reality scenarios. **Journal of Ambient Intelligence And Smart Environments**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 29-47, 2012. IOS Press. <http://dx.doi.org/10.3233/ais-2011-0127>.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico (org.). **Histórico da Operação**. Disponível em: [http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/extensao\\_linhastransmissao.aspx](http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/extensao_linhastransmissao.aspx). Acesso em: 06 dez. 2022.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Submódulo 7.3**: verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos. Versão 2022/10 Brasília: 2022. 74 p. Procedimental.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 26 jan. 2023.

ORTEGA, Sebastián; TRUJILLO, Agustín; SANTANA, José Miguel; SUÁREZ, José Pablo; SANTANA, Jaisiel. Characterization and modeling of power line corridor elements from LiDAR point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 152, p. 24-33, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.021>.

OUFQIR, Zainab, EI ABDERRAHMANI, Abdellatif., SATORI, Khalid. (2020). From Marker to Markerless in Augmented Reality. In: Bhateja, V., Satapathy, S., Satori, H. (eds) Embedded Systems and Artificial Intelligence. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, vol. 1076. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0947-6\\_57](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0947-6_57).

PAELKE, Volker; SESTER, Monika. Augmented paper maps: exploring the design space of a mixed reality system. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 65, n. 3, p. 256-265, maio 2010. Elsevier BV.

PANASONIC. **Realizing Augmented Reality for Utilities**: the role of mobile devices. The Role of Mobile Devices. Disponível em: <https://na.panasonic.com/us/resource-center/realizing-augmented-reality-utilities-role-mobile-devices>. Acesso em: 26 nov. 2022.

PARVEEN, Reshma; KUMAR, Uday. 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**, [S.L.], v. 04, n. 06, p. 588-596, 2012. Scientific Research Publishing, Inc.. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2012.46061>.

PEREIRA, Gabriel Henrique de Almeida. **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Realidade Aumentada para Visualização Cartográfica**. 2017. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Geodésicas. A Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PEREIRA, Gabriel Henrique de Almeida; CENTENO, Jorge Antonio Silva. O uso de Realidade Aumentada para a Cartografia: uma nova forma de interagir com mapas e dados geográficos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 4, p. 685-694, abr. 2016.

PETER VAN OOSTEROM (ed.). **Best Practices 3D Cadastres**. Copenhagen: International Federation of Surveyors (FIG), 2019. 76 p.

PINHEIRO, Thelma Maria Melo et al. Monitoramento da Base de Dados das Instalações de Transmissão (BDIT). **Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-5, 13 ago. 2020. Sbabra. <http://dx.doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2191>.

PRADO, Barbara Irene Wasinski; ARAUJO, Erico Peixoto; AMARAL, Francisco Armond. A realidade aumentada no planejamento da paisagem. **Paisagem e Ambiente**, [S.L.], v. 31, n. 46, p. 1-18, 30 dez. 2020. Universidade de São Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2359-5361.paam.2020.170059>.

PROVIDELO, Lucas Antônio; ARRAIS, Nilson. Produtos de Geração Rápida com os Satélites Sentinel-1 e Sentinel-2 para Monitoramento do Parque Eólico Pedra Cheirosa. **Brazil Windpower 2016 Conference and Exhibition**. 2017. Disponível em: <https://hexagon.com.br/-/media/Files/Hexagon-Br/Adm/Artigo-CPFL-RENOVAVEIS-2017+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: Acesso em 02 maio 2021.

RODRIGUES, Thaise da Silva; SANO, Edson Eyji; PRIETO, Juan Doblas; DE ALMEIDA, Tati; CHAVES, Joselisa Maria. Detecção de mudanças na cobertura vegetal natural do Cerrado por meio de dados de radar (Sentinel-1A) e plataforma Google Earth Engine. **Sociedade & Natureza**, v. 31, 17 dez. 2019.

SAATY, Thomas Lorie. **Decision making with the analytic hierarchy process**. Int. J. Services Sciences. 1(1), 83-98, 2008.

SAKUNO, Natanael Rodolfo Ribeiro; GUIÇARDI, Augusto Cesar Ferreira; SPALEVIC, Velibor; AVANZI, Junior Cesar; SILVA, Marx Leandro Naves; MINCATO, Ronaldo Luiz. Adaptation and application of the erosion potential method for tropical soils. **Revista Ciência Agronômica**, [S.L.], v. 51, n. 1, p. 1-10, 2020. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20200004>.

SANCHES, Luiz Antonio Ugeda. Geodireito e a Construção Geográfica-Cartográfica como Instrumento de Política Pública no Setor de Energia Elétrica. **Revista Eletrônica: Tempo - Técnica - Território / Eletronic Magazine**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 61-82, 17 jun. 2016. Biblioteca Central da UNB. <http://dx.doi.org/10.26512/ciga.v5i2.15396>.

SANTOS, Franciane Mendonça dos; LOLLO, José Augusto de. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 663-675, 27 out. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016130053>.

SARAIVA, Cátia Sofia Alves. **Avaliação do Potencial das Imagens Sentinel-1 para Identificação de Culturas Agrícolas**. 2015. 95 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Geográfica, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

SCHINDEWOLF, Marcus; SCHMIDT, Jürgen. Parameterization of the EROSION 2D/3D soil erosion model using a small-scale rainfall simulator and upstream runoff simulation. **Catena**, [S.L.], v. 91, p. 47-55, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.007>.

SEFRIN, Oliver; RIESE, Felix M.; KELLER, Sina. Deep Learning for Land Cover Change Detection. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 78, 28 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13010078>.

SERMET, M. Yusuf; DEMIR, Ibrahim; KUCUKSARI, Sadik. Overhead Power Line Sag Monitoring through Augmented Reality. **North American Power Symposium (Naps)**, [S.L.], p. 1-5, set. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/naps.2018.8600565>.

SHAOQING, Zhang; LU, Xu. **The Comparative Study of Three Methods of Remote Sensing Image Change Detection**. In: The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: 2008. v. 37, p. 1595-1598.

SILVA, Breno Amaro da; GIONGO, Pedro Rogerio; MARTINS, Patrick Tomaz de Aquino; BARBOSA, Thaís Alves; MORAES, Victor Hugo; CAVALCANTE, Thomas Jefferson; GIONGO, Angelina Maria Marcomini. Soil erosion vulnerability in the southern part of the Meia Ponte watershed, Goiás, Brazil. **Idesia (Arica)**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 81-86, jun. 2019. SciELO Agencia Nacional de Investigacion y Desarrollo (ANID). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-34292019000200081>.

SILVA, Marx Leandro Naves; FREITAS, Pedro Luiz de; BLANCANEUX, Philippe; CURI, Nilton. Índices de Erosividade das Chuvas da Região de Goiânia, GO. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 10, n. 32, p. 977-985, out. 1997

SOUZA, Carlos M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172735>.

SOUZA, Natália da Costa; PITOMBO, Cira; CUNHA, André Luiz; LAROCCA, Ana Paula Camargo; ALMEIDA FILHO, Gerson Salviano de. Modelo de classificação de processos erosivos lineares ao longo de ferrovias através de algoritmo de árvore de decisão e geotecnologias. **BCG - Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 72-86, mar. 2017.

SOUZA FILHO, Luiz Arruda de. 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 [...]**. Santos: Inpe, 2019. p. 431-434. ISBN 978-85-17-00097-3.

TAMIMINIA, Haifa; SALEHI, Bahram; MAHDIANPARI, Masoud; QUACKENBUSH Lindi; ADELI Sarina; BRISCO Brian. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 164, n. 1, pp. 152–170, jun. 2020.

TERNIER, Stefaan; KLEMKE, Roland; KALZ, Marco; VAN ULZEN, Patrícia; SPECHT, Marcus. ARLearn: Augmented Reality Meets Augmented Virtuality. **Journal of Universal Computer Science**, v. 18, n. 15, p. 2143-2164, 2012.

TURMINA, Eliana; KANIESKI, Maria Raquel; JESUS, Larissa Antunes de; ROSA, Luiara Heerdt da; BATISTA, Lais Gervasio; ALMEIDA, Alexandre Nascimento de. Avaliação de impactos ambientais gerados na implantação e operação de subestação de energia elétrica: um estudo de caso em palhoça, SC. **Revista de**

**Ciências Agroveterinárias**, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 589-598, 14 nov. 2018. Universidade do Estado de Santa Catarina.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Escoamento superficial**. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: ABRH. 2001. p. 391-441.

VALLADARES, Gustavo Souza; GOMES, Andréa da Silva; TORRESAN, Fabio Enrique; RODRIGUES, Cristina Aparecida Gonçalves; GREGO, Célia Regina. 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

VECI, Luis; BRAUN, Andreas. Sentinel-1 Toolbox. **SAR Basics Tutorial**. 2021. Disponível em: <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20SAR%20Basics%20Tutorial.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2021.

VREUGDENHIL, Mariette *et al.* Sensitivity of Sentinel-1 Backscatter to Vegetation Dynamics: an austrian case study. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 10, n. 9, p. 1396-2014, 1 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10091396>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/9/1396>. Acesso em: 23 out. 2020.

WASHAYA, Prosper; BALZ, Timo; MOHAMADI, Bahaa. Coherence Change-Detection with Sentinel-1 for Natural and Anthropogenic Disaster Monitoring in Urban Areas. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 1026, 28 jun. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10071026>.

WERNER, Piotr. Review of Implementation of Augmented Reality into the Georeferenced Analogue and Digital Maps and Images. **Information**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 12, 30 dez. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/info10010012>.

WISCHMEIER WH, SMITH DD. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA; 1978.

YANG, Liping; DRISCOL, Joshua; SARIGAI, Sarigai; WU, Qiusheng; CHEN, Haifei; LIPPITT, Christopher D. Google Earth Engine and Artificial Intelligence (AI): a comprehensive review. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 14, n. 14, p. 3253, 6 jul. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs14143253>.

## APÊNDICE A

### APLICAÇÃO DE DADOS 3D PARA REPRESENTAÇÃO DE ATIVOS EM FAIXA DE SERVIDÃO DE LTS (QUESTIONÁRIO)

Olá! Sou Julia Cucco Dalri, doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental da UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina (<https://www.udesc.br/faed/ppgplan>).

Sob orientação do Prof. Dr. Francisco Henrique de Oliveira, pesquiso sobre utilização de dados 3D para gestão de ativos do setor elétrico. Minha intenção é identificar se esta forma de representação tem sido utilizada pelas empresas de energia para gestão de seus ativos.

São apenas 15 perguntas e o tempo estimado para conclusão é de 5 minutos. As respostas serão utilizadas somente para este fim e não serão divulgadas de forma individual. Seria ótimo se você pudesse enviar sua resposta até 23/05/2023 para que eu possa dar continuidade às pesquisas. Agradeço de forma antecipada a atenção e mantenho-me à disposição no e-mail: [julia.dalri@udesc.br](mailto:julia.dalri@udesc.br)

1. Você conhece o termo 3D (três dimensões ou tridimensional) para aquisição de dados espaciais?

☐ Sim

☐ Não

2. Em qual setor você trabalha atualmente?

Insira sua resposta

3. Quantos anos você atua neste setor especificamente?

Insira sua resposta

4. Em qual empresa você atua?

Insira sua resposta

5. Para as demandas do setor de energia, você avalia que 3D é uma representação que pode facilitar a interpretação de dados?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Outra

6. Em suas demandas profissionais, você já utilizou dados em 3D?

- ☐ Sim
- ☐ Não

7. Se você já utilizou, em qual demanda foi aplicado? (relatórios, mapeamentos, projetos, representação gráfica, etc.)

Insira sua resposta

8. O resultado foi satisfatório?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Não apliquei

9. Sendo 0 (zero) totalmente sem importância e 10 (dez) totalmente importante, o quanto você avalia ser importante ter e saber usar os dados espaciais 3D para as suas atividades profissionais?

Insira sua resposta

10. Caso a empresa disponha de dados 3D, você avalia que estes podem ser melhor explorados para gestão dos ativos?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Outra

11. Atualmente você saberia dizer quais setores utilizam os dados 3D? Teria potencial de maior uso integrado entre os setores?

Insira sua resposta

12. Em qual demanda atual (envolvendo a gestão dos ativos) você julga ser importante aplicar a representação 3D?

Insira sua resposta

13. Você avalia que 3D é uma representação que traz vantagens para gestão de ativos do setor elétrico?

☐ Sim

☐ Não

☐ Outra

14. Quais vantagens você avalia serem possíveis com o uso de dados 3D?

Insira sua resposta

15. Você considera que os dados 3D são uma fonte importante para o desenvolvimento de pesquisa aplicada ao setor elétrico? Se sim, como você visualiza a aplicação futura?

Insira sua resposta

Este conteúdo foi criado pelo proprietário do formulário. Os dados que você enviar serão enviados ao proprietário do formulário. A Microsoft não é responsável pela privacidade ou práticas de segurança de seus clientes, incluindo aqueles do proprietário deste formulário. Nunca forneça sua senha.

Da plataforma Microsoft Forms |

O proprietário deste formulário não forneceu uma política de privacidade sobre como usará seus dados de resposta. Não forneça informações pessoais ou confidenciais.

| [Condições de uso](#)