



Análise geoespacial de cobertura pluviométrica e telefônica com base em cadastro de ativos do segmento de distribuição elétrica via análises de BDGD

Tema: Planejamento da Expansão

Autores: Caio Nahuel Sousa Fagonde, Thais Cardoso Franco, Gabriel Maia de Assis

Co-Autores: Lindemberg Nunes Reis, Sunny Jonathan

Empresa: Quasar Space

Resumo

Este estudo tem como objetivo mapear áreas de vulnerabilidade a eventos climáticos extremos nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro por meio da análise da distribuição de estações meteorológicas e torres de telecomunicação, essenciais para a transmissão eficiente de dados. A pesquisa é fundamentada no cadastro de ativos do segmento de distribuição elétrica e utiliza Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD). As distribuidoras avaliadas incluem CPFL Paulista, CPFL Piratininga, CPFL Santa Cruz, Enel SP, Energisa Sul/Sudeste, EDP SP e Elektro. A metodologia integra o Processo de Análise Hierárquica (Analytic Hierarchy Process - AHP, em inglês) para seleção de locais e diagramas de Voronoi para otimização da cobertura das redes de sensores. A análise de Voronoi auxilia na identificação de lacunas na cobertura e na otimização da localização de novos sensores. Os resultados visam aprimorar a cobertura de dados meteorológicos e a infraestrutura de comunicação, aumentando a resiliência e eficiência do segmento de distribuição elétrica e subsidiando decisões estratégicas para o desenvolvimento infraestrutural.

1. Introdução

A precisão na coleta e transmissão de dados meteorológicos é fundamental para o planejamento e a operação de diversos setores, incluindo o segmento de distribuição de energia elétrica. Em particular, a interação entre a cobertura pluviométrica e a infraestrutura de comunicação, como torres de telefonia, desempenha um papel crítico na eficiência da coleta de dados meteorológicos. A ausência ou distribuição inadequada dessas infraestruturas pode comprometer a precisão das previsões climáticas e, conseqüentemente, impactar a gestão da rede elétrica.

Este estudo tem como objetivo mapear áreas de vulnerabilidade nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, considerando a densidade e distribuição de estações meteorológicas e torres de telefonia, que são essenciais para a comunicação eficiente desses equipamentos. A análise é fundamentada no cadastro de ativos do segmento de distribuição elétrica e utiliza metodologias baseadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Bases de Dados Geográficas da Distribuidora (BDGD).

As distribuidoras de energia avaliadas neste estudo incluem CPFL Paulista, CPFL Piratininga, CPFL Santa Cruz, Enel SP, Energisa Sul/Sudeste, EDP SP, Elektro, Light e Enel Rio. A seleção dessas distribuidoras permite uma análise abrangente de diferentes regiões geográficas e contextos infraestruturais, proporcionando insights valiosos para a otimização da cobertura de dados meteorológicos e de comunicação.

A metodologia adotada baseia-se na aplicação de diagramas de Voronoi para otimização da cobertura de redes de sensores sem fio. Trata-se de uma técnica matemática utilizada para dividir um espaço geográfico em regiões baseadas na proximidade de um conjunto de pontos de referência. Cada ponto gera uma região de Voronoi que inclui todos os locais mais próximos a ele do que a qualquer outro ponto. Essa abordagem é particularmente útil para otimizar a cobertura de redes de sensores, pois permite identificar áreas com cobertura insuficiente e planejar a localização ótima de novos sensores ou estações. No contexto deste estudo, a análise de Voronoi será

de sensores e estações meteorológicas. Vargany et al. (2017) exploram o uso de diagramas de Voronoi para estimar e otimizar a cobertura de redes de sensores sem fio, destacando a eficiência dessa técnica em aplicações geoespaciais. Rojas Briceño et al. (2021) utilizam o Processo de Análise Hierárquica (AHP) combinado com análises espaciais para identificar locais ideais para a instalação de estações meteorológicas. Hernández et al. (2012) investigam a influência de variáveis climáticas na demanda de energia elétrica em redes inteligentes, fornecendo insights sobre a interação entre condições meteorológicas e consumo energético.

Complementando essas abordagens, Trabal et al. (2013) detalham o uso de redes de radares meteorológicos de baixo custo e infraestrutura mínima para o monitoramento de riscos climáticos, demonstrando a viabilidade de soluções acessíveis para coleta de dados em regiões de difícil acesso. Por fim, Sharp et al. (2023) discutem as necessidades de dados meteorológicos de alta qualidade para o planejamento e análise de sistemas de energia modernos, enfatizando a importância da integração entre dados climáticos e a infraestrutura elétrica.

A importância deste estudo reside na sua capacidade de identificar lacunas na infraestrutura atual e propor soluções para aprimorar a cobertura de dados meteorológicos e de comunicação, contribuindo para a resiliência e eficiência do setor de distribuição de energia elétrica. Além disso, os resultados poderão subsidiar decisões estratégicas para o desenvolvimento de infraestruturas mais robustas e integradas, essenciais para a segurança e sustentabilidade dos sistemas elétricos.

2. Desenvolvimento

A primeira parte do levantamento consiste em avaliar se a distribuição existente de estações pluviométricas públicas na região de cada distribuidora elétrica está adequada. Neste caso, considerou-se pluviômetros e PCDs (Plataformas de Coleta de Dados) pertencentes ao CEMADEN, à DECEA, ao INMET, e à ANA.

Os dados vetoriais (polígonos) dos conjuntos elétricos de cada distribuidora nas regiões de São Paulo e Rio de Janeiro foram extraídos diretamente dos datasets geoespaciais disponibilizados na BDGD (Base de Dados Geográficos da Distribuidora). Neste caso, selecionou-se os conjuntos pertencentes às seguintes distribuidoras:

- CPFL Paulista
- CPFL Piratininga
- CPFL Santa Cruz
- EDP
- Enel SP
- LIGHT
- Energisa Sul/Sudeste
- Neoenergia Elektro
- Enel RJ

Uma vez obtidos os respectivos conjuntos de dados, obteve-se um mapa de calor correspondente aos polígonos de Voronoi que identificam as regiões cobertas por diferentes pluviômetros. Neste caso, utilizou-se uma escala de cores que vai do azul (uma menor área coberta por um único pluviômetro, ou de forma equivalente, uma maior densidade de cobertura pluviométrica) ao vermelho (menor densidade de cobertura, com um único pluviômetro tendo que cobrir uma região maior, prejudicando a precisão da informação meteorológica coletada).

A construção dos polígonos se baseia em avaliar a “área de influência” de cada pluviômetro. Cada polígono representa a superfície n-dimensional (neste caso aplicado a um mapeamento bidimensional), correspondendo a um ponto do conjunto original (também conhecido como “gerador”), dentro do qual a distância de qualquer ponto amostrado será menor em relação ao gerador do polígono do que a qualquer outro gerador (DOBRIN, 2000).

Em seguida, analisa-se a avaliação de cobertura de transmissão telefônica dentro desta mesma área de interesse. Para esta análise, adota-se que cada torre de telefonia possui um raio de transmissão de dez quilômetros, em média. Busca-se então verificar quais regiões estão fora da cobertura telefônica, o que indica que estas seriam regiões precárias em termos de monitoramento, uma vez que este é o método de comunicação de dados mais comumente utilizado em sensores, e seriam, portanto, áreas “cegas”.

A Fig. 1 representa o mapa de calor de polígonos de Voronoi, indicando visualmente as regiões com melhor (azul) e pior (vermelho) cobertura de sensores.

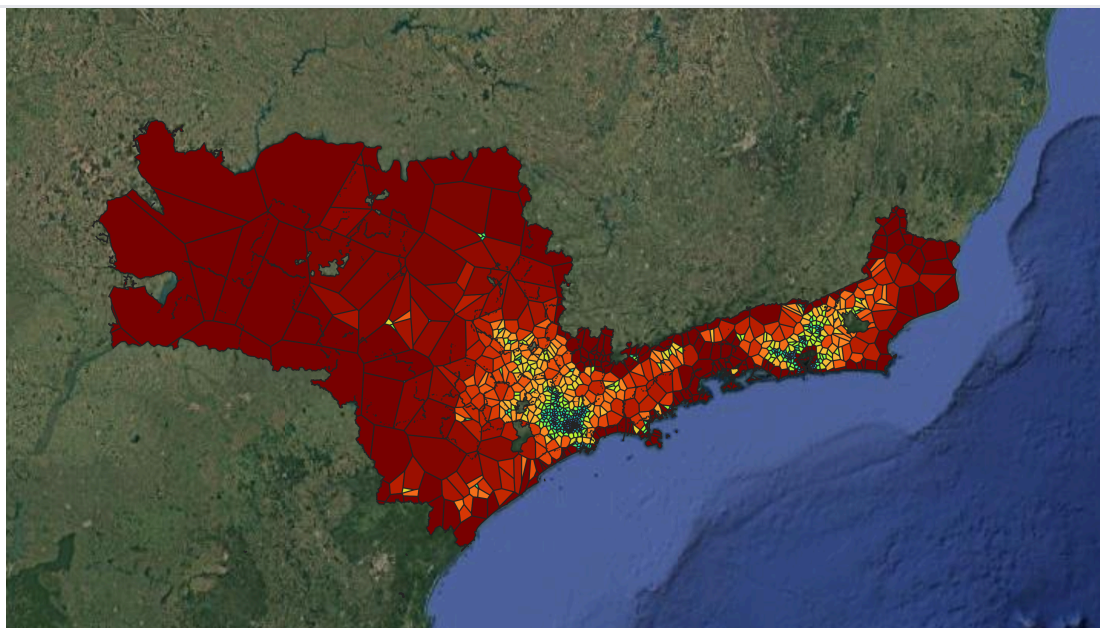


Figura 1. Mapa de calor gerado por polígonos de Voronoi, recortado pelos limites dos conjuntos elétricos das distribuidoras indicadas.

A Fig. 2, por sua vez, mostra uma vista da mesma região com os diferentes conjuntos elétricos sobrepostos, com cada distribuidora sendo indicada por rótulos. As Figuras subsequentes, de 3 a 10, correspondem à vista em ampliação da sobreposição dos conjuntos elétricos de cada distribuidora: CPFL Paulista, CPFL Piratininga, CPFL Santa Cruz, EDP, Enel RJ, Enel SP, Neoenergia Elektra e Light, respectivamente. Nestas figuras, busca-se identificar as com pior cobertura de monitoramento pluviométrico, indicado no mapa de calor como as regiões vermelhas.

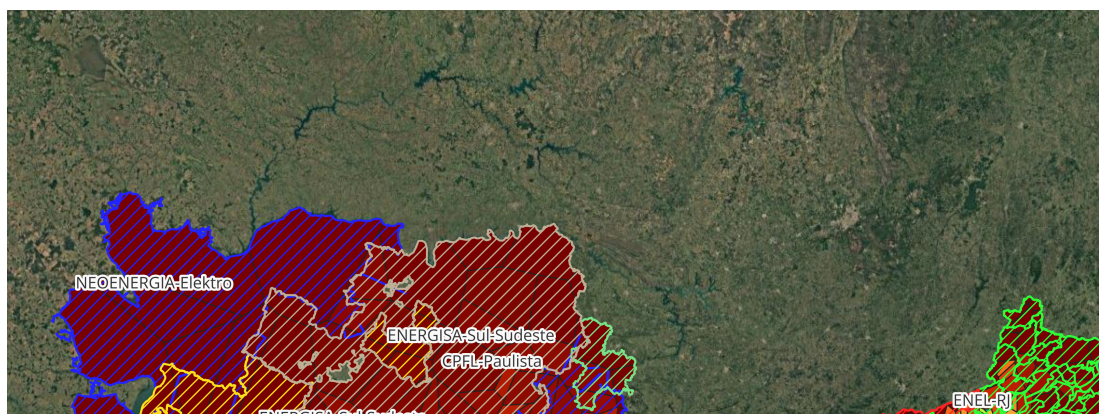


Figura 2. Sobreposição dos conjuntos elétricos de cada distribuidora no mapa de calor de cobertura pluviométrica.

Para o caso da CPFL Paulista (Fig. 3), nota-se que a maior parte dos conjuntos elétricos, localizados no interior do estado de São Paulo, encontram-se em regiões de maior carência relativa de sensores, com a exceção dos conjuntos que encontram-se mais próximos da região metropolitana do município de São Paulo.

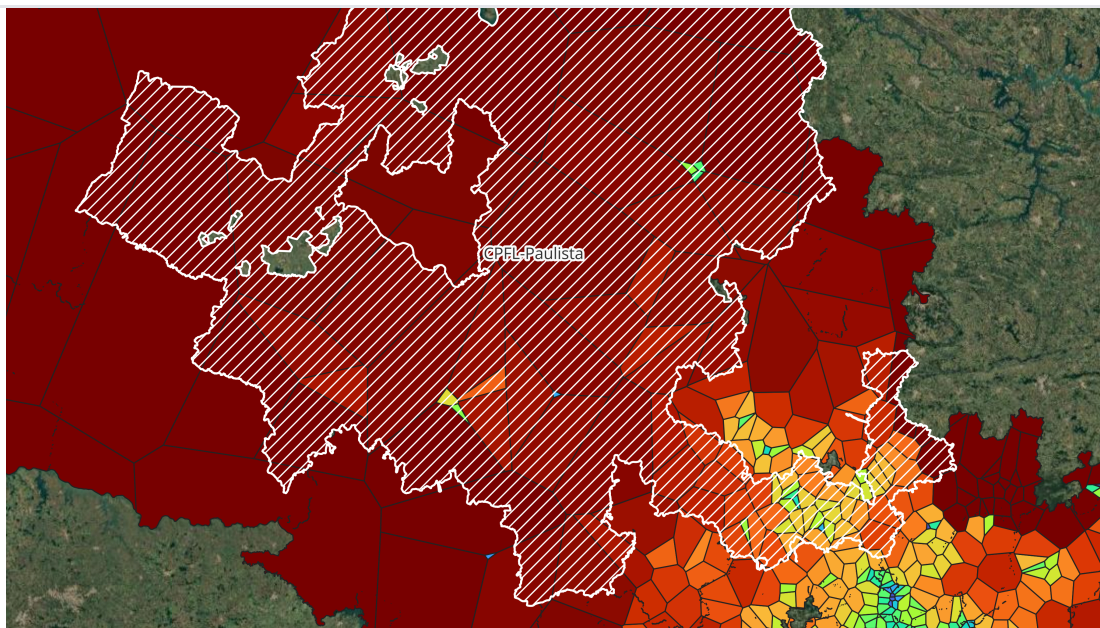


Figura 3. Sobreposição dos conjuntos elétricos da CPFL Paulista.

Já na Fig. 4, correspondente à CPFL Piratininga, nota-se uma melhor cobertura de sensores, exceto nos conjuntos mais a oeste, sendo estes os conjuntos de Salto de Pirapora 1, Boituva 1, Boituva 2 e Porto Feliz 1.

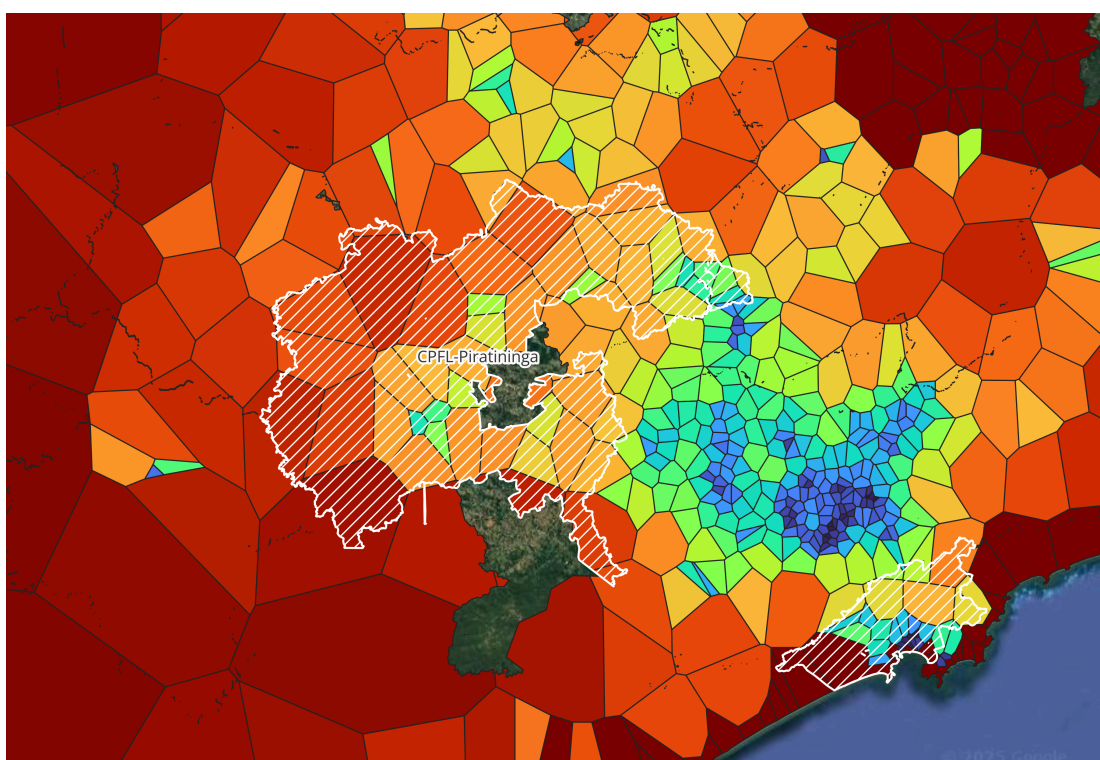


Figura 4. Sobreposição dos conjuntos elétricos da CPFL Piratininga.

Na Fig. 5, da CPFL Santa Cruz, observa-se que grande parte dos conjuntos estão em regiões de pior cobertura, no interior do estado. Já na Fig. 6, conclui-se que os conjuntos da EDP-SP possuem uma boa cobertura de monitoramento, exceto pela região de encontro entre os conjuntos de Boissucanga e Cesar de Souza, que é uma região de serra que se aproxima do litoral sudeste paulista, conhecida por fortes eventos de chuva e movimentações de terra (como deslizamentos).

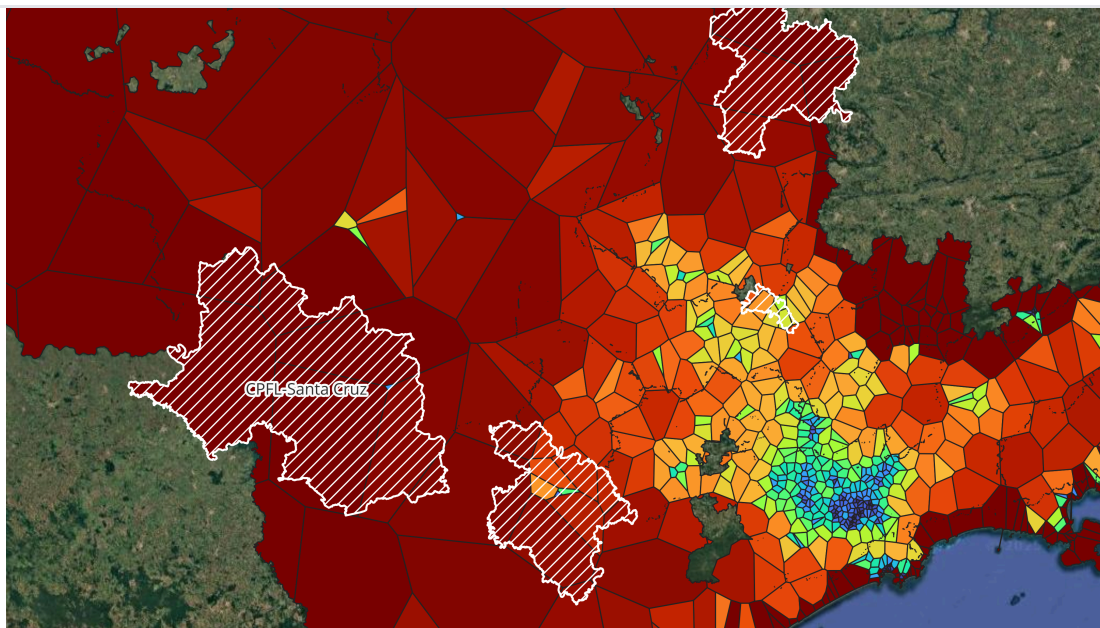


Figura 5. Sobreposição dos conjuntos elétricos da CPFL Santa Cruz.

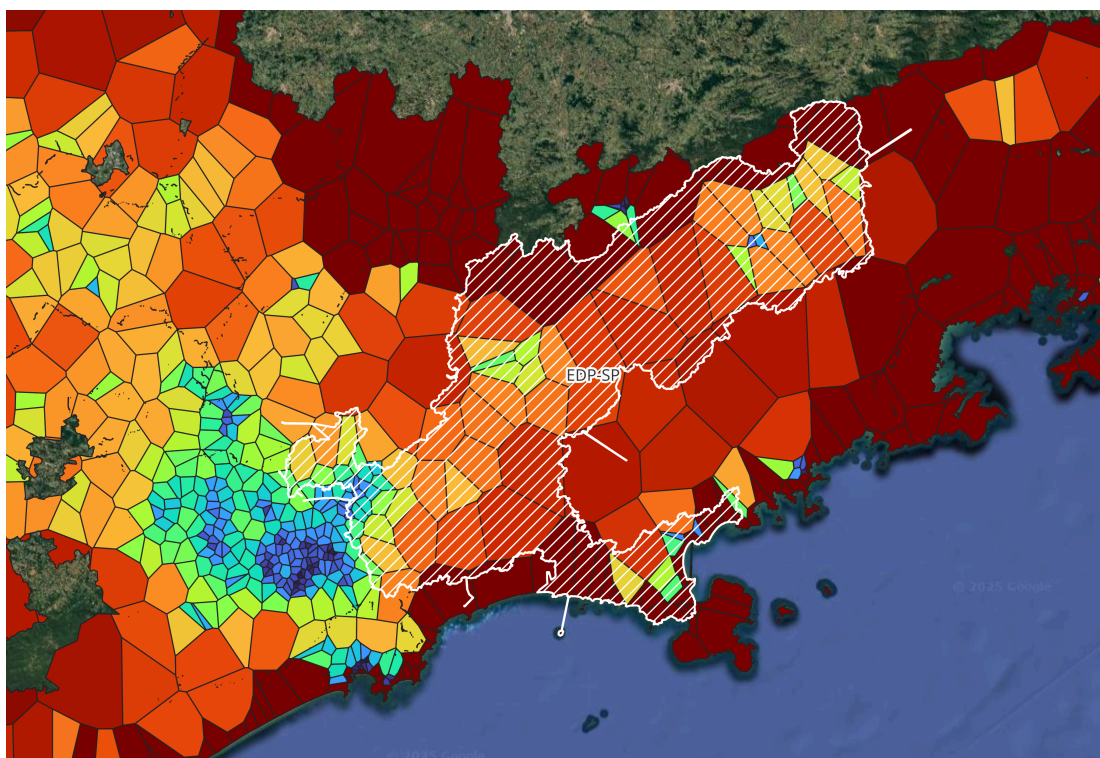


Figura 6. Sobreposição dos conjuntos elétricos da EDP-SP.

A Fig. 7 indica que os conjuntos da Enel RJ possuem boa cobertura pluviométrica na região metropolitana do Rio de Janeiro, ao passo que possuem uma pior cobertura na região leste do estado e na área do município de Paraty (conjunto Mambucaba), que é uma região com elevados índices de precipitação durante a época chuvosa anual.



Figura 7. Sobreposição dos conjuntos elétricos da Enel RJ.

A Fig. 8, da Enel SP, apresenta uma boa cobertura pluviométrica na maior parte dos conjuntos, com exceção do conjunto Juquitiba, a sudoeste.

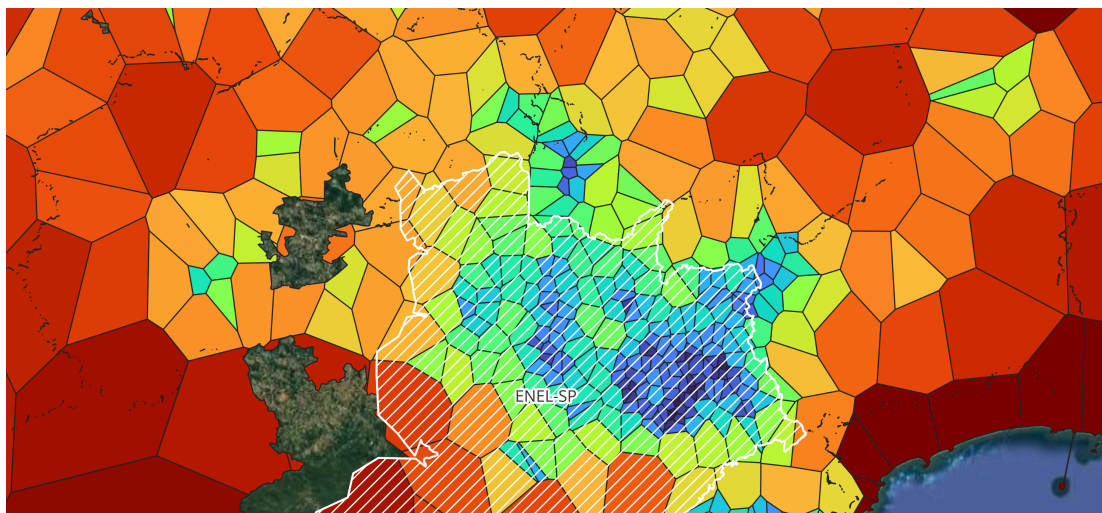


Figura 8. Sobreposição dos conjuntos elétricos da Enel SP.

A Fig. 9, da Energisa Sul-Sudeste, apresenta um quadro similar àquele encontrado nos conjuntos da CPFL Santa Cruz, com uma cobertura pluviométrica mais carente exceto nos poucos conjuntos próximos à região metropolitana de São Paulo.

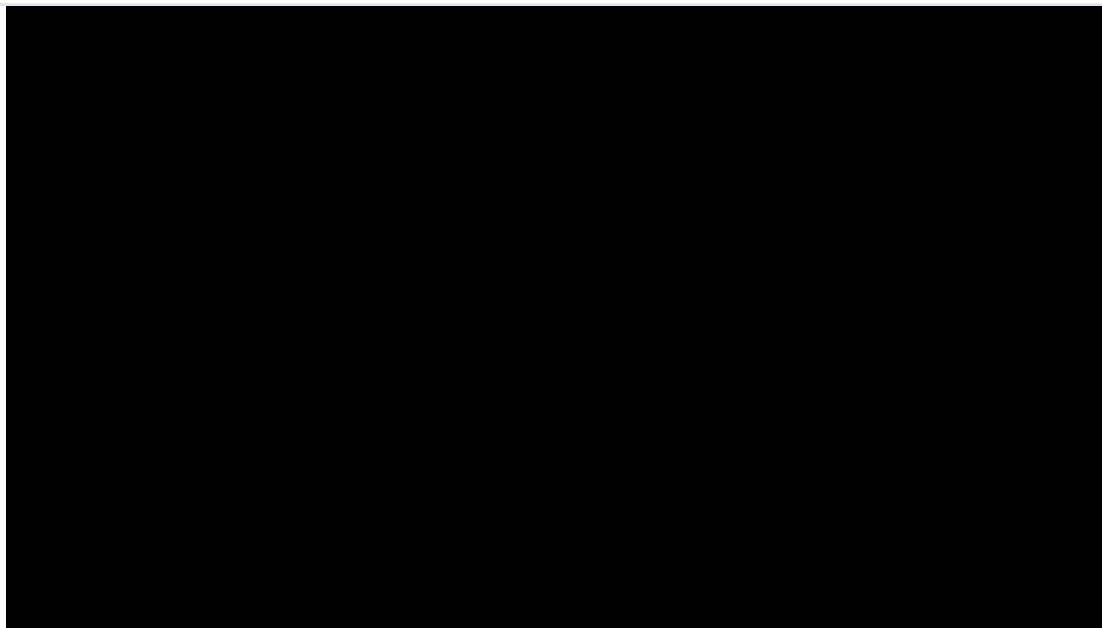


Figura 9. Sobreposição dos conjuntos elétricos da Energisa Sul-Sudeste.

A distribuidora Light (Fig. 10), apresenta uma boa cobertura pluviométrica à exceção dos conjuntos de Volta Redonda (região oeste-sudoeste) e a parte norte do conjunto Centenário (norte-noroeste).



Figura 10. Sobreposição dos conjuntos elétricos da LIGHT.

Finalmente, a distribuidora Neoenergia (Fig. 11) apresenta regiões com carência pluviométrica no limite noroeste do estado de São Paulo, assim como na região sul.

Figura 11. Sobreposição dos conjuntos elétricos da Neoenergia-Elektro.

Uma vez realizada a análise de cobertura pluviométrica, busca-se identificar as regiões de carência em cobertura telefônica. A Fig. 12 mostra a distribuição de torres de telefonia nas proximidades das áreas de São Paulo e Rio de Janeiro, totalizando 30.847 torres.

Figura 12. Torres de telefonia na proximidade da área de estudo. Dados da Anatel de 2024.

Por fim, a Fig. 13 representa a sobreposição das regiões sem cobertura telefônica dentro da região de estudo. Destaca-se como as áreas mais precárias os conjuntos elétricos da Neoenergia, a norte-noroeste do estado de São Paulo e a região sul do mesmo estado, correspondente aos conjuntos da Energisa.

Figura 13. Regiões de fraca cobertura telefônica, sobrepostas nos conjuntos elétricos das distribuidoras destacadas.

A partir do levantamento pluviométrico, construiu-se um conjunto de polígonos de Voronoi ("polígonos de influência"), que indicam a região abarcada por cada pluviômetro público disponível. A partir disto, identificou-se para cada distribuidora os conjuntos elétricos em áreas de pior cobertura de monitoramento, identificando-se que os melhores conjuntos de acordo com esta referência são aqueles próximos às zonas metropolitanas das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Subsequentemente, realizou-se uma análise da cobertura providenciada por torres de telefonia existentes. Adotando-se um raio de alcance de 10 km, constatou-se a criação de "lacunas" de cobertura, notavelmente nas regiões noroeste e sul do estado de São Paulo, afetando, mais diretamente, as distribuidoras Neoenergia e Energisa, respectivamente.

Desta forma, o trabalho serve como base para a modernização da infraestrutura de monitoramento climático existente, visando melhorar a resiliência de cada distribuidora a eventos climáticos extremos, que põem em risco a entrega contínua e qualificada de energia em zonas afetadas, o que torna necessário uma cobertura de monitoramento eficiente.

O Projeto de PDI do qual este artigo é parte integrante contempla ações neste tema relacionadas ao desenvolvimento de um sistema para que estas informações desenvolvidas sejam apresentadas como uma ferramenta a ser utilizada pelas empresas distribuidoras de energia no trato com eventos climáticos extremos.

Agradecemos a oportunidade em apresentar os resultados parciais do Projeto PA1098 – Melhores Práticas para o Segmento de Distribuição em Face de Eventos Climáticos Extremos. Iniciado em novembro de 2024, o projeto tem duração de 18 meses e é coordenado pelo Instituto Abradee, com o Grupo Enel como proponente e patrocinadora, junto os Grupos Econômicos Celesc, Cemig, Copel, CPFL, EDP, Energisa, Equatorial, Light, Neoenergia e Oliveira Energia. O desenvolvimento está a cargo do consórcio liderado pela Ernst Young (EY), contando com a participação das empresas Quasar Space, Critério, Delta Infra e Quantum.

Este artigo contempla uma parte do projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - PDI, dentro do Programa de PDI da Agência Nacional de Eficiência Energética ANEEL.

4. Referências bibliográficas

Argany, Meysam & Mostafavi, Mir Abolfazl & Karimipour, Farid & Gagné, Christian. (2011). A GIS Based Wireless Sensor Network Coverage Estimation and Optimization: A Voronoi Approach. *Transactions on Computational Science*. 14. 151-172. 10.1007/978-3-642-25249-5_6.

Dobrin, Adam. "A review of properties and variations of Voronoi diagrams." *Whitman College* 10.1.453 (2005): 9156.

Rojas Briceño, N.B.; Salas López, R.; Silva López, J.O.; Oliva-Cruz, M.; Gómez Fernández, D.; Terrones Murga, R.E.; Iliquin Trigos, D.; Barrera Gurbillón, M.; Barboza, E. Site Selection for a Network of Weather Stations Using AHP and Near Analysis in a GIS Environment in Amazonas, NW Peru. *Climate* 2021, 9, 169. <https://doi.org/10.3390/cli9120169>

J. M. Trabal, J. G. Colom-Ustariz, S. L. Cruz-Pol, G. A. Pablos-Vega and D. J. McLaughlin, "Remote Sensing of Weather Hazards Using a Low-Cost and Minimal Infrastructure Off-the-Grid Weather Radar Network," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 5, pp. 2541-2555, May 2013, doi: 10.1109/TGRS.2012.2214227

Hernández, L.; Baladrón, C.; Aguiar, J.M.; Calavia, L.; Carro, B.; Sánchez-Esguevillas, A.; Cook, D.J.; Chinarro, D.; Gómez, J. A Study of the Relationship between Weather Variables and Electric Power Demand inside a Smart Grid/Smart World Framework. *Sensors* 2012, 12, 11571-11591. <https://doi.org/10.3390/s120911571>

J. Sharp, M. Milligan, and H. C. Bloomfield, "Weather Dataset Needs for Planning and Analyzing Modern Power Systems," Oct. 2023. [Online]. Available: <https://www.esig.energy/wp-content/uploads/2023/10/ESIG-Weather-Datasets-fullreport-2023b.pdf>

Avaliação

6.93

Avaliador	Aplicação	Abrangência	Ordenação	Originalidade	Embasamento
Romulo Toledo	3.00	2.00	2.00	3.00	3.00
Bernardo Margotto Rosa Gonçalves	2.00	1.00	4.00	3.00	4.00
Ramon Araújo Dias	3.00	2.00	3.00	3.00	2.00

Perguntas - Avaliador Bernardo Margotto Rosa Gonçalves

- Pergunta 1:

Quais foram os maiores desafios técnicos na elaboração desse estudo?
- Pergunta 2:

Os autores consideraram mapear a frequência e gravidade de ocorrência dos eventos climáticos, para comparar com os mapeamentos realizados?
- Pergunta 3:

Como os autores veem a resposta do setor elétrico à crescente demanda de ações mitigadoras aos eventos climáticos extremos?

Perguntas - Avaliador Ramon Araújo Dias

Conteúdo do sistema de dados.

- Pergunta 2:

como mensurar os impactos na distribuição frente ao apresentado?
- Pergunta 3:

Quais regiões de fato são críticas? A frequência de ocorrência do evento climático na região, a características do sistema de distribuição, quantidade e tipos de clientes não deveriam ser importante para obter as regiões que de fato são críticas segundo metodologia apresentada?

Perguntas - Avaliador Romulo Toledo

- Pergunta 1:

.....
- Pergunta 2:

.....
- Pergunta 3:

.....