

O Papel das Redes Móveis Legadas na Resiliência da Infraestrutura: Evidências da Enchente no Sul do Brasil

Daniel Meyer, Leandro Bertholdo, Lisandro Z.
Granville

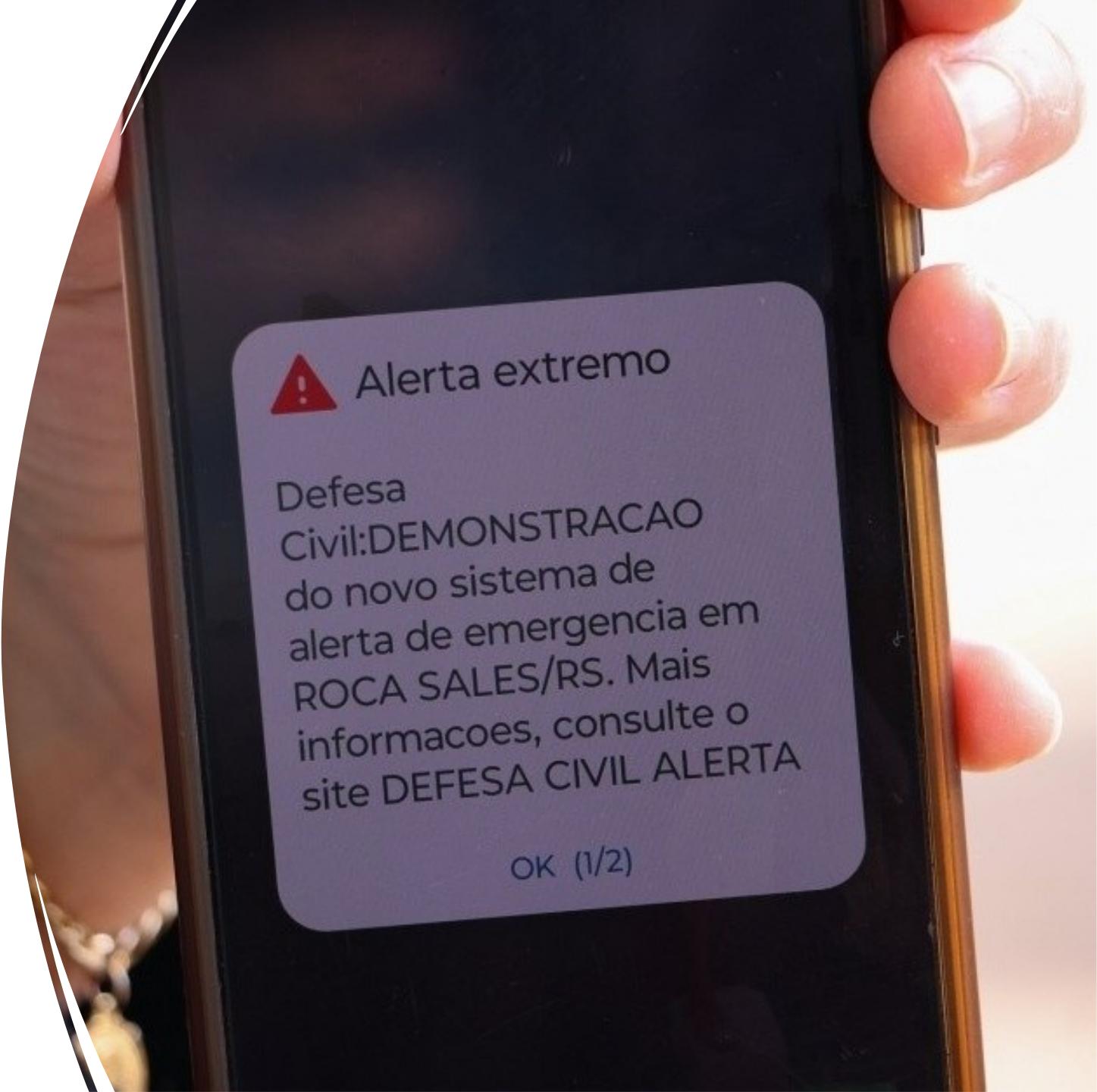


Introdução

- Esta pesquisa investiga a resiliência das redes móveis durante os eventos climáticos extremos de maio de 2024 no Sul do Brasil.
- Foco: A **cidade de Porto Alegre**.

Objetivo

- Entender o **impacto** do evento na infraestruturas de **telefonia móvel**.
- **Analizar a resiliência** dessas redes durante a enchente.



Perguntas de Pesquisa

Quais foram os principais **fatores** que levaram às **interrupções dos serviços móveis** durante a enchente de 2024?

Como a cobertura móvel teria sido afetada se as redes **2G e 3G** já tivessem sido **descontinuadas**?

Quais são as possíveis soluções para manter a **resiliência das redes celulares móveis** em situações de **catástrofe**?

Contribuição

Investigação de um **tema raramente abordado na literatura: falhas de longo prazo** em redes móveis devido a desastres climáticos extremos.

Análise de um evento de enchente com duração **superior a 30 dias**, permitindo avaliar o desempenho da rede durante **interrupções prolongadas**.

Metodologia

- Para quantificar os impactos regionais, utilizamos conjuntos de **dados públicos da Anatel**
- Para identificar a situação hidrica utilizamos **mapeamento da inundação** monitorada pelo **Instituto de Pequenas Hídricas da UFRGS (IPH)**.
- Para determinar as causas e o status operacional dos sites, empregamos conjuntos de **dados privados de 2 das 3 operadoras móveis** da cidade.
 - **600 ERBs** licenciadas em Porto Alegre (2024).
 - Representavam **~67%** de todas as ERBs da cidade.

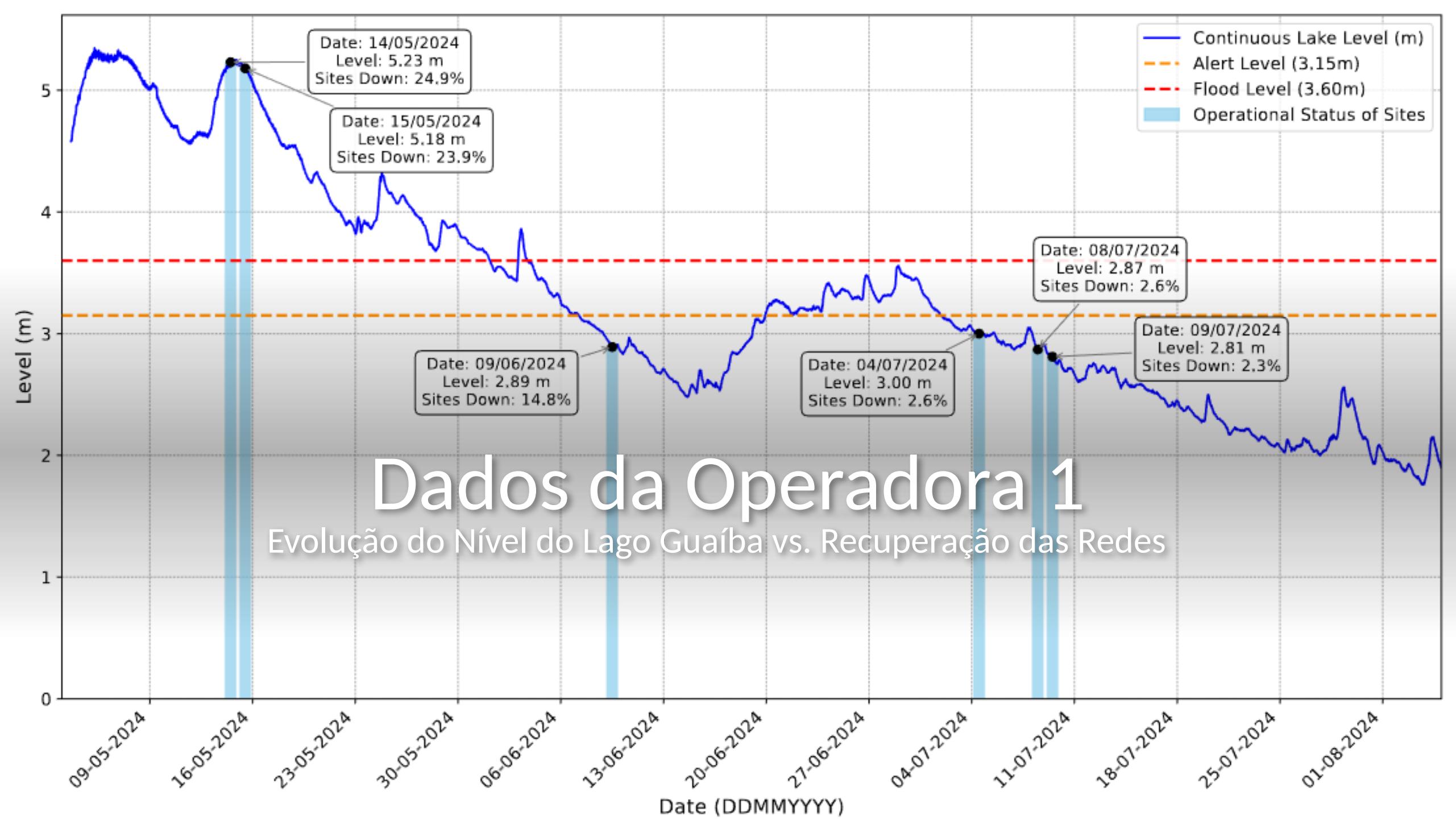


Análise da Operadora 1

Estudo comparativo de
índice de falhas **2G vs. 5G**.

Snapshots operacionais
(maio, junho e julho 2024).

Foco: Porto Alegre.



Dados da Operadora 1

Evidências: Danos aos equipamentos – sites inundados



Resultados da Operadora 1: Causa da Falha

Snapshot de 14 de maio 2024

- Causas das falhas dos sites
 - 76 de 305 sites afetados (~25%).
 - Conclusão: **59,2%** das falhas estão relacionadas a danos causados pela água e quedas de energia.

Causa	Quantidade	%
Site Inundado	24	31,6
Queda de Energia	21	27,6
Sem acesso ao Site	19	25,0
Sem Informação	9	11,8
Rompimento do Anel Óptico	2	2,6
Vandalismo no Site	1	1,3
Total	76	100

Sem Informação = sem equipe disponível para verificação.

Sem Acesso = local inacessível no dia.

Vandalismo = roubo de cabos de energia do gerador

Resultados da Operadora 1: Falha por Tecnologia

Snapshot de 14 de maio 2024

- Índice de falhas
 - Estudo comparativo 2G vs. 5G.
 - **2G: 22,06%.**
 - 5G: 25,47%.

Tecnologia	Setores Afetados	Índice de Falhas %
2G	60	22,06
3G	200	27,14
4G	987	25,72
5G	109	25,47
Total	1356	25,71

- Conclusão: O 2G apresentou um índice de falhas menor.

Análise da Operadora 2

Snapshot de 7 de maio 2024.

Estudo comparativo da
cobertura 2G vs. 5G.

Foco: Limite da enchente na
área central de Porto Alegre.

Dados da Operadora 2

Mapas de estimativa de cobertura

- A ausência de modelos de predição calibrados durante a enchente motivou o uso de um modelo empírico de cobertura.
- Aplicação rápida e visão inicial das áreas afetadas, permitindo identificar falhas e orientar as etapas seguintes da análise.

Dados da Operadora 2

Características das tecnologias móveis.

- Observação empírica obtida via **WalkTest** e **DriveTest**.
 - Área urbana de alta densidade.

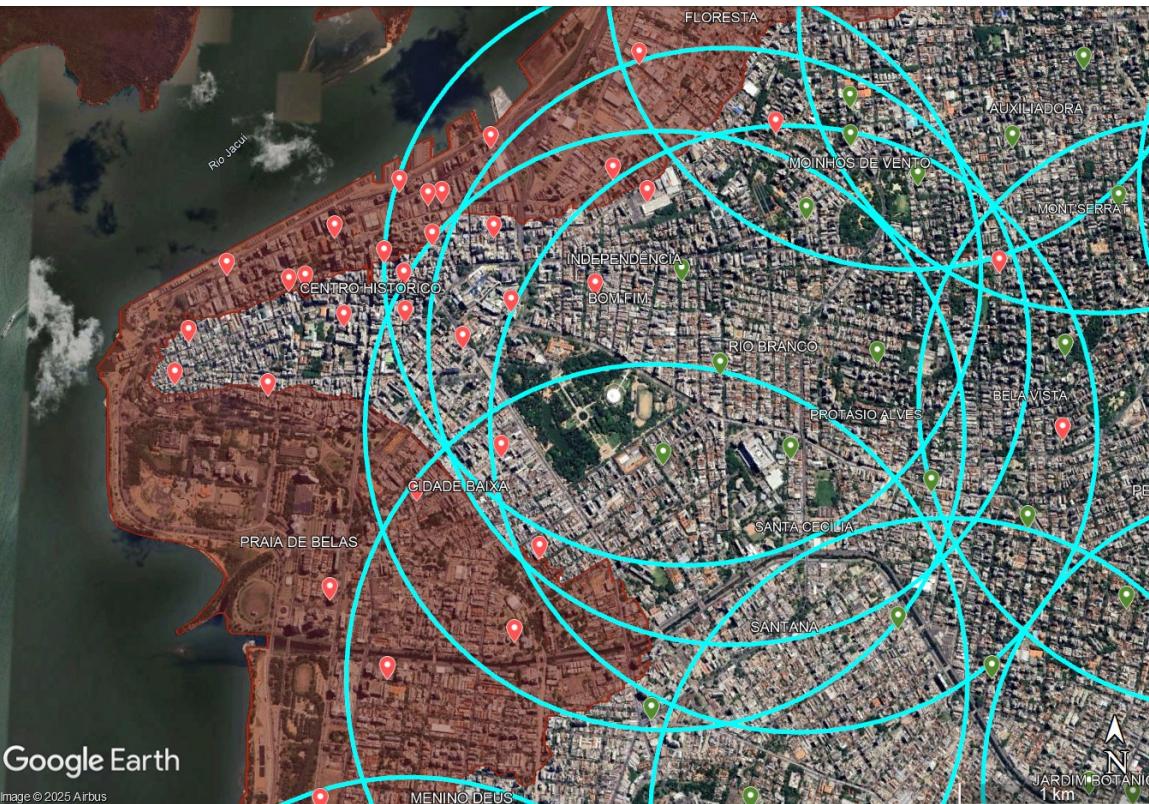
Tecnologia	Codificação	Frequência (MHz)	Alcance(km)
2G	GSM	850 - 1800	1,6
3G	WCDMA	850 / 2100	1,4
4G	LTE	700 - 2600	1
5G	NR	2300 / 3500	0,5

- A partir destes dados derivamos uma regra prática:
 - 1.600 m para 2G
 - 500 m para 5G

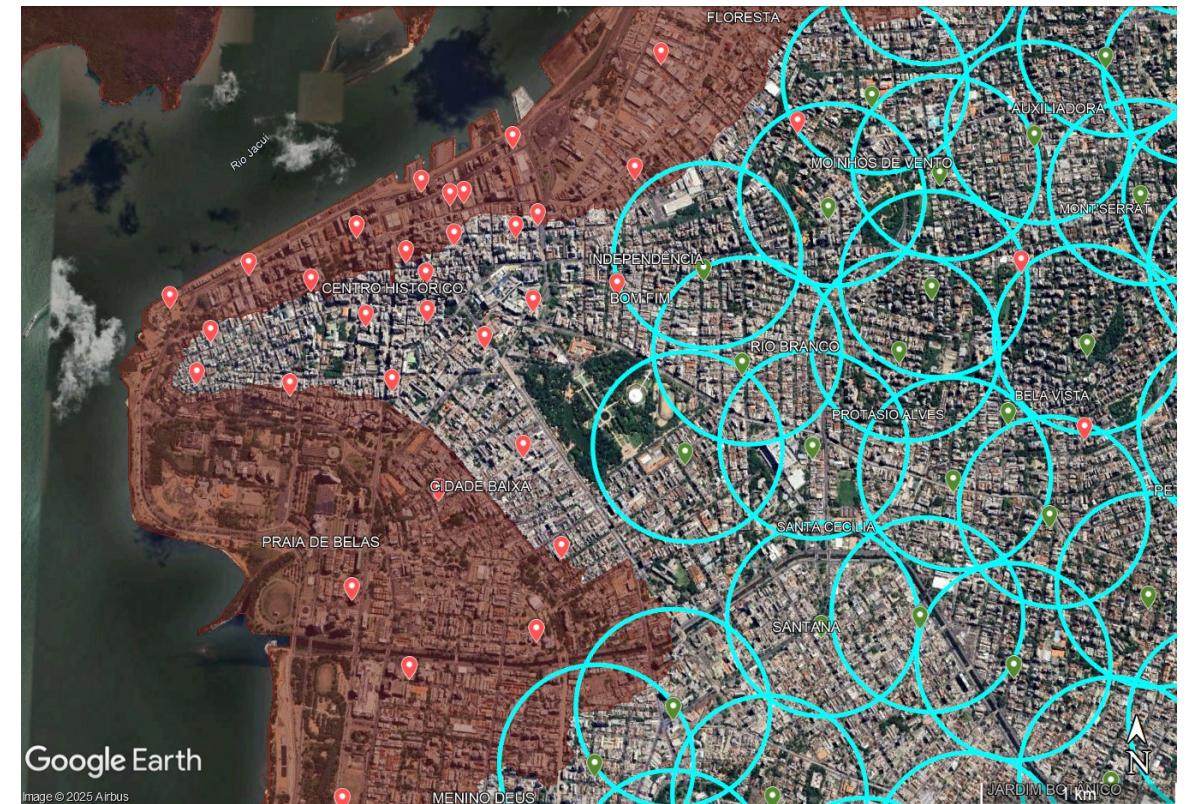
Resultados da Operadora 2: Estimativa Cobertura

Mapas de Estimativa de Cobertura a partir das ERBs ativas em 7/maio/2024.
Em vermelho ERBs desligadas, em verde ERBs ativas.

-



Estimativa 2G - 1,6 km de alcance



Estimativa 5G - 500m de alcance

Análise da Operadora 2: Predição de Cobertura

Mapas de predição de cobertura (modelo estatístico formal)

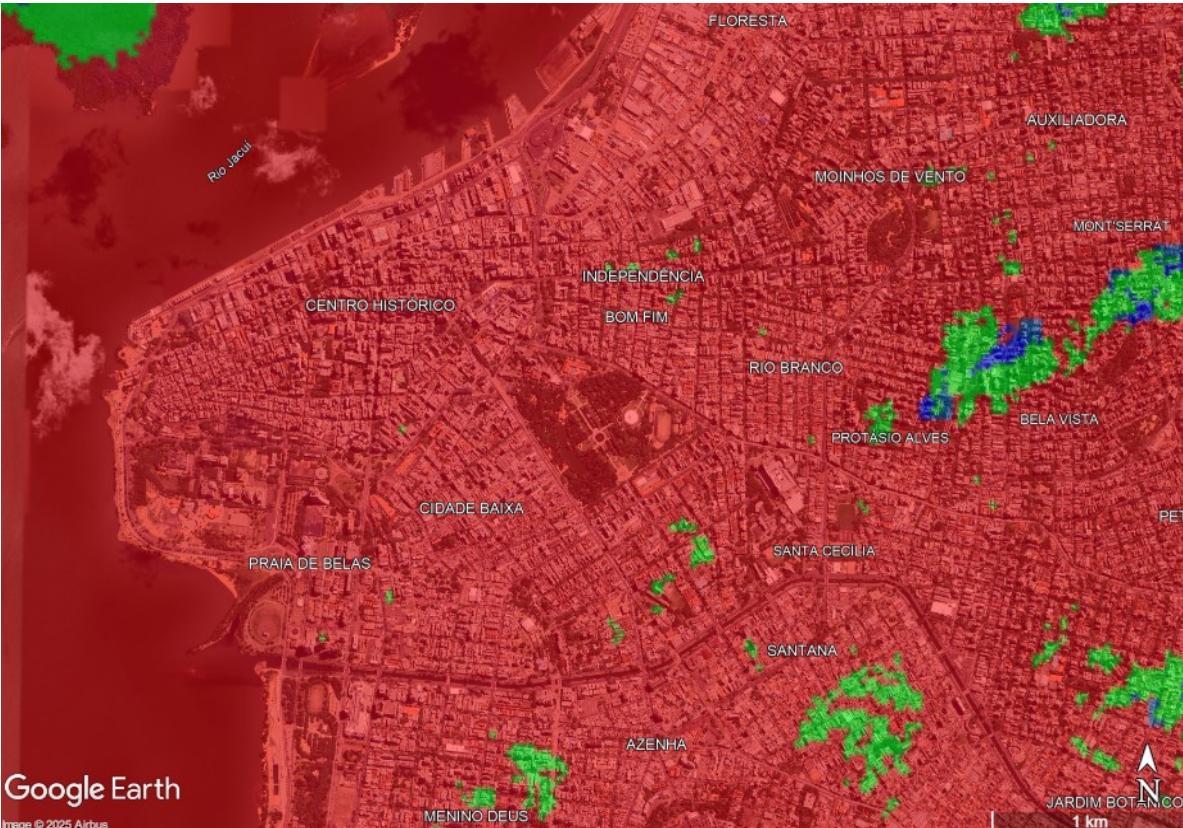
- Queríamos validar os mapas de estimativa.
- Utilizada a **ferramenta Atoll**
 - padrão da indústria para planejamento de RF.
- Entradas **incluíram o clutter**
 - Tipos de estruturas, densidade urbana, frequências, topografia e localização dos sites ativos.
- Os modelos incorporaram parâmetros específicos de cada tecnologia (2G/5G).

Resultados da Operadora 2

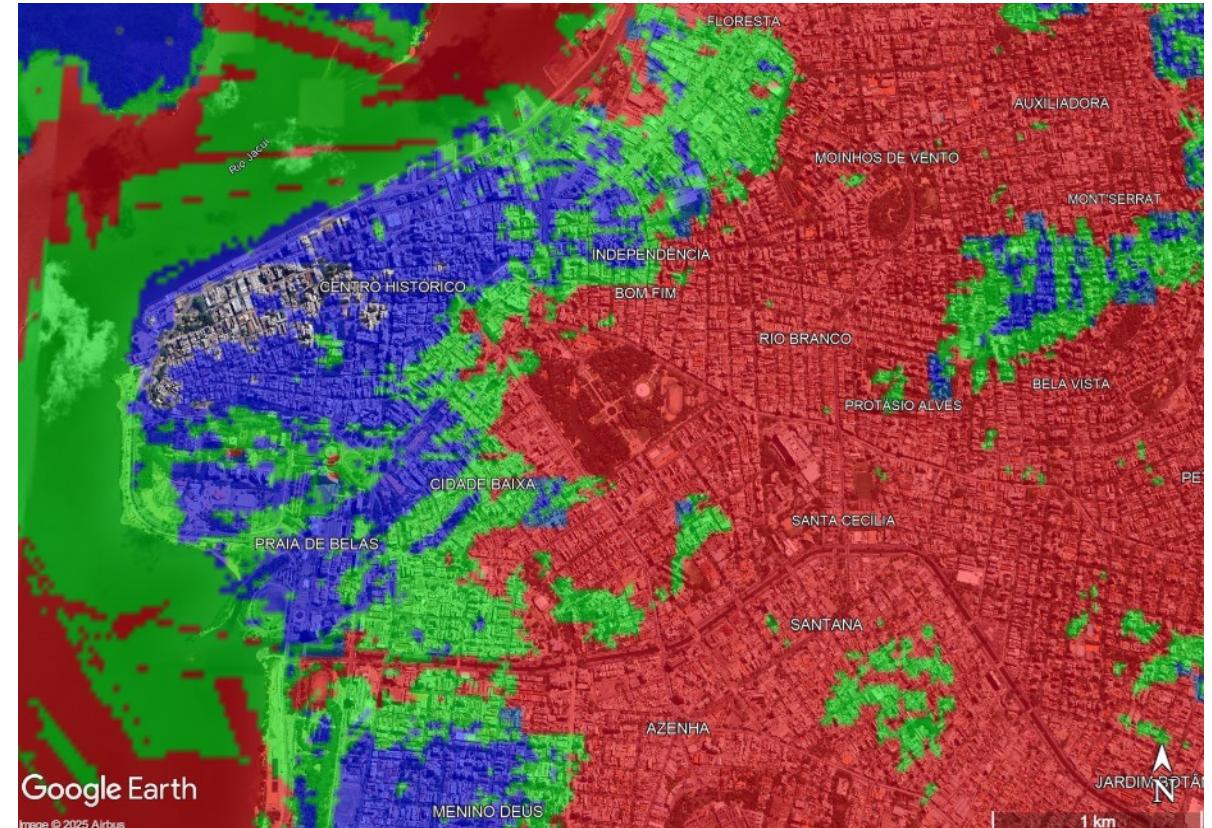
Mapas de Predição 2G: Antes e durante

2G (GSM) — Reference Signal Received Power - RSRP (dBm)

- ≥ -75 dBm: Optimal Signal
- 75 to -83 dBm: Regular Signal
- 83 to -102 dBm: Poor or Weak Signal



Situação do 2G antes da enchente

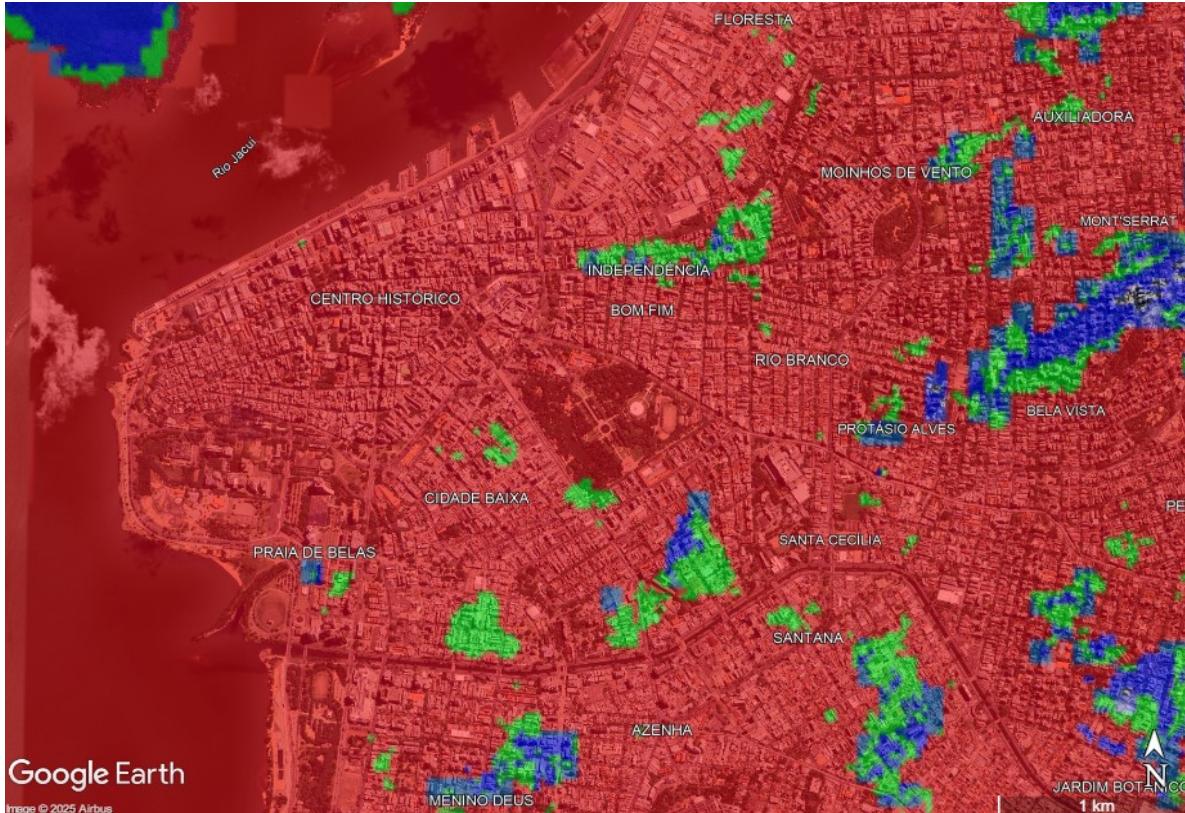
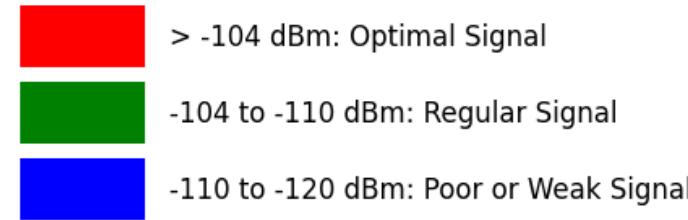


Situação do 2G durante a enchente

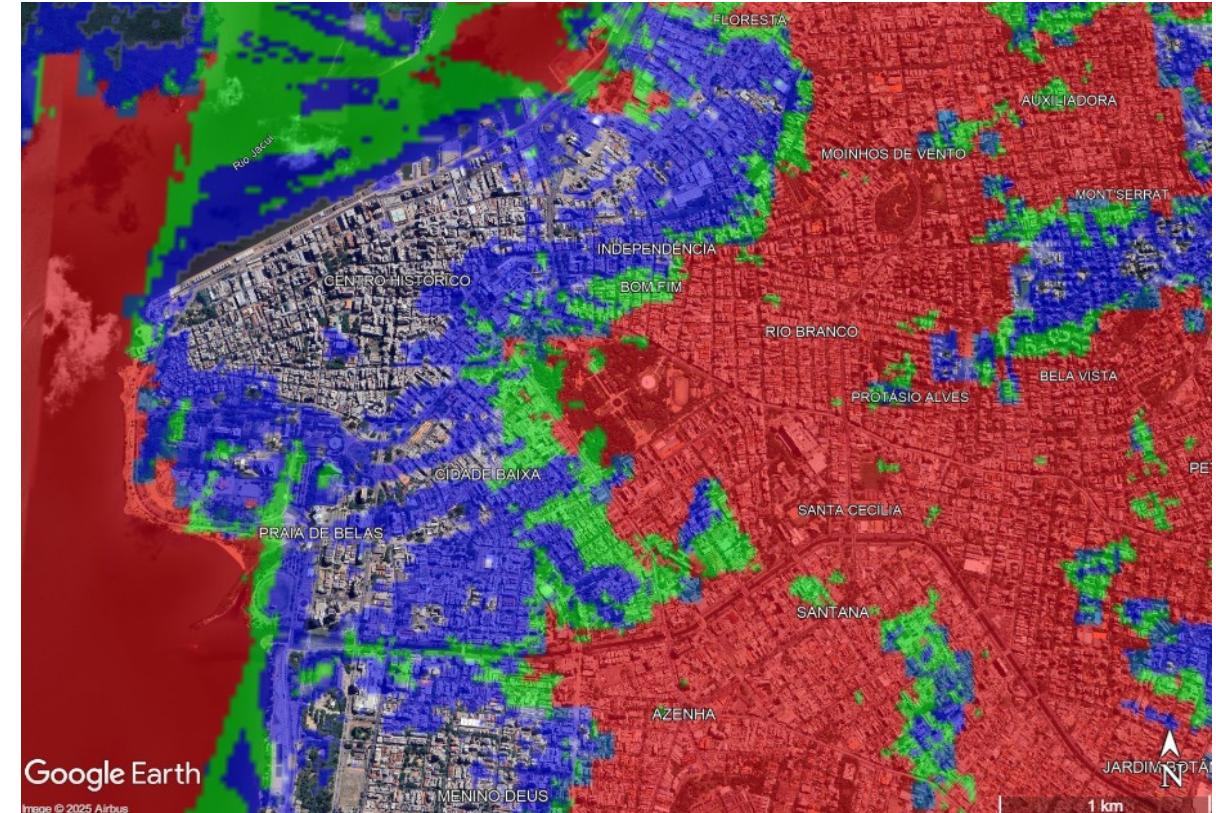
Resultados da Operadora 2

Mapas de Predição 5G: Antes e durante

5G (NR) — Reference Signal Received Power - RSRP (dBm)



Situação do 5G antes da enchente



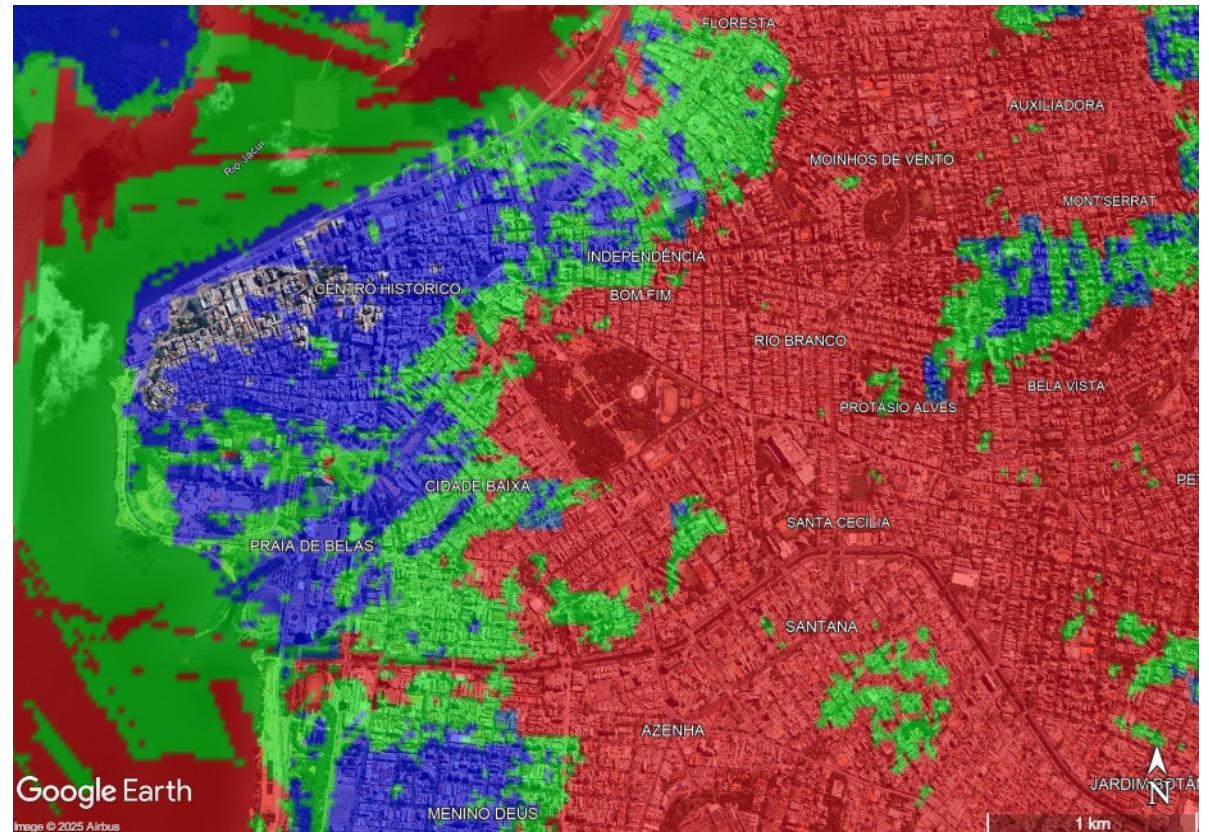
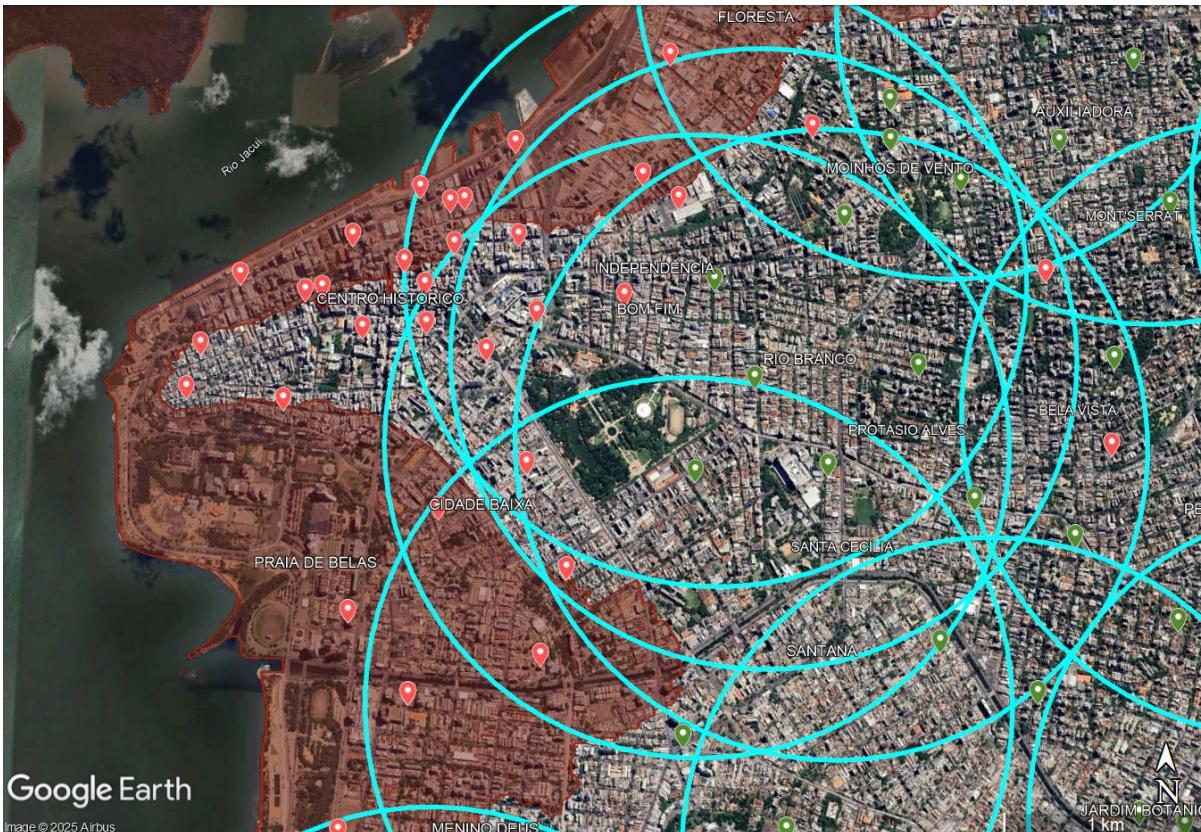
Situação do 5G durante a enchente

Resultados da Operadora 2

Mapa de Estimativa 2G (esquerda) vs.
Mapa de Predição (direita)

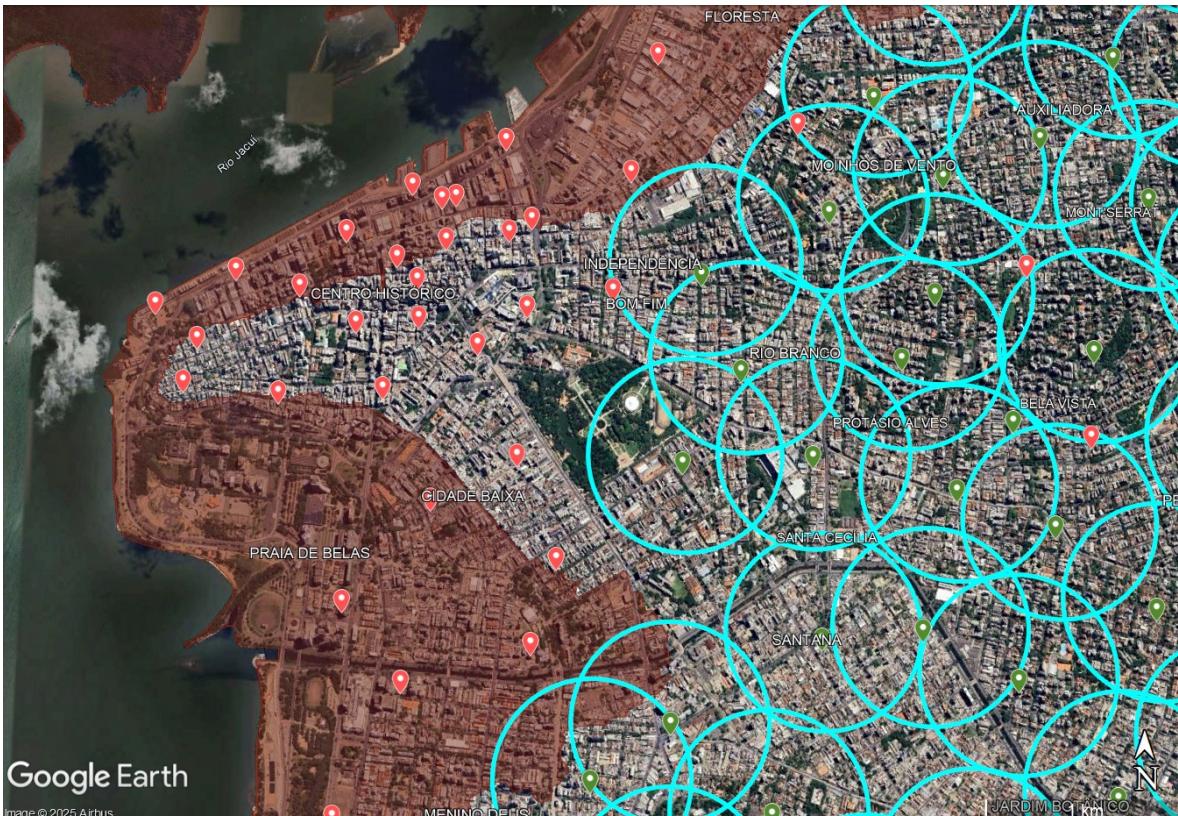
2G (GSM) — Reference Signal Received Power - RSRP (dBm)

- ≥ -75 dBm: Optimal Signal
- 75 to -83 dBm: Regular Signal
- 83 to -102 dBm: Poor or Weak Signal

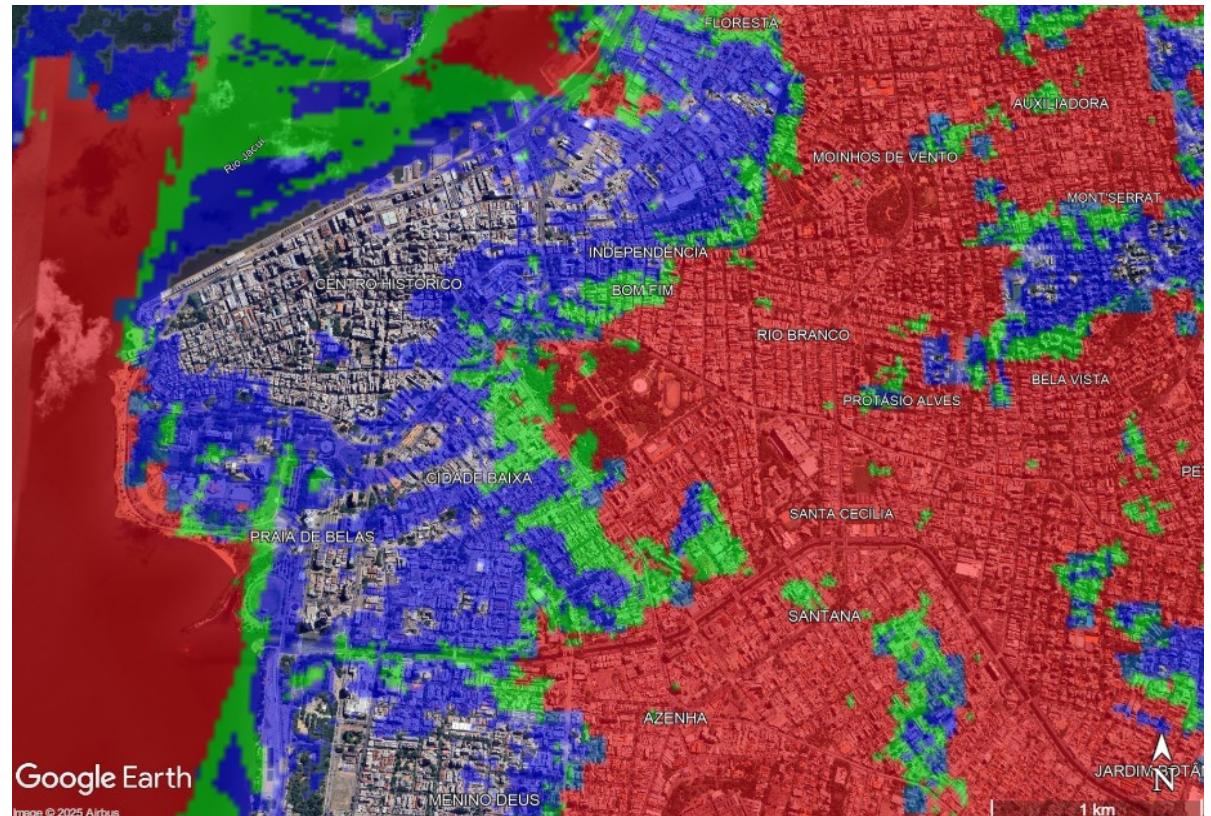
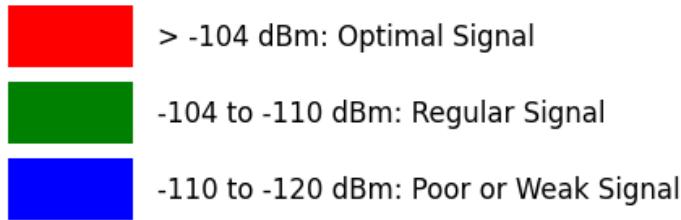


Resultados da Operadora 2

Mapa de Estimativa 5G (esquerda) vs.
Mapa de Predição (direita)



5G (NR) — Reference Signal Received Power - RSRP (dBm)



Resultados da Operadora 2

- Os resultados indicam que a rede **2G manteve melhor cobertura e conectividade básica** do que a rede 5G no cenário analisado, reforçando seu papel como tecnologia de suporte às comunicações **essenciais em situações de emergência**.
- No entanto, essas tecnologias apresentam limitações significativas, incluindo baixa eficiência espectral, altos custos operacionais e compatibilidade limitada com dispositivos modernos.

Considerações Finais

- Essas evidências ressaltam a necessidade de redes móveis mais robustas (5G e futuras 6G), projetadas para operar de forma resiliente em cenários extremos.
- **Uso estratégico de frequências mais baixas (ex.: 700 MHz)** como fator-chave para ampliar a cobertura e garantir a continuidade do serviço durante eventos climáticos severos e recorrentes.

Referências

- MEYER, Daniel; GRANVILLE, Lisandro Zambenedetti; BERTHOLDO, Leandro. Resiliência da Infraestrutura Móvel de Telecomunicação: Estudo de Caso dos Eventos Climáticos na Região Metropolitana de Porto Alegre em Maio de 2024. In: **Escola Regional de Redes de Computadores (ERRC)**. SBC, 2024. p. 1-6. <https://sol.sbc.org.br/index.php/errc/article/view/35426>
- MEYER, Daniel; GRANVILLE, Lisandro Z.; BERTHOLDO, Leandro M. The Role of Legacy Mobile Networks in Infrastructure Resilience: Evidence from the Southern Brazil Flood. arXiv preprint arXiv:2509.08595, 2025. **To appear in IEEE Globecom 2025**. <https://arxiv.org/abs/2509.08595>

Obrigado

Dúvidas?

