

**XIII** Colóquio Brasileiro  
de Ciências  
Geodésicas • 2024

Universidade Federal do Paraná

**25** Anos

*Conectando mentes e  
provendo conhecimento*

# **AVALIAÇÃO DO POSICIONAMENTO POR PONTO SIMPLES COM MAPAS GLOBAIS DA IONOSFERA PREDITOS COM A REDE NEURAL ED-CONVLSTM-ND**

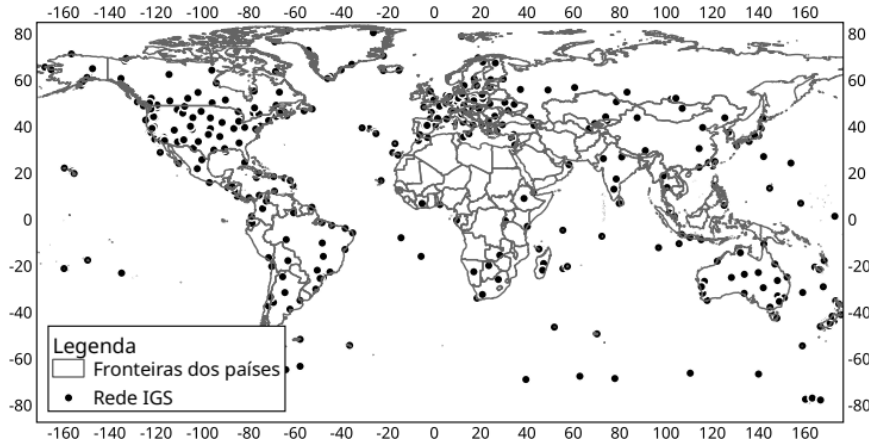
*Maurício Carvalho Mathias de Paulo<sup>1</sup>, Matheus Pinheiro Ferreira<sup>1</sup>, Haroldo Antonio Marques<sup>1</sup>, Raul Queiroz Feitosa<sup>2</sup>, Luiz Cláudio Oliveira de Andrade<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Militar de Engenharia (IME)

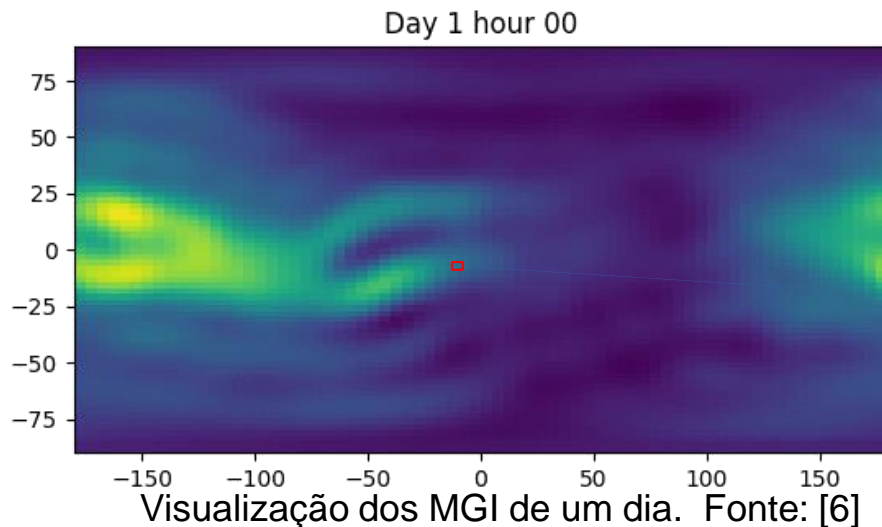
<sup>2</sup> Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

<sup>3</sup> Universidade de las Fuerzas Armadas – Equador (ESPE)

## Previsão de séries de mapas



Distribuição das estações do International GNSS Service (IGS). Fonte: [6]



MGI: Mapas Globais da Ionosfera

MGI do IGS (2022):

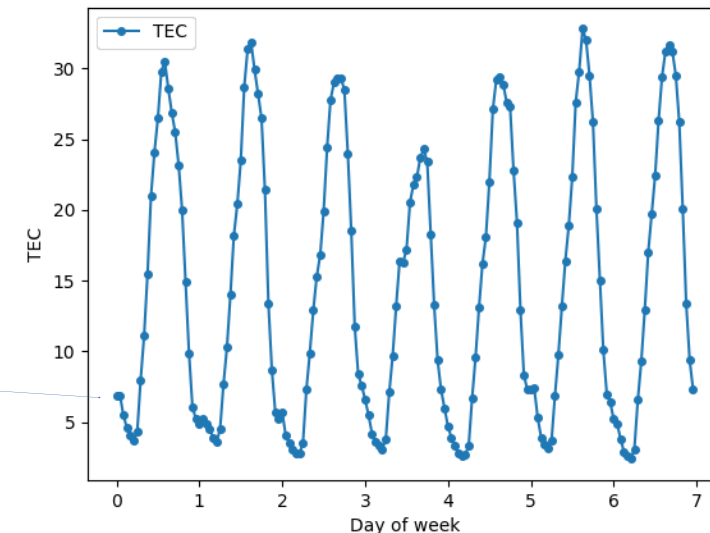
Tempo real: 5-15 min

Rápido: 1-2 dias

Final: 9-16 dias

MGI predito do IGS: 24h/48h à frente

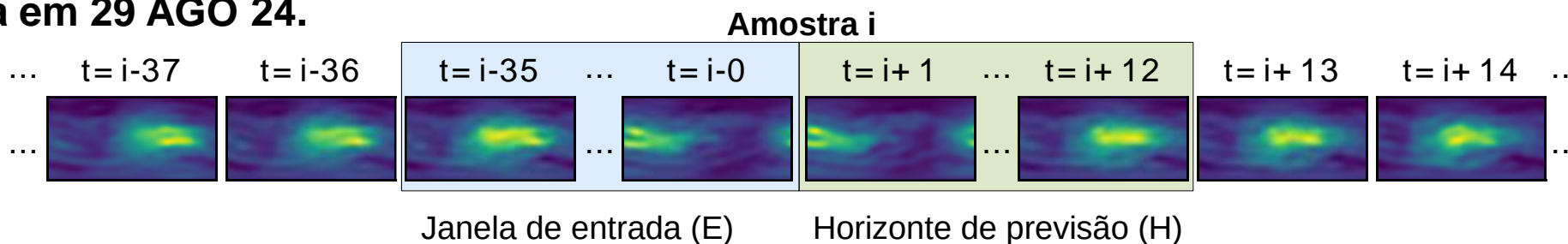
Superar o tempo de processamento



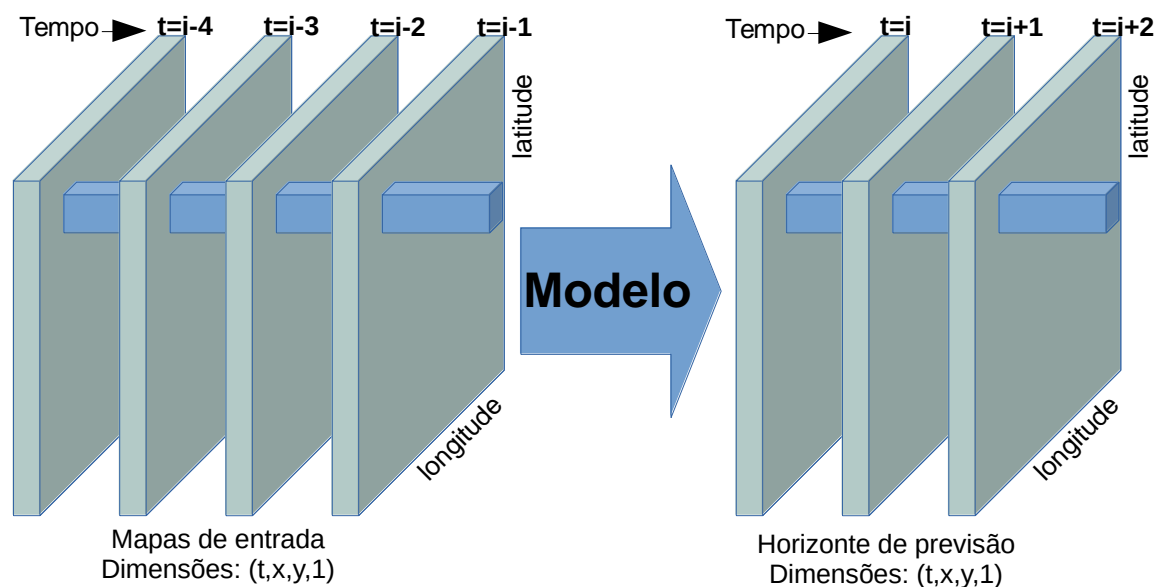
Série temporal do VTEC em um píxel dos MGI ao longo de uma semana. Fonte: [6]

## Previsão de séries de mapas

Tese defendida em 29 AGO 24.



Janela deslizante para previsão de mapas da ionosfera. Fonte: [6]

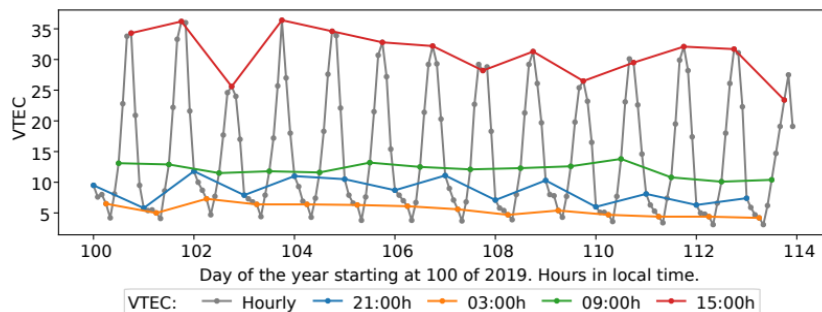


Algumas condições são  
 similares em E e H. Ex.:

- Distância Terra-Sol
- Época do ano
- Época do ciclo solar.

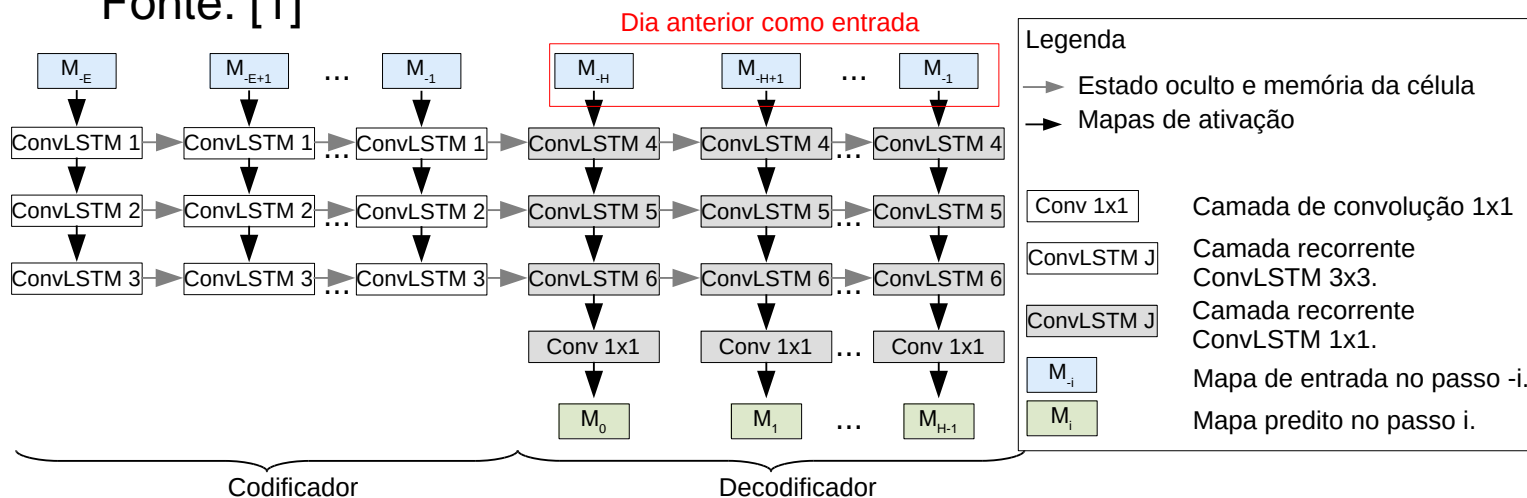
Exemplo de modelo que transforma 4 mapas de entrada em 3 mapas do horizonte de previsão. Fonte: [6]

## Rede neural ED-ConvLSTM-ND



VTEC de um pixel dos MGI ao longo de duas semanas.

Fonte: [1]



Arquitetura da rede neural recorrente ED-ConvLSTM-ND. [6]

**Mas a comparação com o método do IGS foi feita apenas nos valores de VTEC dos MGI.**

# Objetivo

Avaliar a qualidade dos MGI preditos pela rede neural recorrente no espaço do Posicionamento por Ponto Simples (PPS)

# Materiais e métodos

## Processamento PPS

- Posicionamento por ponto simples
  - Séries de posições a cada 15s
    - Consolidadas pela média de cada dia
    - Apenas GPS L1
    - Utilizando uma das abordagens para ionosfera
  - Estações ONRJ, SALU, POAL
- *Software* RTKLIB
  - Automação com *scripts* Python\*
- Observações: RINEX de 2015 da RBMC
  - Para coincidir com o período avaliado em [1]
- Coordenadas de referência obtidas na solução multianual SIRGAS2022
  - IGb14, época 2015.0

Tabela 1 – Abordagens de estimativa da ionosfera testadas no PPS.

Nome	Descrição	Representação
BRDC	Modelo de Klobuchar [2], transmitido pelo sinal GPS.	Equações
CODG	MGI final produzido pelo CODE/IGS. Utilizado como referência.[3]	MGI
C1PG	MGI predito (1 dia à frente) produzido pelo CODE/IGS. [3]	MGI
ED-ConvLSTM-ND	MGI predito produzido com a rede ED-ConvLSTM-ND. [1]	MGI

Fonte: Autor.

BRDC obtidos nos RINEX de navegação da RBMC

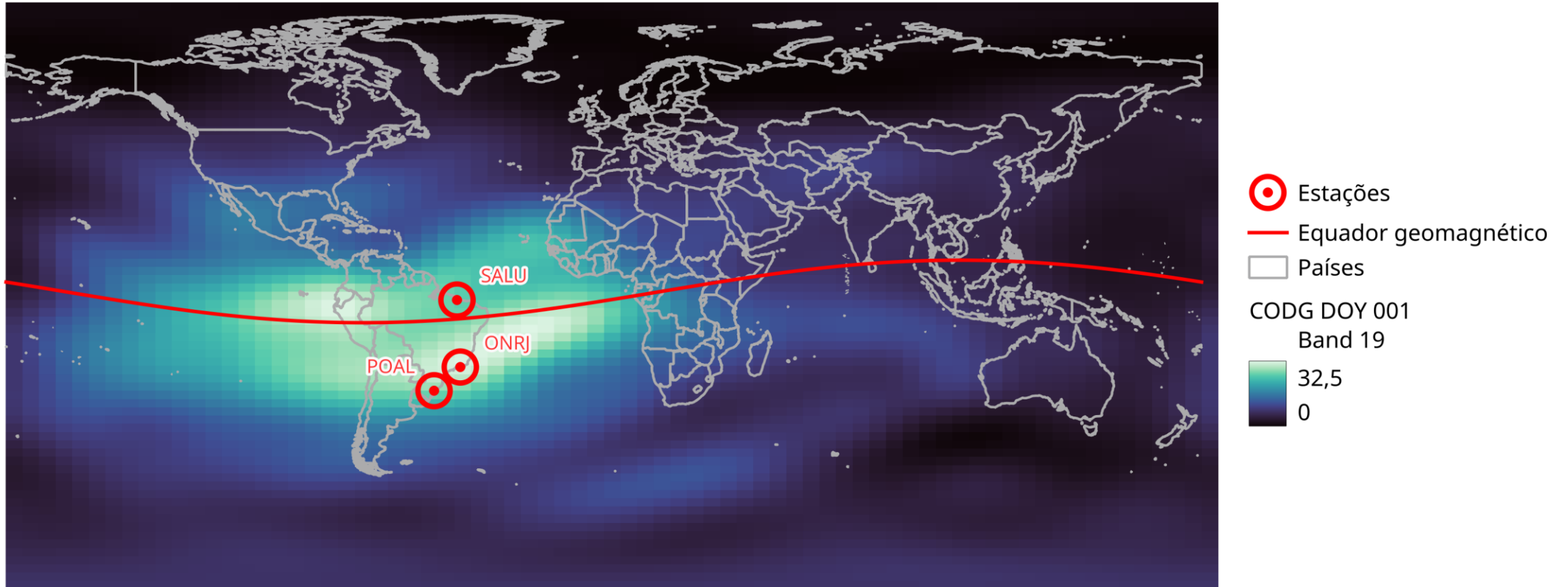
IONEX C1PG e CODG obtidos do IGN-França/IGS

IONEX da ED-ConvLSTM-ND produzidos pelos autores.

\* Scripts disponíveis em  
[https://github.com/mauriciodev/batch\\_ppp](https://github.com/mauriciodev/batch_ppp)

# Materiais e métodos

## Estações utilizadas

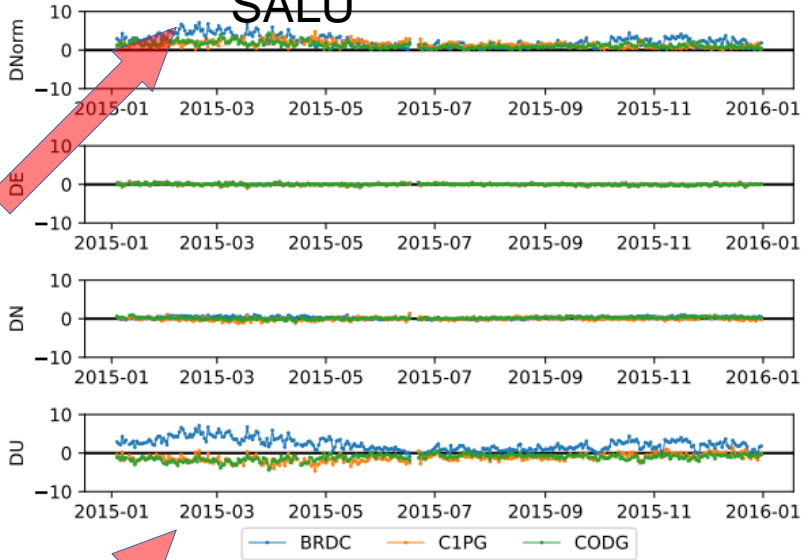


Estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) utilizadas.

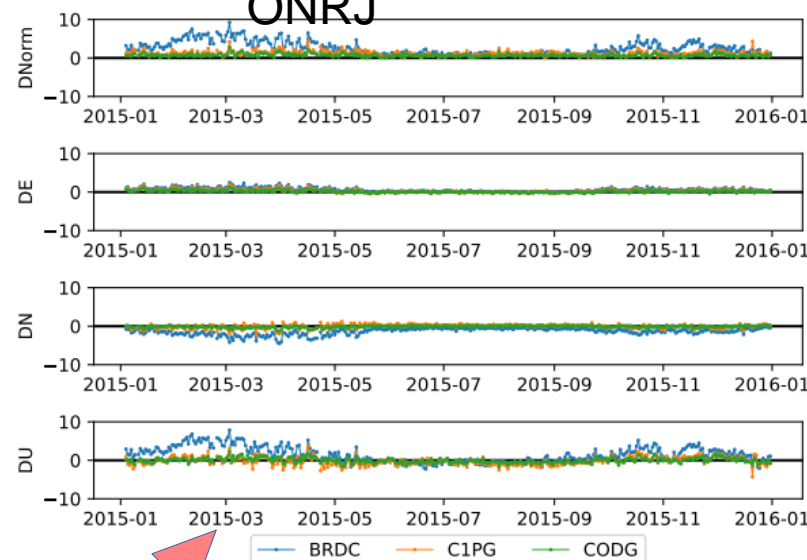
# Resultados e discussão

## Mapas do IGS

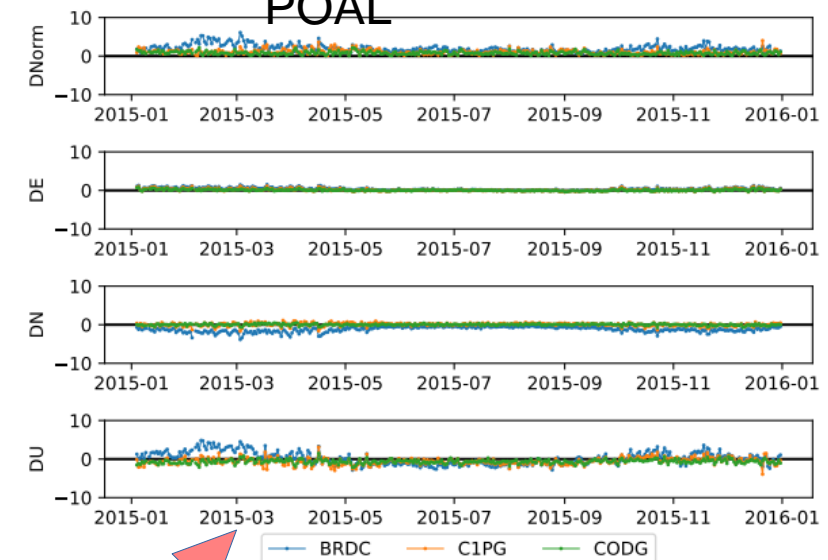
Estação  
SALU



Estação  
ONRJ



Estação  
POAL



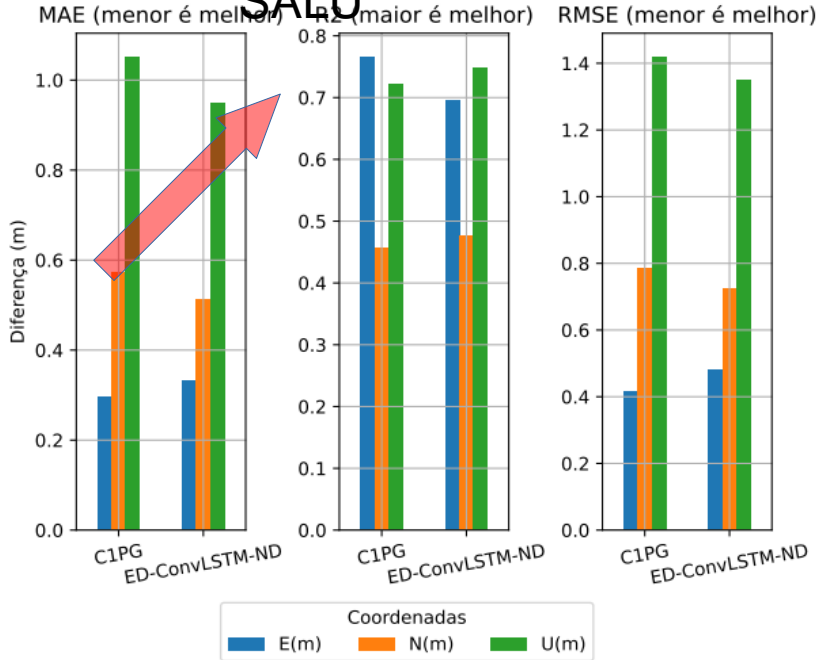
Média das diferenças, no sistema geodésico local, das coordenadas obtidas com PPS com os dados fornecidos pelo IGS: BRDC (modelo de Klobuchar transmitido), C1PG (MGI predito) e CODG (MGI final).



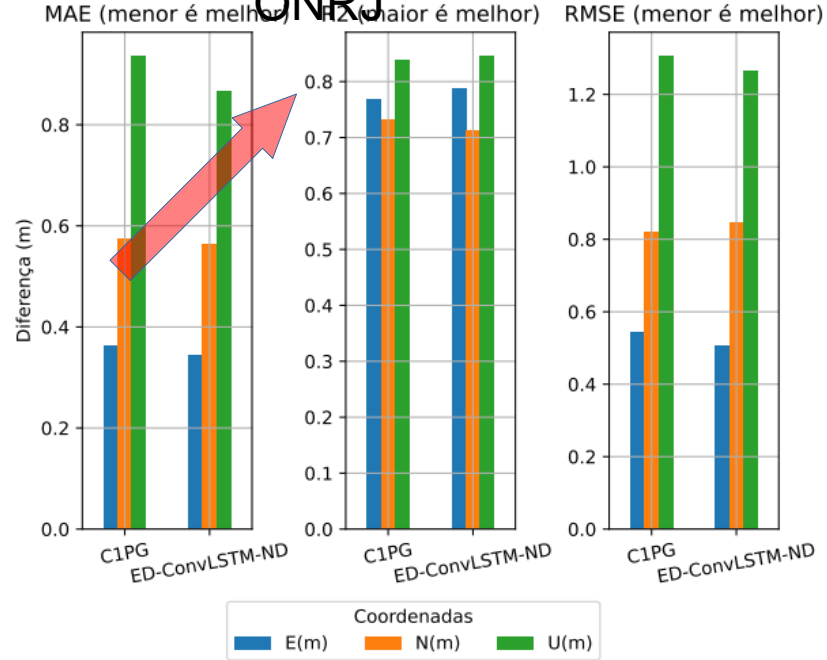
# Resultados e discussão

## Diferenças das coordenadas

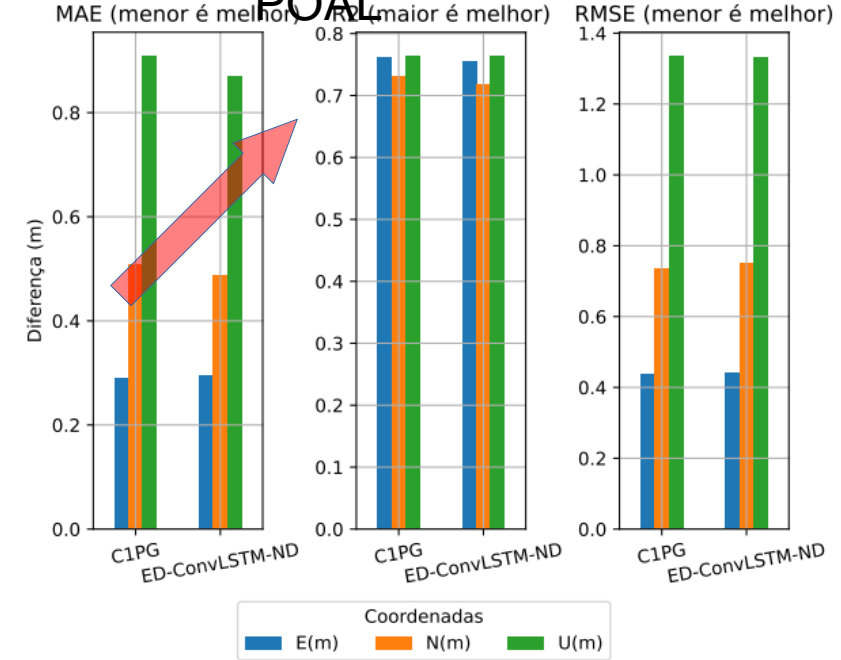
Estação  
**SALU**



Estação  
**ONRJ**



Estação  
**POAL**

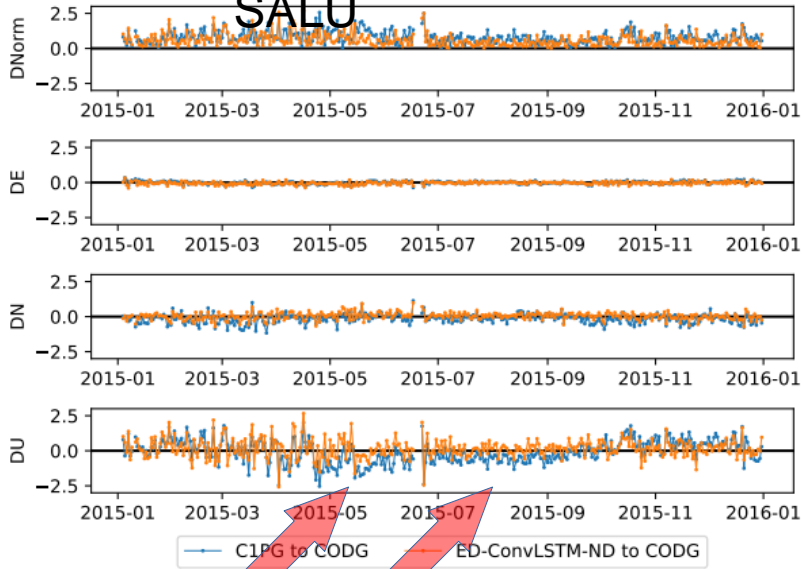


Métricas obtidas pela comparação entre as posições estimadas com o MGI de referência (CODG) e as estimadas com os MGI preditos (diferenças entre E, N e U estimados e esperados). Fonte: autor

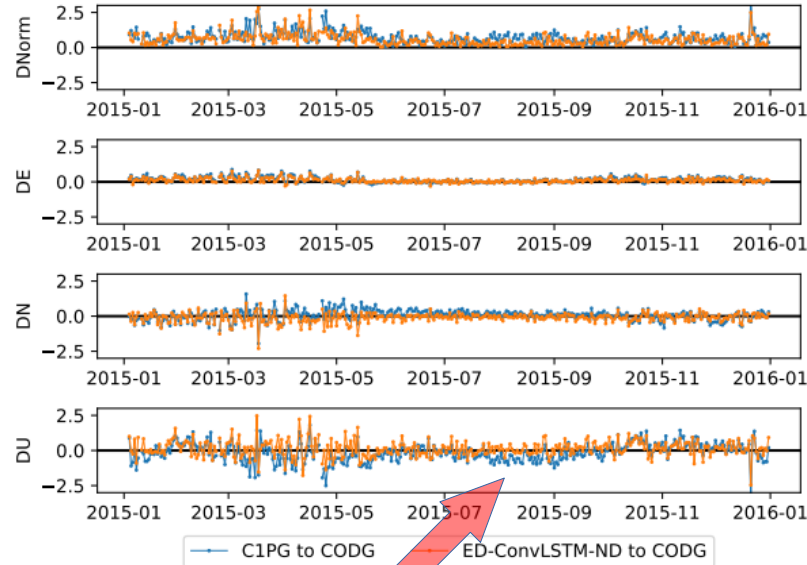
# Resultados e discussão

## Comparação com o MGI do CODE

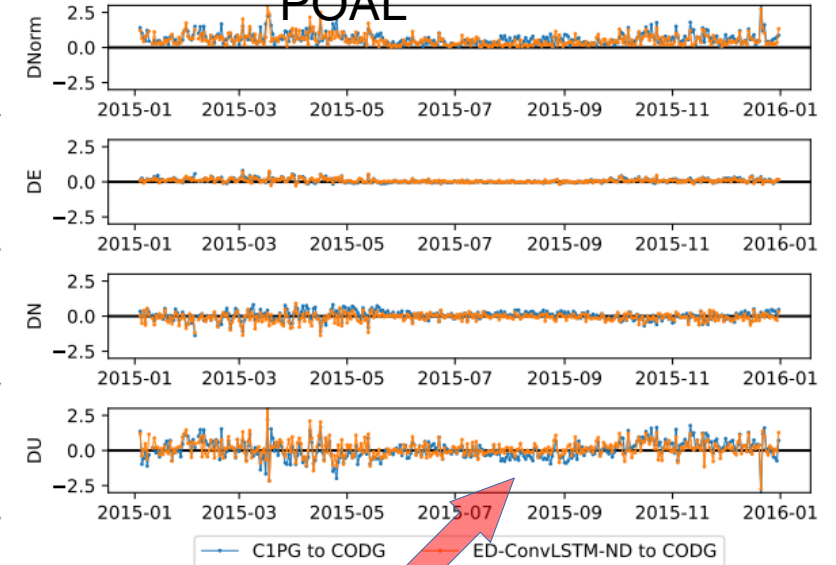
Estação  
**SALU**



Estação



Estação  
**POAL**



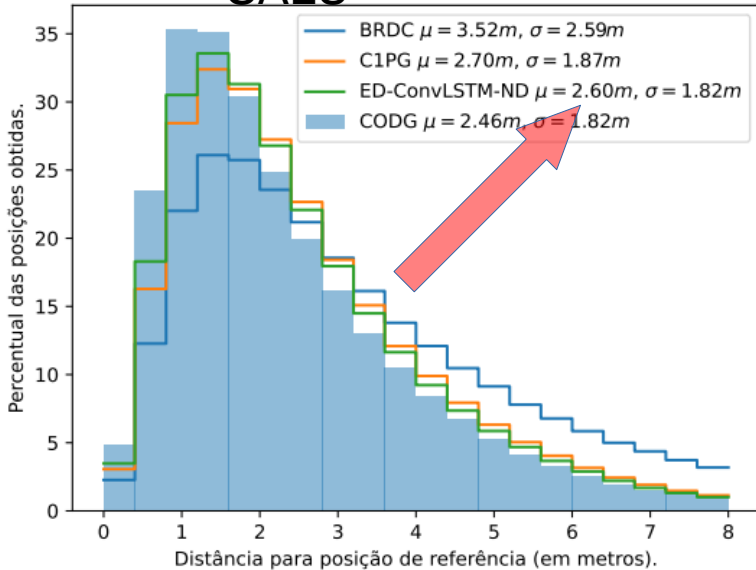
Média das diferenças entre as coordenadas obtidas com CODG (MGI final) e as obtidas com os modelos de previsão: C1PG (MGI predito) e ED-ConvLSTM-ND. Fonte: Autor

# Resultados e Discussão

## Histograma dos erros

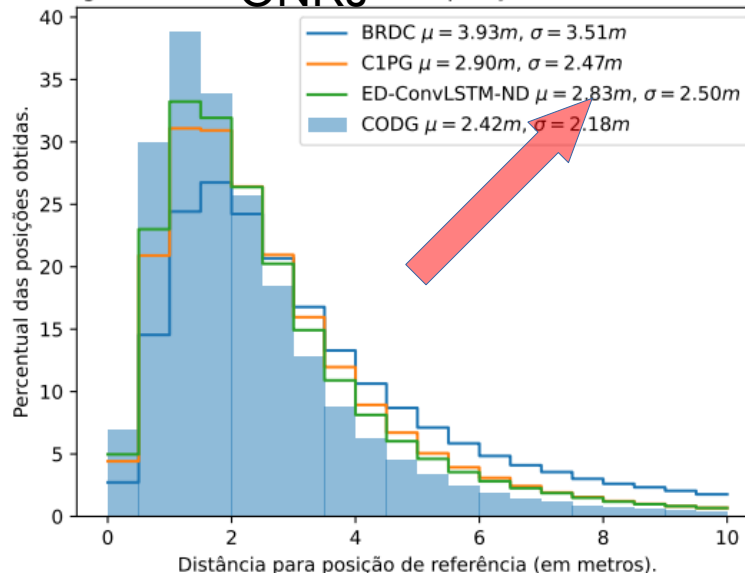
Estação  
**GALU**

Histogramas das distâncias entre as posições obtidas e a referência.



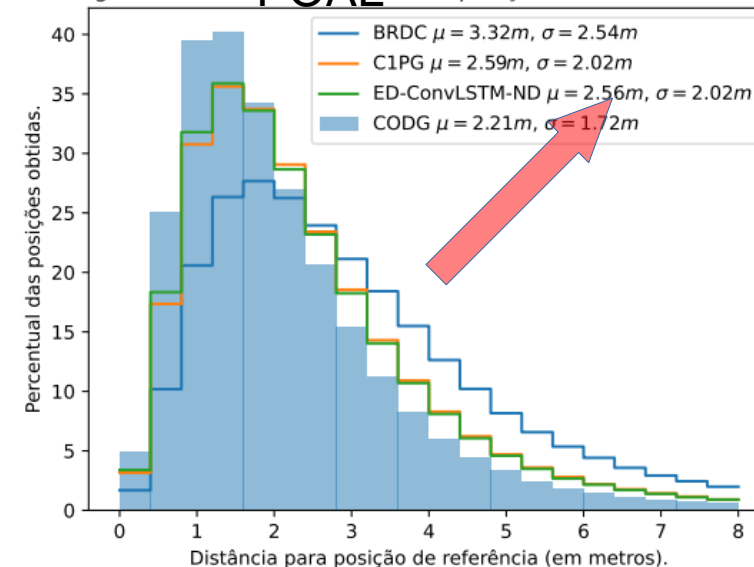
Estação  
**ONRJ**

Histogramas das distâncias entre as posições obtidas e a referência.



Estação  
**POAL**

Histogramas das distâncias entre as posições obtidas e a referência.



Histograma das diferenças 3D entre as posições estimadas com cada abordagem de modelagem da ionosfera e a coordenada de referência da estação. Fonte: Autor

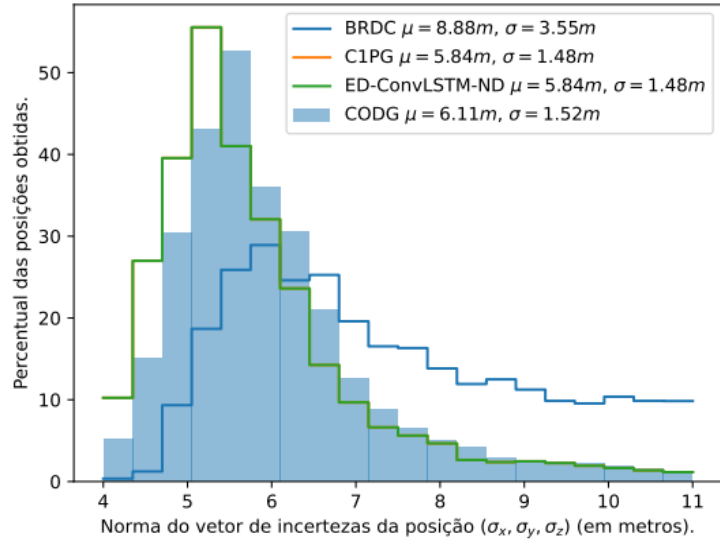
Diferenças das médias do C1PG e da rede ED-ConvLSTM-ND de 10cm, 7cm e 3cm

# Resultados e Discussão

## Incertezas do posicionamento

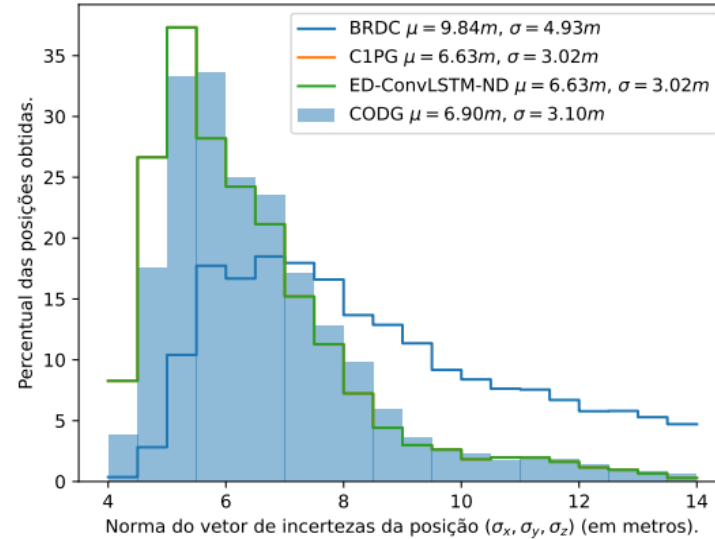
Estação

Histogramas das normas dos vetores de incertezas da posição ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ).



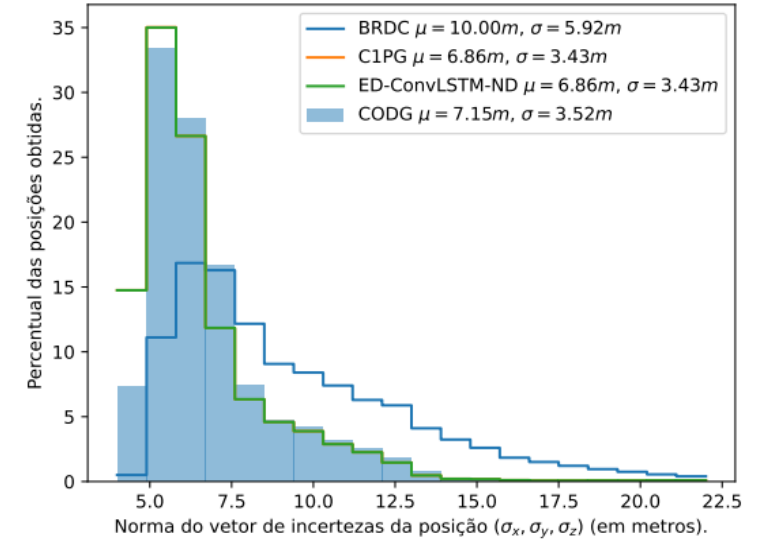
Estação

Histogramas das normas dos vetores de incertezas da posição ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ).



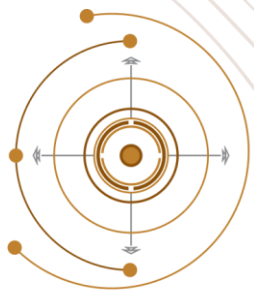
Estação

Histogramas das normas dos vetores de incertezas da posição ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ).



Histograma das normas dos vetores de incertezas das posições, calculados no posicionamento. Fonte: O autor

- Foram avaliadas diferentes abordagens de modelagens de efeitos ionosféricos no PPS com uma frequência;
- Foram utilizadas observações de um ano de três estações da RBMC;
- Em geral, os mapas preditos com a rede ED-ConvLSTM-ND obtiveram posições com maiores diferenças à posição de referência que as do mapa finalizado do IGS (CODG), mas menores que o mapa predito pelo IGS na época (C1PG);
- As incertezas das posições obtidas com os mapas preditos estão sendo subestimadas pelo RTKLIB, por falta das informações sobre as incertezas dos valores de VTEC nos IONEX.
- Trabalhos futuros podem abordar modelos de propagação de incertezas das redes neurais utilizadas na previsão [5], permitindo a inclusão, no IONEX, também das estimativas de incerteza dos mapas.



# XIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas • 2024

Universidade Federal do Paraná

# 25 Anos

*Conectando mentes e  
provendo conhecimento*

## AGRADECIMENTOS

- Programa de pósgraduação em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia;
- Universidade de las Fuerzas Armadas – Equador (ESPE);
- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo;
- International GNSS Service (IGS) e Center for Orbit Determination in Europe (CODE);
- National Aeronautics and Space Administration (NASA);
- Institut national de l'information géographique et forestière (IGN-France).

## REALIZAÇÃO



Curitiba, 26 a 29 de novembro de 2024

- [1] PAULO, Maurício Carvalho Mathias de; MARQUES, Haroldo Antonio; FEITOSA, Raul Queiroz; FERREIRA, Matheus Pinheiro. New encoder–decoder convolutional LSTM neural network architectures for next-day global ionosphere maps forecast. **GPS Solutions**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 95, 1 abr. 2023. ISSN 1521-1886. DOI 10.1007/s10291-023-01442-4.
- [2] KLOBUCHAR, John A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, [s. l.], AES-23, n. 3, p. 325–331, may 1987. ISSN 1557-9603. DOI 10.1109/TAES.1987.310829.
- [3] HERNÁNDEZ-PAJARES, M. et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. **Journal of Geodesy**, [s. l.], v. 83, n. 3, p. 263–275, 1 mar. 2009. ISSN 1432-1394. DOI 10.1007/s00190-008-0266-1.
- [4] EVERETT, Tim; TAYLOR, Trey; LEE, Dong-Kyeong; AKOS, Dennis M. Optimizing the use of RTKLIB for smartphone-based GNSS measurements. **Sensors**, [s. l.], v. 22, n. 10, p. 3825, 2022. ISBN 1424-8220.
- [5] WEISS, Michael; TONELLA, Paolo. Uncertainty quantification for deep neural networks: An empirical comparison and usage guidelines. **Software Testing, Verification and Reliability**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. e1840, 2023. ISSN 1099-1689. DOI 10.1002/stvr.1840.
- [6] PAULO, Maurício Carvalho Mathias de. Aprendizado profundo aplicado à previsão dos efeitos da ionosfera para o posicionamento GNSS em tempo real. 2024. 136 p. Tese – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 29 set. 2024.