



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



# NEURION: SISTEMA PARA PRODUÇÃO DE MAPAS DE VTEC REGIONAIS PREDITOS COM REDES NEURAS ARTIFICIAIS

JOSÉ ROBERTO DE ABREU JUNIOR<sup>1</sup>, WAGNER CARRUPT MACHADO<sup>2</sup>

## RESUMO

A ionosfera é a principal fonte de degradação do posicionamento com GNSS. O atraso ionosférico é proporcional à densidade de elétrons livres presente no percurso do sinal e inversamente proporcional à sua frequência. A densidade de elétrons é quantificada pelo conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*). Desde 1998, o serviço interacional do GNSS (IGS – *International GNSS Service*) tem produzido mapas de TEC na direção vertical (VTEC) com abrangência global, denominados de GIM (*Global Ionosphere Map*). Porém, tais mapas são disponibilizados com uma determinada latência e não podem ser usados em tempo-real. Este trabalho visa apresentar o sistema computacional desenvolvido na UFU para produzir mapas de VTEC regionais preditos com redes neurais artificiais a partir dos GIM disponibilizados pelo IGS.

**Palavras-chave:** GNSS. Ionosfera. Redes neurais artificiais.

## 1 INTRODUÇÃO

A ionosfera é a fonte de degradação do posicionamento GNSS mais severa, sendo responsável por mais de 80% dos erros (LANGLEY, TEUNISSEN e MONTEMBRUCK, 2017). O sinal GNSS sofre refração ao se propagar pela ionosfera e isso causa um atraso na sua recepção pelo receptor, o qual é proporcional à densidade de elétrons livres e inversamente proporcional à frequência do sinal.

A densidade de elétrons é quantificada pelo conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*), que pode ser entendido como o conteúdo de elétrons livres contido em um cilindro com área de seção transversal igual a 1 m<sup>2</sup> que se estende ao longo da trajetória do sinal pela ionosfera (LANGLEY, TEUNISSEN e MONTEMBRUCK, 2017).

O TEC pode ser estimado a partir dos sinais GNSS observados por uma rede de receptores GNSS de alto desempenho utilizando a combinação linear livre da geometria. Além do TEC, este modelo matemático possui os atrasos interfrequência diferenciais (DCB – *Differential Code Biases*) dos satélites e dos receptores como incógnitas. Além disso, é comum a utilização de uma função de mapeamento visando a determinação do TEC na

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, [eng.jrobertoabreu@gmail.com](mailto:eng.jrobertoabreu@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia, [wagnercarrupt@ufu.br](mailto:wagnercarrupt@ufu.br)



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



direção vertical, denominado como VTEC (CAMARGO, 1999; SCHAER, 1999).

Desde 1998, o serviço internacional do GNSS (IGS – *International GNSS Service*) estabeleceu uma rotina de produção e disponibilização de mapas de VTEC com abrangência global, denominados de mapas de ionosfera globais (GIM – *Global Ionosphere Maps*) (IGS, 2021).

Matsuoka e Camargo (2007) e Armendaris, Matsuoka e Camargo (2009) mostram que os GIM disponibilizados pelo IGS podem reduzir em mais de 70% o erro na componente altimétrica. Porém, os GIM do IGS ficam disponíveis com pelo menos 24 horas de atraso e não permitem a realização de posicionamento em tempo real. Portanto, o desenvolvimento de modelos de previsão do VTEC é de essencial interesse para os usuários do GNSS.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o sistema Neurion. Trata-se de um sistema computacional modular que visa a produção de mapas regionais de VTEC preditos com redes neurais artificiais (RNA) a partir do GIM disponibilizado pelo IGS.

## 2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

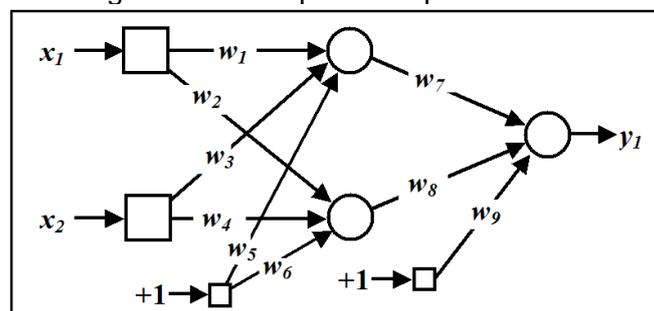
Redes neurais artificiais são sistemas inspirados nas estruturas de armazenamento e processamento do sistema nervoso biológico visando armazenar e disponibilizar conhecimento experimental. Elas são compostas por uma determinada quantidade de entradas e unidades de processamento, denominados de neurônios, os quais são ligados por meio de pesos sinápticos (HAYKIN, 1999).

As entradas são propagadas através da topologia da RNA, sendo transformadas pelos pesos sinápticos, *biases* e pela função de ativação dos neurônios. Os dois primeiros se constituem nos parâmetros incógnitos. O processo de estimação de tais parâmetros é conhecido como treinamento e se constitui de um processo iterativo onde parâmetros iniciais são atualizados até a convergência do processo. Os neurônios possuem uma função de ativação visando transformar a somatória das entradas que chegam nele em estado de ativação (HAYKIN, 1999).

### 2.1 Percéptrons de múltiplas camadas (MLP)

Na arquitetura de RNA denominada percéptrons de múltiplas camadas (MLP- *MultiLayer Preceptons*), o fluxo da informação é unidirecional, onde as entradas são propagadas da camada de entrada para a camada de saída, passando por uma ou mais camadas ocultas (HAYKIN, 1999). A figura 1 mostra um exemplo desta arquitetura com duas entradas, uma camada oculta contendo dois neurônios e uma camada de saída constituída por apenas um neurônio, onde os símbolos  $w_i$  ( $i = 1, 9$ ) representam os pesos sinápticos e *biases*. Os *biases* são os pesos sinápticos ligados às entradas com valores constantes, neste caso, iguais a 1.

Figura 1 – Exemplo da arquitetura MLP



Fonte – Machado e Fonseca Jr (2013)

Cybenko (1989) mostra que uma MLP com apenas uma camada oculta é capaz de aproximar qualquer função contínua dentro de uma precisão pré-estabelecida, desde que a camada oculta possua quantidade adequada de neurônios.

A quantidade de neurônios ocultos ideal é aquela que possui o menor número de neurônios ocultos sem que a capacidade da RNA de calcular a quantidade de interesse corretamente a partir de entradas que não foram utilizadas durante o treinamento seja comprometida. A correlação-cruzada é uma ferramenta que pode ser utilizada na determinação da quantidade de neurônios ocultos ideal. Neste caso, uma parte dos dados de treinamento é separada para se realizar uma avaliação da solução. Treina-se RNA com quantidade de neurônios diferentes e se selecionada a que produz o melhor resultado com os dados de avaliação (STONE, 1978).

O treinamento da MLP requer a disponibilidade de um conjunto de dados contendo entradas e saídas conhecidas (amostras). O objetivo do método de treinamento é minimizar uma função de custo calculada em função da diferença entre a saída calculada pela MLP e a saída correspondente do conjunto de dados de treinamento (HAYKIN, 1999). Após o treinamento, os parâmetros da MLP são fixos e a quantidade de interesse pode ser calculada a partir de novas entradas.



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



### 3 MAPAS DE IONOSFERA

Uma aproximação muito usada para se estimar o TEC com dados GNSS considera que ele esteja totalmente contido no ponto de intersecção do sinal com uma camada infinitesimalmente fina localizada a uma determinada altitude, denominada de camada ionosférica. Este ponto de intersecção é denominado de ponto ionosférico (IPP – *Ionospheric Piercing Point*) (CAMARGO, 1999, SCHAER, 1999).

Os produtos ionosféricos são comumente disponibilizados em formato de mapas, os quais são estruturados em um conjunto de grades de VTEC com intervalos e amplitude longitudinal e latitudinal pré-determinados. Schaer e Güntner (1998) propuseram um formato padrão para disponibilização de produtos ionosféricos, denominado de IONEX (*Ionosphere map Exchange*). Este formato possui um cabeçalho com informações sobre a produção dos mapas, uma seção com os mapas de VTEC e uma seção com a acurácia dos VTEC.

OS GIM disponibilizados pelo IGS são constituídos de 13 grades regulares de valores de VTEC, com intervalo de 2 horas entre as grades, variando de  $-180^\circ$  à  $180^\circ$  em longitude, com intervalo de  $5^\circ$ , e de  $-87,5^\circ$  à  $87,5^\circ$  em latitude, com intervalo de  $2,5^\circ$ . Os VTEC são estimados a partir de dados de GNSS de duas frequências da rede global do IGS. Os arquivos são disponibilizados em formato IONEX.

As grades de VTEC são estabelecidas imaginariamente ao longo da camada ionosférica. No caso do GIM do IGS, a camada ionosférica está localizada a 450 km de altura, na qual todos seus vértices contém um valor de VTEC. O IGS disponibiliza dois tipos de GIM: o rápido, com latência menor que 24 horas; e final, com 11 dias de latência (IGS, 2021).

Estes GIM são resultantes da combinação da solução de quatro centros de processamento: o CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), a ESA (*European Space Agency*), o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e o UPC (*Polytechnic University of Catalonia*) (MACHADO, 2012).

### 4 NEURION

O Neurion é um sistema computacional desenvolvido para a produção de mapas de ionosfera preditos com RNA para a região brasileira em formato IONEX. Ele é composto por três módulos principais escritos em Fortran. A execução dos módulos é controlada por meio de um script principal, no qual se informa a data inicial e final da produção dos mapas de ionosfera. A seguir, a função de cada módulo será descrita.



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

*“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”*

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021

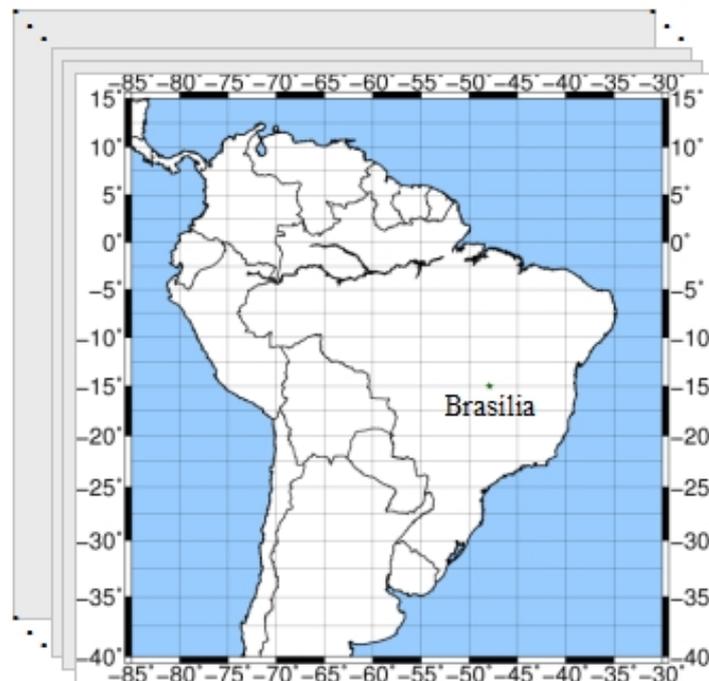


### 4.1 IONEX2RNA

Este módulo tem como objetivo ler as informações dos arquivos GIM disponibilizados pelo IGS e prepará-los para o treinamento das RNA. Ele recebe a data de início da previsão do script principal, lê os arquivos GIM de três dias anteriores e realiza a normalização das informações utilizadas como entrada no treinamento e avaliação da RNA.

As entradas são delimitadas entre as latitudes  $+15^\circ$  e  $-40^\circ$  e as longitudes  $-30^\circ$  e  $-85^\circ$ , resultando em 39 grades com 276 vértices cada uma (10.764 amostras). A figura 2 ilustra a grade de VTEC utilizada no treinamento das RNA.

Figura 2 - Grade de VTEC do modelo



Fonte: Machado e Fonseca Jr (2013)

O modelo de RNA utilizado na previsão é o desenvolvido por Machado e Fonseca Jr (2013). Este modelo usa a arquitetura MLP com uma única camada de 16 neurônios ocultos, cujos dados de entrada são a latitude e longitude dos IPP e o horário (TU), enquanto que a saída é o VTEC, conforme mostra a figura 3.

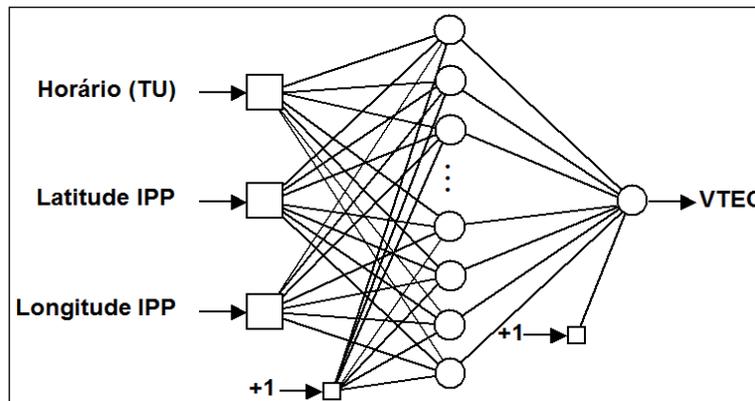
Figura 3 – Modelo da RNA



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



Fonte: Machado e Fonseca Jr (2013)

A normalização dos dados de entrada é feita da seguinte forma:

$$X_{inp} = \frac{X_{inp} - \overline{X_{inp}}}{\sigma_{X_{inp}}} \quad (1)$$

onde  $\overline{X_{inp}}$  e  $\sigma_{X_{inp}}$  são a média e o desvio-padrão dos valores de entrada da RNA.

A função de ativação dos neurônios ocultos é do tipo sigmoidal antissimétrica, a qual é adequada para aplicações não lineares. O neurônio da camada de saída tem função de ativação linear, o que evita a saturação do neurônio de saída, bem como de ser necessário aplicar alguma mudança de escala. Isso, possibilita que os resultados possam ser utilizados diretamente e acelera a convergência do processo de treinamento.

No final do processo, os dados de treinamento e avaliação da RNA, bem como o arquivo contendo os fatores de normalização das entradas da RNA são armazenados.

### 4.2 NBN\_Ion

A função deste módulo é receber os dados de entrada resultantes do módulo IONEX2RNA e realizar o treinamento da RNA por meio do método Levenberg Marquardt sem retropropagação (WILAMOWISKI e YU, 2010).

Considera-se que o treinamento da RNA tenha convergido quando a raiz do erro médio quadrático (RMS – Root Mean Square) da diferença entre o VTEC calculado com RNA e o VTEC contido no GIM atinge seu valor mínimo. No início do processo de produção dos mapas de ionosfera preditos, os valores iniciais dos parâmetros foram definidos como sendo os valores aleatórios entre 1 e -1. Para os demais dias, utilizou-se os parâmetros determinados no treinamento anterior. Com esta prática verificou-se que há uma aceleração no processo de convergência do treinamento, conforme pode ser visto na figura 4.



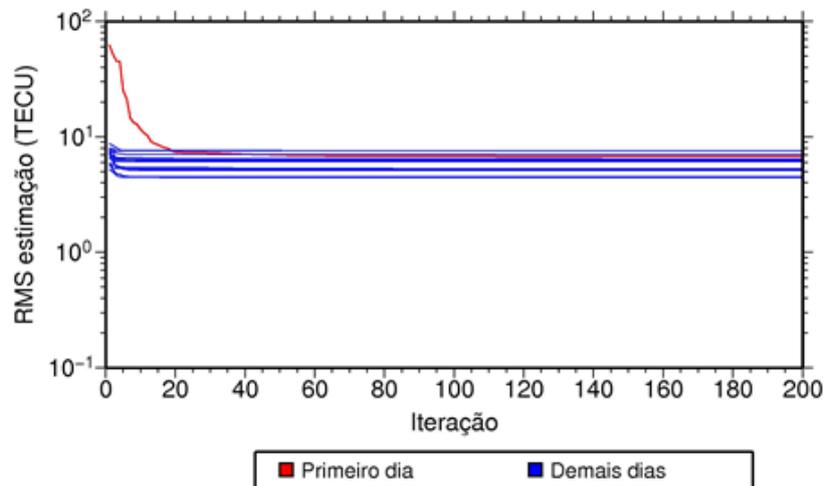
## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



Figura 4 – Comportamento do RMS do conjunto de estimação



Fonte: Adaptado de Machado (2012)

Após o treinamento da RNA, os parâmetros calculados são armazenados.

### 4.3 RNA2IONEX

O último módulo tem a função de ler os fatores de normalização determinados no primeiro módulo e os pesos sinápticos estimados no segundo módulo, executar a RNA para calcular os valores de VTEC preditos em suas respectivas posições e épocas e escrever os mapas de ionosfera preditos no formato IONEX. Diferentemente dos GIM do IGS, os mapas de ionosfera preditos são escritos com intervalo de uma hora, totalizando 25 mapas por dia.

Ao final do processamento de cada dia, três arquivos IONEX são gerados, contendo a previsão para 1 dia (RNA\_1), previsão para dois dias (RNA\_2) e previsão para três dias (RNA\_3). A figura 5 mostra o fluxograma detalhado do processo de produção dos mapas de ionosfera pelo Neurion.

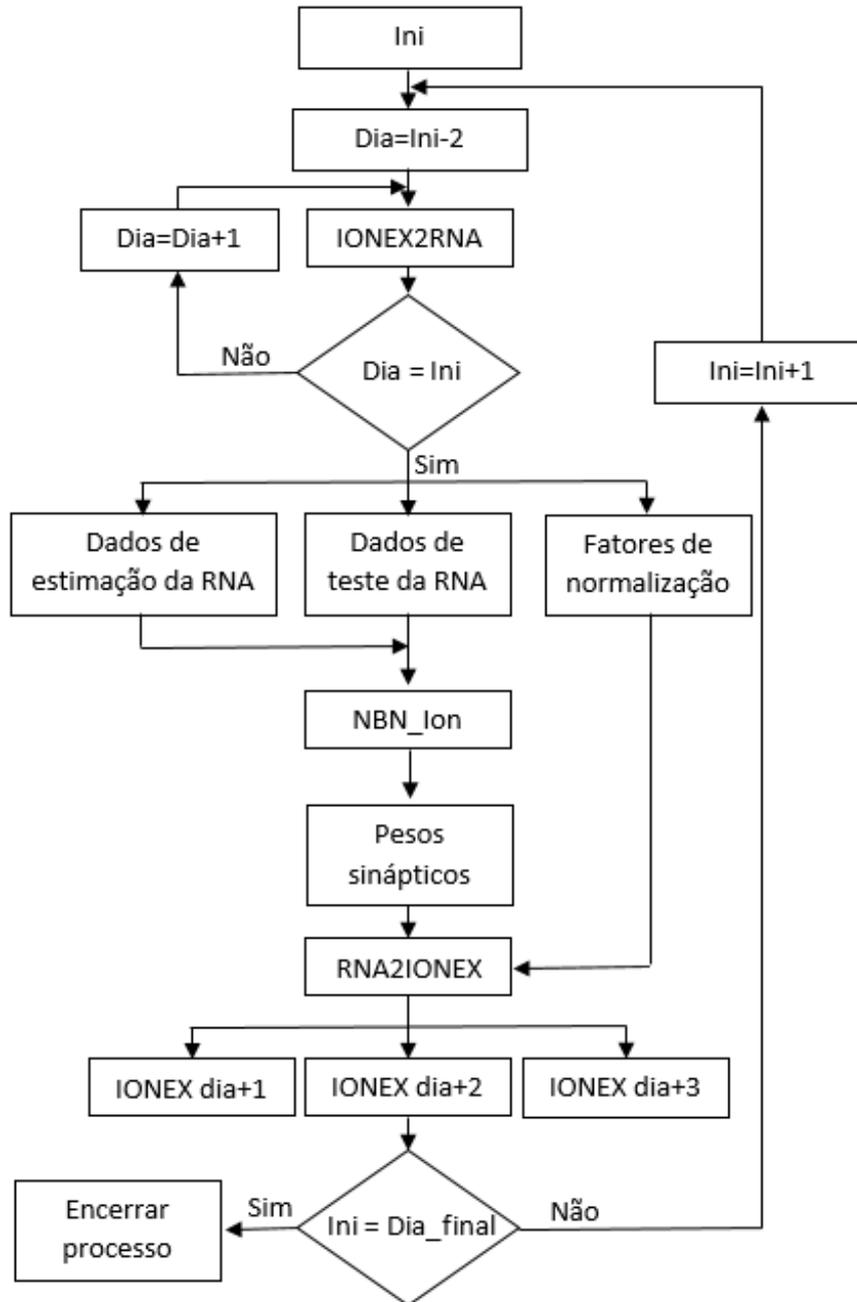
Figura 5 - Fluxograma do Neurion



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



Fonte: Os autores (2021)

A seguir, um exemplo dos mapas de ionosfera gerados é apresentado, mostrando o cabeçalho e um trecho dos mapas de ionosfera.



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

*“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”*

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



```

1.0          IONOSPHERE MAPS      MIX          IONEX VERSION / TYPE
NeurIon     UFU                    12-FEB-2021 06:48  PGM / RUN BY / DATE
UFU - REGIONAL IONOSPHERE MAPS - BRAZIL      COMMENT
Regional Ionosphere Maps for Brazil generated by VTEC  DESCRIPTION
prediction using artificial neural networks from IGS GIM  DESCRIPTION
The VTEC is predicted at 450 km high using the ionospheric  DESCRIPTION
piercing point coordinates and Universal Time  DESCRIPTION
Contact address (e-mail): wagnercarrupt@ufu.br  DESCRIPTION
2014      1      4      0      0      0      EPOCH OF FIRST MAP
2014      1      5      0      0      0      EPOCH OF LAST MAP
3600                                           INTERVAL
25                                           # OF MAPS IN FILE
COSZ                                           MAPPING FUNCTION
20.0                                           ELEVATION CUTOFF
Predicted VTEC with ANN  OBSERVABLES USED
6371.0  BASE RADIUS
2      MAP DIMENSION
450.0 450.0  0.0  HGT1 / HGT2 / DHGT
15.0 -40.0 -2.5  LAT1 / LAT2 / DLAT
-85.0 -30.0  5.0  LON1 / LON2 / DLON
-1      EXPONENT
PROJECT   : REGIONAL IONOSPHERIC MAP PRODUCTION FROM  COMMENT
          : VTEC PREDICTION USING ARTIFICIAL NEURAL  COMMENT
          : NETWORKS  COMMENT
SPONSERS  : UFU/CNPq  COMMENT
TEC/RMS values in 0.1 TECU; 9999, if no value available  COMMENT
DIFFERENTIAL CODE BIASES  START OF AUX DATA
DIFFERENTIAL CODE BIASES  END OF AUX DATA
          :  END OF HEADER
          :  START OF TEC MAP
          :  EPOCH OF CURRENT MAP
2014      1      4      0      0      0      LAT/LON1/LON2/DLON/H
15.0 -85.0 -30.0  5.0 450.0
219 237 257 279 304 332 359 383 400 406 399 381
12.5 -85.0 -30.0  5.0 450.0  LAT/LON1/LON2/DLON/H
270 294 323 353 384 412 432 442 440 425 400 367
10.0 -85.0 -30.0  5.0 450.0  LAT/LON1/LON2/DLON/H
340 373 407 437 461 475 477 466 444 413 377 340
7.5 -85.0 -30.0  5.0 450.0  LAT/LON1/LON2/DLON/H
428 461 487 504 510 503 486 458 424 386 348 314
5.0 -85.0 -30.0  5.0 450.0  LAT/LON1/LON2/DLON/H
511 530 539 537 524 500 469 432 393 356 324 298

```

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o sistema computacional para produção de mapas de ionosfera preditos com RNA para a região do Brasil, denominado de Neurion, o qual utiliza informações pretéritas dos GIM disponibilizados pelo IGS como fonte de informação.

O sistema está operacional e é capaz de gerar mapas de ionosfera preditos por até três dias continuamente, sendo um dos objetivos para trabalhos futuros avaliar a qualidade dos mapas no posicionamento por ponto simples. Também se vislumbra a possibilidade da



## II Simpósio Regional de Agrimensura e Cartografia

*“Ampliando os horizontes e discutindo o futuro da geoinformação e do cadastro territorial do Brasil”*

Universidade Federal de Uberlândia – UFU / Campus Monte Carmelo  
22 a 24 de novembro de 2021



implementação de um serviço eletrônico para disponibilizar os mapas preditos para toda a comunidade.

### REFERÊNCIAS

ARMENDARIS, O. C.; MATSUOKA, M. T.; CAMARGO P. O. Desempenho do modelo global da ionosfera do IGS: avaliação no posicionamento por ponto na região sul do Brasil em período de alta atividade solar. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 2, p. 208-223, 2009.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191 p. Tese (Doutorado) Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

CYBENKO, G. Approximations by superpositions of sigmoidal functions. **Math. Control Signal Systems**, v. 2, p. 303-314, 1989.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 1999. 900 p.

IGS. **Products**. Disponível em: [https://igs.org/products/#ionospheric\\_products](https://igs.org/products/#ionospheric_products). Acesso em: 15 set. 2021.

LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. Introduction to GNSS. In: TEUNISSEN, P. G. J.; MONTENBRUCK, O. **Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Ed. Springer, p. 1-24, 2017.

MACHADO, W. C. Utilização de redes neurais artificiais na previsão do VTEC visando a geração de estações de referência virtuais em tempo-real. 2012. 184p. Tese (Doutorado) Engenharia de Transporte - EPUSP, São Paulo, 2012.

MACHADO, W. C.; FONSECA Jr, E. S. Redes neurais artificiais aplicadas na previsão do VTEC no Brasil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, p. 227-246, 2013.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando os mapas globais do TEC do IGS. Avaliação no posicionamento por ponto na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 13, n. 2, 2007.

SCHAER, S. **Mapping and predicting Earth's ionosphere using the Global Positioning System**. 1999, 205 p. Tese (Doutorado) Naturwissenschaftlichen Fakultät. Universität Bern, Berna, 1999.

STONE, M. Cross-validation: a review. **Statistics**, v. 9, n. 1, p. 127-139, 1978.

WILAMOWSKI, B. M.; YU, H. Neural network learning without backpropagation. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 21, n. 11, p. 1793-1803., 2010.