



Krigagem ordinária e visualização de incertezas aplicadas no monitoramento de irregularidades ionosféricas no Brasil

Ordinary kriging and depicting uncertainties applied in the monitoring of ionospheric irregularities in Brazil

*Vinícius Amadeu Stuani Pereira*¹
*Edmur Azevedo Pugliesi*²
*Edilson Ferreira Flores*³
*Paulo de Oliveira Camargo*⁴

Recebido em outubro de 2017.
Aprovado em setembro de 2018.

RESUMO

A krigagem ordinária é aplicada sobre um conjunto amostral do índice F_p para avaliar a interpolação de superfícies que representam a distribuição espacial das irregularidades ionosféricas no território brasileiro. Objetivase também representar as incertezas que a interpolação proporciona por meio do uso de diferentes abordagens de representação cartográfica. Os valores de F_p são estimados para 103 estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) selecionadas da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), GNSS-SP (Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo) e CIGALA/CALIBRA, para o dia 1 de março de 2014 (ápice do ciclo solar 24). A krigagem ordinária é aplicada devido à análise de tendência identificar que os dados apresentam estacionariedade a partir de uma determinada distância entre os pares de pontos (*lag* aproximado de $7,5^\circ$), o que caracteriza dados não tendenciosos. Ao analisar os semivariogramas direcionais, com tolerância angular de $22,5^\circ$, verifica-se um maior alcance na direção de 55° e uma maior variabilidade na direção de 145° , caracterizando a ocorrência de anisotropia. O modelo teórico gaussiano é o que apresenta melhor ajuste às irregularidades ionosféricas. Assim, usuários de informações ionosféricas podem utilizar a

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP, Brasil. E-mail: vi_stuani@hotmail.com

²Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT. Departamento de Cartografia. Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP, Brasil. E-mail: edmur.pugliesi@unesp.br

³Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT. Departamento de Estatística. Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP, Brasil. E-mail: edilson-ferreira.flores@unesp.br

⁴Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT. Departamento de Cartografia. Rua Roberto Simonsen, 305, CEP 19060-900, Presidente Prudente/SP, Brasil. E-mail: paulo.camargo@unesp.br

interpolação pela krigagem ordinária para a elaboração de mapas de monitoramento das irregularidades ionosféricas. Separadamente dos mapas, as incertezas da interpolação podem ser exibidas como superfícies contínuas, fazendo a utilização da variável visual saturação para um específico matiz. No caso de representar as incertezas da interpolação sobrepostas às irregularidades ionosféricas, pode-se utilizar a saturação para isolinhas.

PALAVRAS-CHAVE: Irregularidades ionosféricas. Krigagem ordinária. Visualização de incerteza. GNSS.

ABSTRACT

Ordinary kriging is applied to a sample of the F_P index to evaluate the interpolation of surfaces representing the spatial distribution of ionospheric irregularities in the Brazilian territory. It also intended to represent the uncertainties that interpolation provides through the use of different cartographic representation approaches. The F_P values are estimated for 103 GNSS (Global Navigation Satellite System) stations from RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS Systems), GNSS-SP (GNSS Active Network of Sao Paulo State), and CIGALA/CALIBRA, for March 1, 2014 (apex of the solar cycle 24). Ordinary kriging is applied due to the tendency analysis identifies that the data present stationarity from a certain distance between the pairs of points (lag approximate of 7.5°), which characterizes non-biased data. By analyzing the directional semivariograms, angular tolerance 22.5° , there is a greater range in the direction of 55° and greater variability in the direction of 145° , characterizing the occurrence of anisotropy. The Gaussian theoretical model is the one presenting better fit to the ionospheric irregularities. Thus, users of ionospheric information can use ordinary kriging interpolation for the preparation of monitoring maps of ionospheric irregularities. Separately from the maps, the interpolation uncertainties can be displayed as continuous surfaces, making use of the variable visual saturation for a specific hue. In the case of representing the interpolation uncertainties superimposed on the ionospheric irregularities, saturation for isolines can be used.

KEYWORDS: Ionospheric irregularities. Ordinary kriging. Depicting uncertainty. GNSS.

* * *

Introdução

A ionosfera, camada atmosférica localiza entre 50 e 1.000 km de altura, aproximadamente, é considerada a maior fonte de erro sistemático no posicionamento e navegação pelo GNSS (*Global Navigation Satellite System*), sobretudo após a desativação da técnica SA (*Selective Availability*) em maio de 2000.

O efeito sistemático devido à ionosfera nos sinais GNSS (pseudodistância e fase da onda portadora) é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (*Total Electron Content* – TEC) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. Todavia, o TEC varia no tempo e no espaço em razão do fluxo de ionização solar, atividade geomagnética, ciclo de manchas solares, estações do ano, hora local e localização geográfica, sendo de difícil tratamento (CAMARGO, MONICO e FERREIRA, 2000; LEICK, 1995).

No Brasil, o posicionamento GNSS está suscetível a vários efeitos provocados pela ionosfera, principalmente os provenientes da Anomalia de Ionização Equatorial (AIE) e irregularidades ionosféricas, também conhecidas como bolhas ionosféricas. Uma vez que os sinais GNSS atravessam tais irregularidades, ocorre a cintilação ionosférica. Fortes cintilações podem ocasionar a perda do rastreamento dos sinais, fato esse crucial para a não obtenção da alta acurácia das soluções GNSS. No Brasil mais de 90% da agricultura de precisão depende do RTK (*Real Time Kinematic*), que é fortemente prejudicada, principalmente após o ocaso solar.

Várias pesquisas sobre os efeitos da ionosfera no Brasil vêm sendo desenvolvidas, como por exemplo: Brassarote, Souza e Monico (2018), Marques et al. (2018), Pereira e Camargo (2017), Prol, Camargo e Muella (2017), Vani, Shimabukuro e Monico (2017), Pereira e Camargo (2016), Silva, Monico e Alves (2016), Jerez, Alves e Souza (2015), Aguiar e Camargo (2012), Marques, Monico e Aquino (2011), Marques et al. (2010), Matsuoka, Camargo e Batista (2009), Dal Poz e Camargo (2008), Dal Poz, Camargo e Aguiar (2008), Aguiar e Camargo (2006) e Matsuoka, Camargo e Batista (2006).

A minimização dos efeitos pode ser realizada utilizando, por exemplo, modelos ionosféricos, arquivos IONEX (*Ionosphere Map Exchange Format*) ou a combinação linear *ion-free*. Entretanto, a quantidade de equipamentos utilizados no estudo e monitoramento da camada ionosférica é reduzida no âmbito brasileiro. Os poucos imageadores, radares de espalhamento

coerente, ionossondas e receptores GNSS dedicados são insuficientes para monitorar a atividade ionosférica ao longo dos 8,5 milhões de km² de território nacional. Assim, o uso dos dados GNSS das estações das redes ativas é essencial para essa atividade.

O método desenvolvido por Pereira e Camargo (2016 e 2017) utiliza a infraestrutura de estações já implantadas pela RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), GNSS-SP (Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo) e CIGALA/CALIBRA para realizar o monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS, em tempo real e pós-processado, por meio de alguns índices, tais como: I_{ROT} (WANNINGER, 1993), $ROTI$ (PI et al., 1997), f_p e F_p (MENDILLO, LIN e AARONS, 2000), S_4 e σ_ϕ (VAN DIERENDONCK, KLOBUCHAR e HUA, 1993), S_ϕ (FORTE, 2007) e σ_{CHAIN} (MUSHINI et al., 2012). Mesmo com o adensamento de informações ionosféricas, algumas áreas ainda apresentam “vazios” de dados, como a região Norte (devido à presença da floresta Amazônica) e a região Centro-Oeste (escassez de estações). Assim, a interpolação dos dados para a estimativa de valores nesses locais é primordial.

A interpolação trata-se de um processo de utilização de pontos amostrados para aproximar superfícies de ajuste, as quais, a partir da representação contínua do fenômeno possibilitam uma manipulação conveniente e eficiente dos modelos matemáticos por meio de algoritmos de análise. Nesse contexto, são necessárias funções que realizem a conversão das observações pontuais em superfícies contínuas, de maneira que os pontos da superfície são estimados a partir de um conjunto amostrado de entrada (DENT, 1999; SLOCUM, 1999).

Dentre as diversas técnicas de interpolação têm-se aquelas apresentadas pela geoestatística, como, por exemplo, a krigagem. Um tipo característico de interpolação por krigagem é a krigagem ordinária, a qual trabalha com variáveis regionalizadas que tenham um comportamento estacionário. Dessa forma, os valores estimados e a respectiva covariância

espacial não possuem uma variação sistemática, mas são caracterizados por apresentar uma mesma probabilidade de ocorrência para toda a área analisada. Assim, na krigagem ordinária assume-se que os valores na região de interesse não apresentam tendência que possam afetar os resultados (LANDIM, STURARO e MONTEIRO, 2002).

O uso de krigagem em dados ionosféricos, como o TEC, o atraso vertical ionosférico e índices de cintilação ionosférica não é recente, conforme pode ser verificado, por exemplo, em Blanch (2002), Blanch, Walter e Enge (2003), Wielgosz, Grejner-Brzezinska e Kashani (2003) e Sayin, Arikan e Arikan (2008), e mais recentemente em Grynyszyna-Poliuga, Stanislawska e Swiatek (2014), Hamel et al. (2014), Kieft, Aquino e Dodson (2014) e Huang et al. (2017). Entretanto, a aplicação da técnica geoestatística supracitada para o monitoramento de irregularidades ionosféricas é hodierna, sobretudo no Brasil.

Em estudos atmosféricos a krigagem desempenha papel fundamental, pois, além de possibilitar a elaboração de mapas a partir de dados irregularmente espaçados, parte do princípio de que um ponto localizado no espaço é mais semelhante aos pontos que estão ao seu entorno comparado aos pontos mais afastados. Isto, portanto, pressupõe a existência de correlação entre os elementos amostrados, sendo necessário identificar até onde espacialmente esta correlação é significativa (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

Como resultado de qualquer técnica de interpolação têm-se as incertezas das superfícies que são geradas. Embora, na maioria das vezes, não visualizadas em forma de produtos, MacEachren (1992) sugere três métodos para representá-las: mapas individuais mostrando o atributo e a incerteza separadamente; único mapa apresentando conjuntamente o atributo e a incerteza associada (sobreposição), sendo neste caso necessário o uso de variáveis visuais; ou por meio da utilização de ferramentas interativas de exploração de dados (animações, por exemplo). MacEachren (1992) também argumenta que, de todas as variáveis visuais existentes, a

saturação é a mais lógica de ser utilizada para representar incertezas, onde matizes puros são usados para informações precisas e matizes insaturados para informações não precisas.

Assim, a pesquisa tem como objetivo aplicar a krigagem ordinária sobre um conjunto amostral do índice F_p (MENDILLO, LIN e AARONS, 2000) com intuito de avaliar a interpolação de superfícies que representam a distribuição espacial das irregularidades ionosféricas no Brasil, bem como, analisar diferentes formas de visualizações das incertezas que a interpolação proporciona. Pretende-se avaliar as superfícies interpoladas com base na RMSE (*Root Mean Square Error* – Raiz do Erro Médio Quadrático). Além disso, classificar pelo método manual as superfícies krigadas, com a finalidade de agrupar os dados quantitativos em classes e facilitar a análise visual sobre o mapa temático isarítmico.

1 Monitoramento das irregularidades ionosféricas pelo índice F_p

As irregularidades ionosféricas são perturbações na densidade do plasma ionosférico, que se originam por meio de processos de instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor (R-T) que ocorrem na ionosfera equatorial. A instabilidade R-T dá origem às irregularidades na camada F ionosférica com um amplo espectro de escalas de tamanho, que vão desde alguns centímetros até centenas de quilômetros.

A estimativa do índice de irregularidades F_p se baseia na taxa de variação do TEC, conhecido como ROT (*Rate of Change of TEC*). O ROT é calculado por meio da razão da diferença entre os TECs obtidos consecutivamente entre duas épocas (ΔTEC), pelo intervalo de tempo decorrido entre as respectivas determinações (Δt):

$$\text{ROT} = \frac{\text{TEC}_{t_2} - \text{TEC}_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\text{TEC}}{\Delta t} \quad (1)$$

O TEC pode ser obtido utilizando tanto as pseudodistâncias advindas dos códigos nas portadoras L1 e L2 dos satélites GPS (*Global Positioning System*) e GLONASS (*Global'naya Navigatsionaya Sputnikovaya Sistema*) quanto a partir da combinação linear entre as medidas de fase, também das portadoras L1 e L2 (MATSUOKA e CAMARGO, 2004), conforme apresenta a Equação 2:

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[(\lambda_2 \Phi_{2r}^s - \lambda_1 \Phi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - e_{\Phi_{12}} \right] \quad (2)$$

onde f_1 e f_2 são as frequências das ondas portadoras L1 e L2, λ_1 e λ_2 os comprimentos das ondas portadoras L1 e L2, Φ_{1r}^s e Φ_{2r}^s as medidas de fase em ciclos das ondas portadoras L1 e L2, N_{1r}^s e N_{2r}^s as ambiguidades da fase das portadoras L1 e L2, e $e_{\Phi_{12}}$ os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

Substituindo a Equação 2 na Equação 1 pode-se obter uma estimativa do ROT tendo como parâmetros apenas as medidas de fase das portadoras L1 e L2 nas épocas t_1 e t_2 :

$$\text{ROT} = \frac{9,52 \cdot 10^{16} \left[\lambda_2 (\Phi_{2rt_2}^s - \Phi_{2rt_1}^s) - \lambda_1 (\Phi_{1rt_2}^s - \Phi_{1rt_1}^s) \right]}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

A Equação 3 é utilizada para os satélites GPS, os quais se baseiam na técnica de identificação dos satélites denominada CDMA (*Code Division Multiple Access*) (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). Já para o GLONASS, que utiliza divisões múltiplas de frequências para diferenciar cada satélite (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*) (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008), deve-se adotar a Equação 4, sendo f_1 , f_2 , λ_1 e λ_2 as frequências e comprimentos de onda referentes às portadoras L1 e L2 de cada satélite observado:

$$\text{ROT} = \frac{\frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[\lambda_2 \left(\Phi_{2rt_2}^s - \Phi_{2rt_1}^s \right) - \lambda_1 \left(\Phi_{1rt_2}^s - \Phi_{1rt_1}^s \right) \right]}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

Entretanto, ressalta-se que o GLONASS conseguiu aprovação para adicionar o código de divisão de acesso múltiplo no seu segmento espacial. Assim, alguns satélites russos já possuem a tecnologia CDMA, apresentando maior interoperabilidade com os demais sistemas de posicionamento.

O índice F_P é proveniente do índice f_P (*phase fluctuation*), que consiste no valor da mediana dos ROTs para um período de 15 minutos, sendo os ROTs estimados a cada minuto. Calculado para cada satélite de uma determinada estação, o f_P é dado por (MENDILLO, LIN e AARONS, 2000):

$$f_p(n, hr, i) = \text{Mediana}|\text{ROT}| \quad (5)$$

onde n é o número do satélite, hr a hora cheia de 0h a 24h TU (Tempo Universal) e i o número da seção, com duração de 15 minutos, contida em uma hora cheia, ou seja, $i = 1, 2, 3$ ou 4 .

Assim, o índice F_P é estimado para cada estação e representa o valor médio dos índices f_P obtidos para todos os satélites observados em uma estação no período de uma hora, que por sua vez é obtido por meio da Equação 6 (MENDILLO, LIN e AARONS, 2000):

$$F_p(hr) = \frac{\sum_n^{nsat} \left[\frac{\sum_i^k f_p(n, hr, i)}{k} \right]}{nsat(hr)} \cdot 1000 \quad (6)$$

onde $nsat$ é o número total de satélites observados durante o período de uma hora e k o número de valores de f_P disponíveis em cada hora ($k = 0, 1, 2, 3$ ou 4).

Um valor $F_P \leq 50$ representa baixos níveis de irregularidades; $50 < F_P \leq 200$ significa a presença de irregularidades moderadas, e quando $F_P > 200$

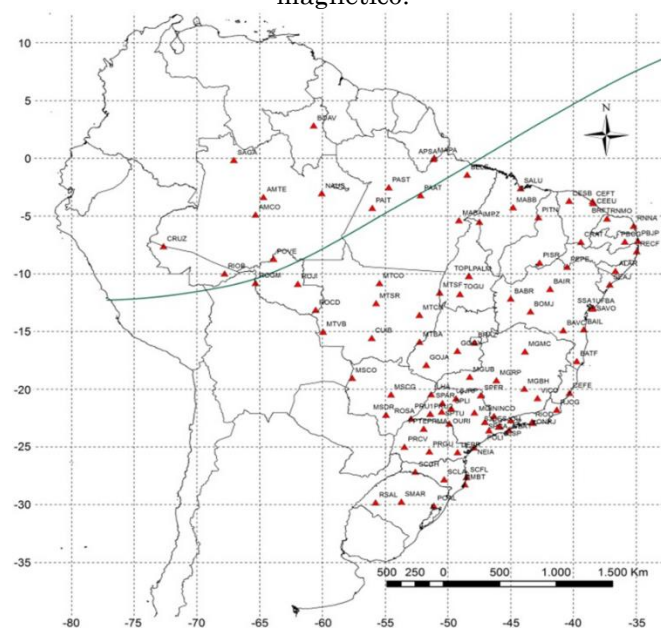
representa a ocorrência de fortes níveis de irregularidades ionosféricas (MENDILLO, LIN e AARONS, 2000).

O monitoramento das irregularidades ionosféricas é realizado a partir do programa Ion_Index (PEREIRA e CAMARGO, 2016 e 2017), que utiliza a infraestrutura de dados GNSS das redes ativas RBMC, GNSS-SP e CIGALA/CALIBRA para a estimativa do índice F_P e de outros índices.

2 Interpolação das irregularidades por krigagem ordinária

Os valores do índice F_P utilizados nesse trabalho foram estimados pelo Ion_Index para o dia 1 de março de 2014 (pico do ciclo solar 24), referente a 103 estações GNSS selecionadas das redes RBMC, GNSS-SP e CIGALA/CALIBRA (Figura 1). O dia escolhido é caracterizado por fortes níveis de irregularidades da ionosfera devido ao aumento da variabilidade de elétrons próximo ao equinócio de outono, bem como, uma incursão negativa do índice geomagnético D_{st} , que oscilou entre 0 e -100 nT (tempestade geomagnética moderada).

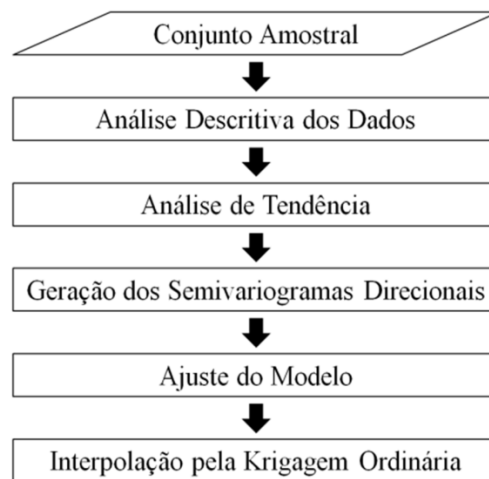
Figura 1 – Mapa das estações GNSS selecionadas. A linha verde representa o equador magnético.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os procedimentos para a interpolação das irregularidades estão descritos na Figura 2.

Figura 2 – Etapas para a interpolação das irregularidades ionosféricas por krigagem ordinária.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.1 Análise descritiva dos dados

A análise descritiva permite conhecer o comportamento dos dados. Assim, foram obtidas medidas descritivas de locação (média, mediana, valor máximo e valor mínimo) e de dispersão (desvio-padrão) dos valores de F_p para os horários 00-01h, 01-02h, 02-03h e 03-04h TU, contemplando o período com efeito das irregularidades ionosféricas no Brasil (Tabela 1). Histogramas de frequências foram construídos e o teste de normalidade de *Anderson-Darling* foi aplicado, pois o mesmo determina mais peso aos pontos das caudas da distribuição e, por conseguinte, caracteriza-se como um teste mais sensível na detecção da normalidade (UPTON e FINGLETON, 1985). Vale ressaltar que há outros testes de detecção de normalidade que poderiam ser aplicados, tais como: *Kolmogorov-Smirnov*, *Ryan-Joiner* e *Shapiro-Wilk* por exemplo.

Tabela 1 – Medidas descritivas dos valores de F_P para os horários 00-01h, 01-02h, 02-03h e 03-04h TU do dia 1 de março de 2014. As medidas foram obtidas no software Minitab.

Horário (TU)	00-01h	01-02h	02-03h	03-04h
Nº de elementos	103	103	103	103
Média	101,83	100,28	85,86	60,06
Mediana	91,06	105,44	78,99	58,76
Máximo	241,44	200,12	195,27	133,78
Mínimo	31,21	26,22	20,13	20,06
Desvio-padrão	52,51	42,37	36,83	25,84

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir das medidas descritivas observa-se que a média decresceu de 101,83 para 60,06 ao longo do tempo, o que caracteriza o deslocamento espacial das irregularidades ao longo do equador magnético. A partir dos valores da média, mediana e valor máximo pode-se concluir que se trata de irregularidades moderadas, sendo em alguns momentos classificadas como fortes (241,44 para o horário 00-01h TU). Ressalta-se também a existência de baixos valores de F_P para o período em questão, o que indica que o fenômeno é característico de uma determinada região, que por sua vez influencia no valor do desvio-padrão (máximo em torno de 50).

No teste de normalidade verificou-se que os valores de F_P não apresentam distribuição normal, ou seja, os dados são assimétricos. Todavia, a krigagem ordinária pode ser aplicada normalmente, pois a interpolação em questão trabalha com dados sem normalidade.

2.2 Análise de tendência

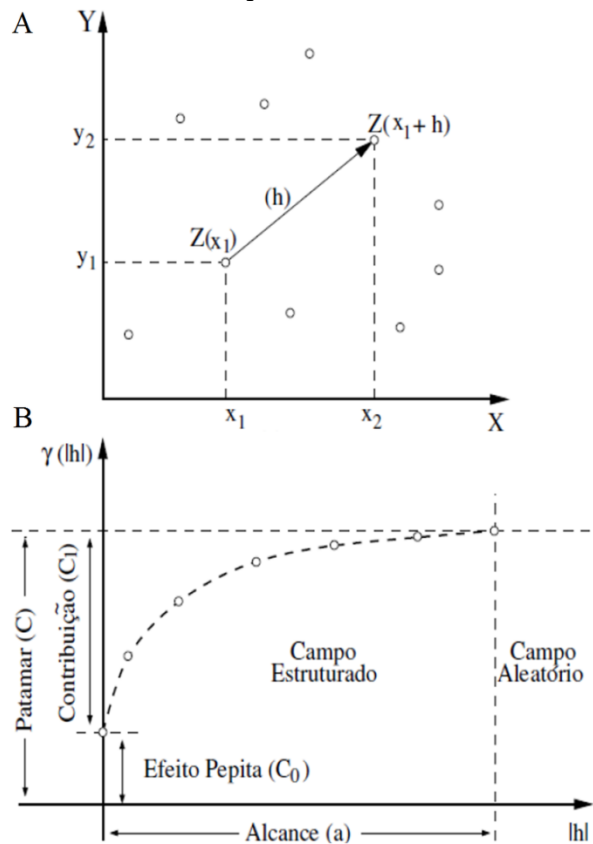
Para a aplicação da krigagem ordinária é ideal que os valores amostrados não apresentem tendência. Assim é necessário avaliar se os dados são tendenciosos ou não (LANDIM, 2003). A tendência pode ser identificada por meio da construção de superfícies de tendência ou também a partir de um semivariograma omnidirecional.

A respeito do semivariograma, o mesmo refere-se à representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado e realça a estrutura espacial desse fenômeno (LANDIM, STURARO e MONTEIRO, 2002). Isaaks

e Srivastava (1989) descrevem que o semivariograma mede o grau de dependência espacial entre os elementos e define parâmetros para a estimativa de valores em locais não amostrados.

Na literatura o termo comum adotado é variograma; entretanto Landim (2004) afirma que, na prática, utiliza-se o semivariograma, que equivale à metade do valor do variograma. Na Figura 3A tem-se o cálculo experimental para dois pontos em que $Z(x_1)$ representa a posição dos componentes $(x_1; y_1)$, $Z(x_1+h)$ o valor amostrado na posição $(x_2; y_2)$ e h (chamado de *lag*) o vetor distância entre os pontos (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004). Os componentes de um semivariograma são apresentados na Figura 3B: alcance ou *range* (a), que indica a distância em que os pares de pontos tornam-se independentes; efeito pepita ou *nugget* (C_0), que representa o valor da função na origem, evidenciando a descontinuidade; patamar ou *sill* (C), o qual se refere ao valor em que ocorre a estabilidade no campo aleatório; e a contribuição ou *partial sill* (C_1), que exprime as diferenças espaciais entre os valores de uma variável analisada em dois pontos com distâncias sucessivamente maiores.

Figura 3 – (A) Distribuição espacial das observações e (B) componentes do semivariograma experimental.



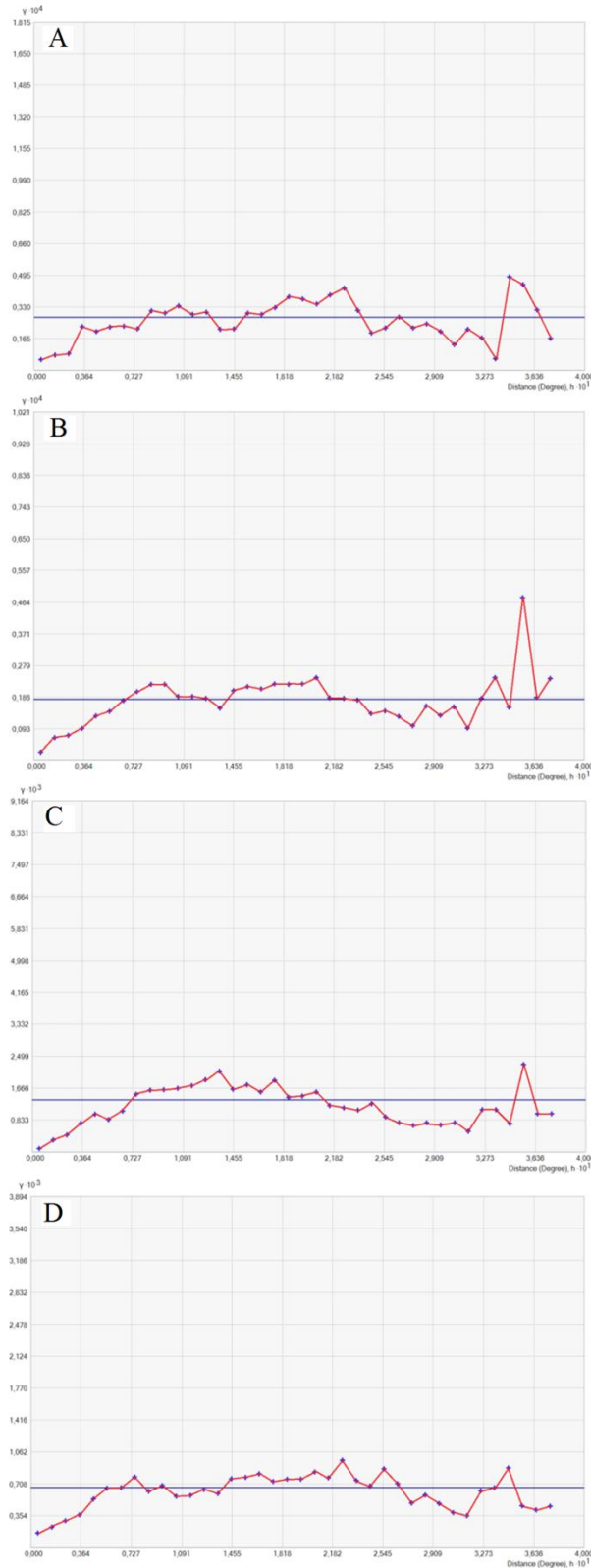
Fonte: Camargo, Fucks e Câmara (2004).

Para $N(h)$ pares de observações separados pela distância h , o cálculo do semivariograma é dado pela Equação 7 (ISSAKS e SRIVASTAVA, 1989):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

Utilizando a ferramenta *Geostatistical Analyst* da extensão ArcMap do ArcGIS 10.2.2 foram construídos os semivariogramas omnidirecionais (direção angular 0° e tolerância de 90°) para cada um dos horários em análise (Figura 4).

Figura 4 – Semivariogramas omnidirecionais do índice F_P para os horários (A) 00-01h, (B) 01-02h, (C) 02-03h e (D) 03-04h TU do dia 1 de março de 2014. A primeira intersecção da linha azul com a vermelha representa a distância (lag) em que as observações tornam-se independentes.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Verifica-se pelos semivariogramas da Figura 4 que as amostras apresentam estacionariedade após uma determinada distância (*lag*) entre os pares de pontos, o que descaracteriza o efeito de um comportamento tendencioso.

A partir da Figura 4 nota-se também que, aproximadamente, após a distância de *lag* de 7,5° as observações tornam-se independentes, isto é, não correlacionadas.

2.3 Geração dos semivariogramas direcionais

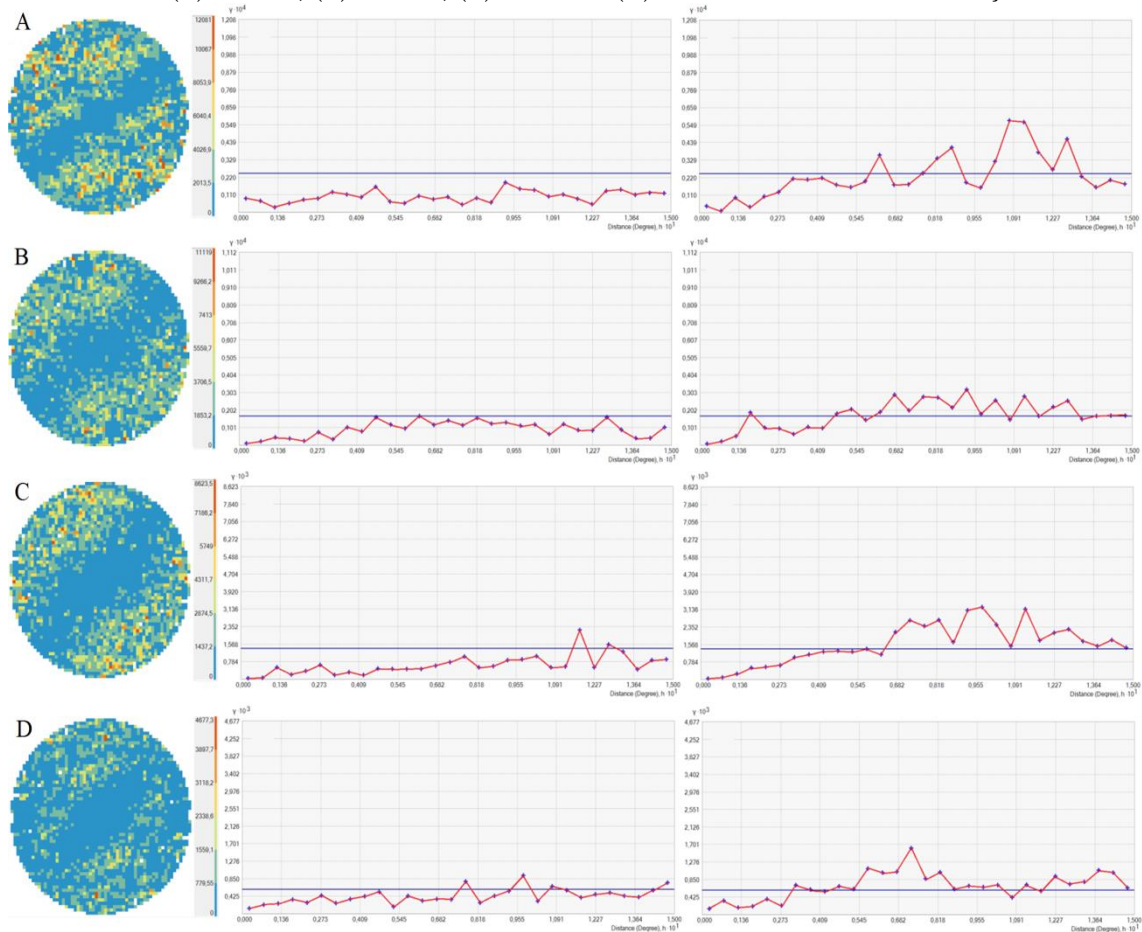
Com o intuito de avaliar se a continuidade espacial do fenômeno ocorre em algumas direções privilegiadas (anisotropia) ou de maneira uniforme (isotropia), são gerados semivariogramas direcionais. As mais frequentes direções utilizadas são: 0°, 45°, 90° e 135°, com tolerância angular de 22,5° (LANDIM, STURARO e MONTEIRO, 2002). Quando o alcance (anisotropia geométrica) ou o patamar (anisotropia zonal), ou ambos (anisotropia combinada) variam conforme a direção angular considerada tem-se um comportamento anisotrópico do conjunto. Já na situação da variabilidade espacial ser invariante ocorre a isotropia (BETTINI, 2007).

Semivariogramas direcionais foram elaborados através da ferramenta *Geostatistical Analyst* da extensão ArcMap. Após vários experimentos adotou-se a distância de *lag* de 0,5° e um número de *lag* igual a 30, o que equivale a dizer que um ponto terá seu valor F_P estimado pela influência de todos os pontos situados até 15° de raio. Esta distância de 15° está coerente com o *lag* observado nos semivariogramas omnidirecionais. No entanto, considerou-se um raio de abrangência maior para que não ocorresse a perda de informação proveniente pelos pontos distantes a mais de 7,5°.

Em relação às direções, estas corresponderam a 55° e 145° com tolerância angular de 22,5°. A direção de 55° representa a direção de maior alcance e a 90° desta, isto é, em 145° tem-se a direção de maior variabilidade (menor alcance).

Para cada horário foram construídos os mapas variográficos e os semivariogramas direcionais, apresentados na Figura 5. Observa-se que há um comportamento anisotrópico das irregularidades ionosféricas, o que traduz na necessidade de ajuste de um modelo para as direções de maior e menor alcance e, posteriormente, a combinação destes em um único modelo, o qual permite representar a variabilidade espacial em todas as direções.

Figura 5 – Mapas variográficos (coluna esquerda) e semivariogramas direcionais de 55° (coluna central) e 145° (coluna direita), com tolerância angular de 22,5°, do índice F_p para os horários (A) 00-01h, (B) 01-02h, (C) 02-03h e (D) 03-04h TU do dia 1 de março de 2014.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.4 Ajuste do modelo

O modelo é ajustado iterativamente por meio da escolha dos valores dos parâmetros alcance (a), efeito pepita (C_0) e contribuição (C_1) até que a função seja adequada.

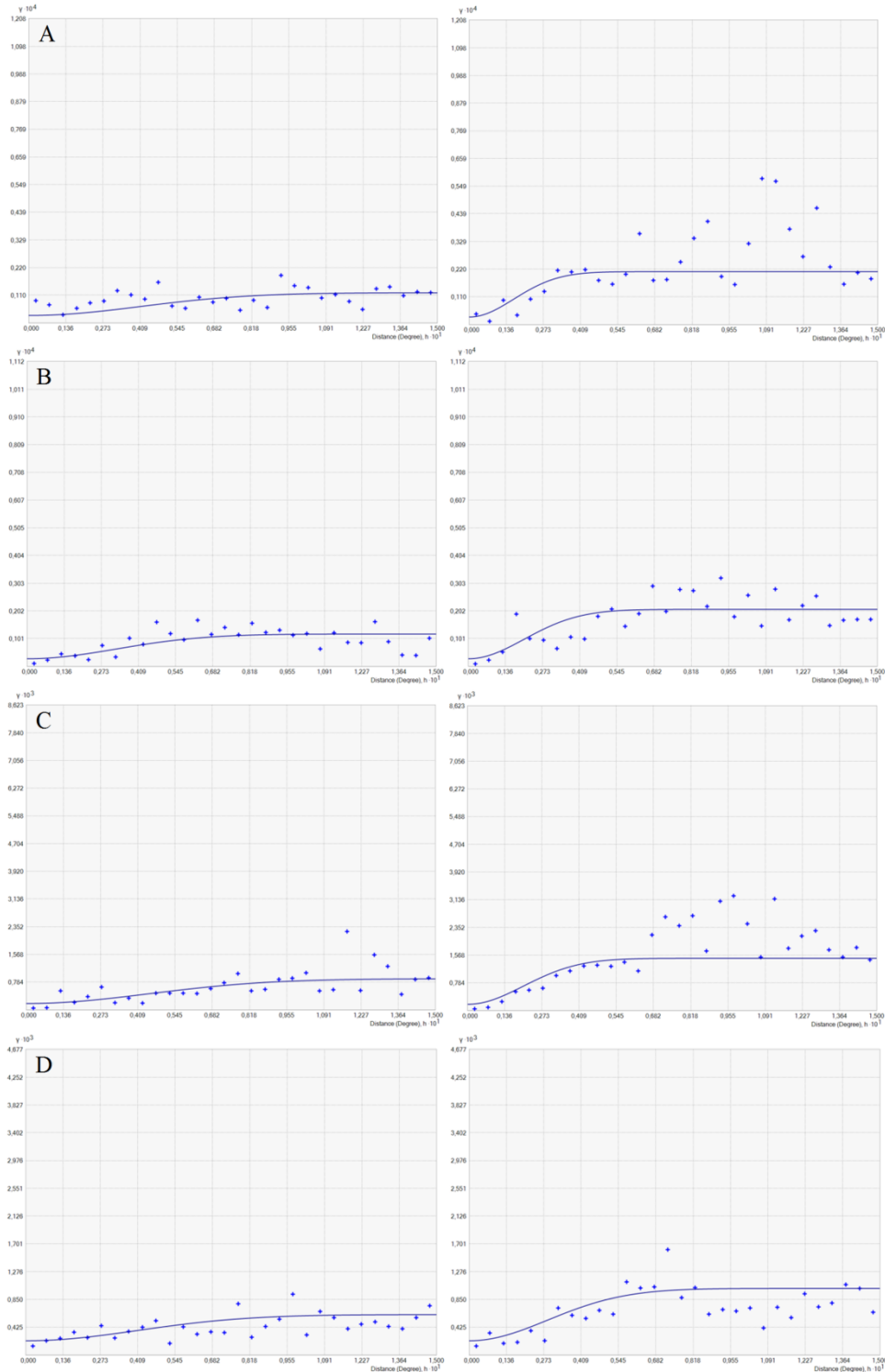
Isaaks e Srivastava (1989) chamam estes modelos teóricos de transitivos, dos quais se destaca o esférico, o gaussiano e o exponencial, bem como, a possibilidade de combinação destes para representar as variações espaciais. A manipulação dos parâmetros também foi executada no *Geostatistical Analyst*. O modelo gaussiano (Figura 6) foi o que se melhor ajustou aos dados do período, cuja expressão é apresentada na Equação 8:

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right)^2 \right] & \text{se } |h| \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

onde $|h|$ é o modulo da distância entre os pares de pontos, sendo na forma normalizada dada por:

$$\frac{|h|}{a} = \sqrt{\left(\frac{h_{55^\circ}}{a}\right)^2 + \left(\frac{h_{145^\circ}}{a}\right)^2} \quad (9)$$

Figura 6 – Ajustes do modelo gaussiano nas direções 55° (coluna esquerda) e 145° (coluna direita) do índice F_P para os horários (A) 00-01h, (B) 01-02h, (C) 02-03h e (D) 03-04h TU do dia 1 de março de 2014.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores dos parâmetros estimados são apresentados na Tabela 2. A partir desses parâmetros foi realizada a interpolação pela krigagem ordinária.

Tabela 2 – Parâmetros estimados para a modelagem anisotrópica dos valores de F_P para os horários 00-01h, 01-02h, 02-03h e 03-04h TU do dia 1 de março de 2014.

Horário (TU)	Direção	Modelo Teórico	Efeito pepita (C_0)	Alcance (a)	Contribuição (C_1)	Patamar (C)
00-01h	55°	Gaussiano	300	10°	900	1200
	145°			4°	1800	2100
01-02h	55°		280	8°	900	1180
	145°			5°	1800	2080
02-03h	55°		180	11°	700	880
	145°			5°	1300	1480
03-04h	55°		220	10°	400	620
	145°			7°	800	1020

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.5 Interpolação pela krigagem ordinária

A interpolação pela krigagem é similar à utilizada pelos métodos tradicionais, como inverso do quadrado da distância, média móvel, triangulação e poligonação. No entanto, Bettini (2007) relata que a principal diferença está na maneira como se determinam os pesos para o cálculo do valor a ser interpolado.

Os pesos na krigagem são determinados com base na distância entre a observação e o ponto de interesse, na continuidade espacial e no arranjo geométrico do conjunto amostral. Dessa forma, estimam-se as ponderações com base em uma análise espacial, a partir do semivariograma experimental (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

A krigagem ordinária trata-se de uma forma de estimação linear para uma variável regionalizada, a qual não necessita o conhecimento a priori da média e assume-se a hipótese de estacionariedade local (LANDIM, 2003). A Equação 10 apresenta o estimador:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i) \quad (10)$$

onde $Z(x_i)$ corresponde aos dados experimentais, λ_i os ponderadores e n o número de elementos amostrais.

3 Resultados e análises

Para avaliar se as superfícies de ajuste descrevem de forma adequada a distribuição espacial das irregularidades ionosféricas sobre o território brasileiro durante o período das 00h às 04h TU, foi determinada a RMSE (Equação 11) a partir do valor do índice estimado pelo Ion_Index e o respectivo valor interpolado pela krigagem.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\text{índice}_{\text{estimado}} - \text{índice}_{\text{krigado}})^2} \quad (11)$$

onde n refere-se ao número de observações. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3 – RMSE dos valores de F_p que participaram do ajuste dos modelos dos horários 00-01h, 01-02h, 02-03h e 03-04h TU do dia 1 de março de 2014.

Horário (TU)	RMSE
00-01h	25,86
01-02h	21,30
02-03h	20,63
03-04h	14,88

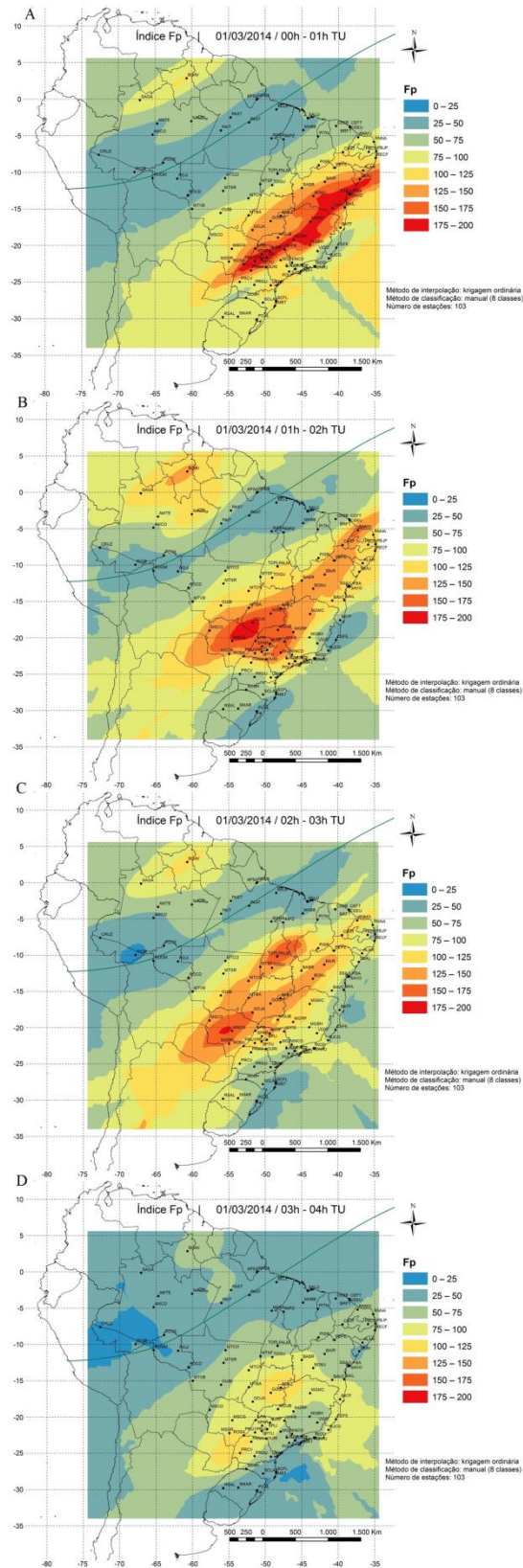
Fonte: Elaborado pelos autores.

A RMSE oscilou entre 14 e 26 para as superfícies de ajuste, valores estes considerados plausíveis para o cenário de fortes irregularidades ionosféricas, haja vista que o pico das irregularidades ocorre, aproximadamente, entre às 21h local (0h TU) e 0h local (3h TU). Observa-se também que há um decréscimo da RMSE com o passar do tempo, fato este devido às características das irregularidades ionosféricas, que tende a

diminuir a variabilidade dos valores de F_P à medida que o período noturno se estende até o nascer do Sol.

Para possibilitar uma análise visual quantitativa sobre as áreas interpoladas fez-se a classificação das superfícies pelo método manual, contendo 8 classes entre 0 e 200 (limite entre moderadas e fortes irregularidades), com variação de 25 (intervalos iguais), resultando nos mapas temáticos isarítmicos (Figura 7). O número de classes definidas condiz com o número obtido pelo método de *Sturges* ($k = 1 + 3,33 \cdot \log N$, onde k é o número de classes e N o número de observações).

Figura 7 – Mapas temáticos isarítmicos elaborados para as superfícies de ajuste do índice F_p para os horários (A) 00-01h, (B) 01-02h, (C) 02-03h e (D) 03-04h TU do dia 1 de março de 2014.

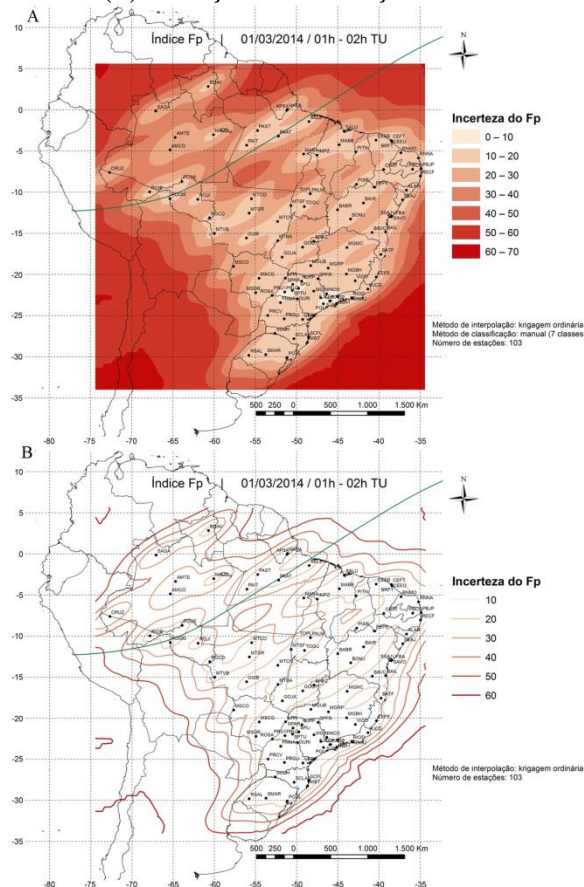


Fonte: Elaborado pelos autores.

Os mapas isarítmicos da Figura 7 retratam o deslocamento das gerações das irregularidades ionosféricas sobre o Brasil ao longo do equador magnético (linha verde), de Nordeste a Sudoeste. A variabilidade na direção Noroeste-Sudeste se deve ao comportamento da AIE, que consiste em duas faixas de alta densidade do plasma ionosférico, localizadas nas regiões tropicais que circundam paralelamente ao equador magnético.

Devido a grande concentração de estações GNSS na região Sudeste é de esperar que a incerteza na interpolação do índice F_p nesta região seja menor do que nas demais. Assim, na Figura 8 são apresentadas duas formas de visualização das incertezas para o horário 01-02h TU: (A) variação da saturação com transição contínua suave; e (B) variação da saturação com isolinhas.

Figura 8 – Visualização das incertezas da interpolação do índice F_p pela krigagem ordinária para o horário 01-02h TU por meio da (A) variação da saturação com transição contínua suave e (B) variação da saturação com isolinhas.

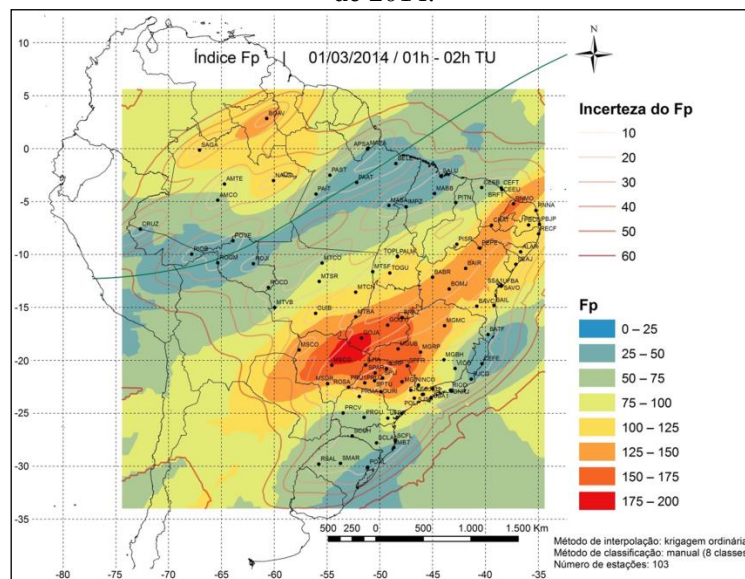


Fonte: Elaborado pelos autores.

As incertezas da interpolação são melhores representadas e compreendidas se forem exibidas como uma superfície contínua (Figura 8A), fazendo-se a aplicação da variável visual saturação para um matiz específico, separadamente do mapa de monitoramento das irregularidades ionosféricas.

No caso de representar as incertezas da interpolação sobrepostas às irregularidades, pode-se fazer do uso da saturação para isolinhas, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Mapa temático isaritmico elaborado para a representação das irregularidades ionosféricas e incerteza dos valores de F_p interpolados do horário 01-02h TU de 1 de março de 2014.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 Conclusões e recomendações

A partir dos semivariogramas omnidirecionais pode-se identificar que as irregularidades ionosféricas, para o período das 00h às 04h TU, apresentaram estacionariedade a partir de determinada distância entre os pares de pontos, traduzindo na não observância de tendência nos dados, ideal para a aplicação da krigagem ordinária.

Os mapas variográficos indicaram forte dependência espacial entre os valores do índice F_p , bem como, uma direção de maior continuidade, percebida por meio da geração dos semivariogramas direcionais, refletindo dessa forma um carácter anisotrópico das irregularidades.

As RMSEs das superfícies de ajuste oscilaram entre 14 e 26, valores considerados aceitáveis para o cenário de fortes irregularidades ionosféricas. A diminuição da RMSE com o passar das horas se deve às características das irregularidades, que tende a diminuir a variabilidade dos valores de F_p à medida que o período noturno se estende até o nascer do Sol.

A elaboração dos mapas temáticos, pelo método de classificação manual, mostrou-se um recurso relevante para facilitar a análise visual e comparação entre diferentes dias da distribuição das irregularidades ionosféricas.

Uma superfície contínua e suave e outra na forma de isolinhas foram adotadas para a visualização de incertezas, ambas as representações fazendo o uso da variável visual saturação. Separadamente das irregularidades ionosféricas, a superfície contínua pode representar as incertezas. Porém, quando se faz a sobreposição das incertezas com as irregularidades, o resultado pode ser visualizado com o emprego de isolinhas.

Assim, usuários de informações ionosféricas, em especial índices de irregularidades e de cintilação, podem utilizar a interpolação pela krigagem ordinária para a elaboração de superfícies, bem como, representar a incerteza da interpolação juntamente com o mapa isarítmico.

Haja vista que as análises foram realizadas apenas para um dia com fortes irregularidades ionosféricas, recomenda-se verificar outros dias com diferentes atividades ionosféricas, possibilitando obter uma compreensão mais abrangente da aplicação da krigagem e da visualização de incertezas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, processo n° 2015/20522-7) pelo apoio financeiro por meio da bolsa de doutorado, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo n° 309832/2016-0) pela bolsa PQ, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea” (INCT GNSS-NavAer), processos CNPq n° 465648/2014-2, FAPESP n° 2017/50115-0 e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) n° 88887.137186/2017-00 pelo ambiente de pesquisa, e ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Countering GNSS High Accuracy Applications Limitations due to Ionospheric Disturbances in Brazil*) e Laboratório de Geodésia Espacial pelo fornecimento dos dados GNSS das redes ativas.

Referências

- AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Modelagem em tempo real do erro sistemático das observáveis GPS devido à ionosfera. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 12, 2006. pp. 101-120
- AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Resolução espacial da grade ionosférica e do GIVE. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 18, 2012. pp. 464-479
- BETTINI, C. Conceitos básicos de geoestatística. **In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). Geomática: modelos e aplicações ambientais**, cap. 4, Brasília: Embrapa, 2007.
- BLANCH, J. An Ionosphere Estimation Algorithm for WAAS based on Kriging. **Proceedings of ION GPS**, 2002.
- BLANCH, J.; WALTER, T.; ENGE, P. Adapting Kriging to the WAAS MOPS ionospheric grid. **2003 National Technical Meeting Proceedings**, 2003.

- BRASSAROTE, G. O. N.; SOUZA, E. M.; MONICO, J. F. G. S4 index: Does it only measure ionospheric scintillation? **GPS Solutions**, vol. 22, n. 8, 2018.
- CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. **Análise espacial de superfície**. Brasília: Embrapa, 2004.
- CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; FERREIRA, L. D. D. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. **Earth, Planets and Space**, vol. 52, n. 11, 2000. pp. 1083-1089
- DAL POZ, W. R. CAMARGO, P. O. Influência da variação espacial do TEC na definição do comprimento de linha de base: Abordagem teórica e prática. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 60, 2008. pp. 363-374
- DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P. O.; AGUIAR, C. R. Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 14, 2008. pp. 35-54
- DENT, B. **Cartography thematic map design**. 5. ed. WCB McGraw-Hill, 1999.
- FORTE, B. On the relationship between the geometrical control of scintillation indices and data detrending problems observed at high latitudes. **Annals of Geophysics**, vol. 50, n. 6, 2007. pp. 699-706
- GRYNYSHYNA-POLIUGA, O.; STANISLAWSKA, I.; SWIATEK, A. Regional ionosphere mapping with kriging and B-spline methods. **Mitigation of Ionospheric Threats to GNSS: an Appraisal of the Scientific and Technological Outputs of the TRANSMIT Project**, InTech, 2014.
- HAMEL, P.; SAMBOU, D. C.; DARCES, M.; BENIGUEL, Y.; HELIER, M. Kriging method to perform scintillation maps based on measurement and GISM model. **Radio Science**, vol. 49, n. 9, 2014. pp. 746-752
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag Wien, 2008.
- HUANG, L.; ZHANG, H.; XU, P.; GENG, J.; WANG, C.; LIU, J. Kriging with unknown variance components for regional ionospheric reconstruction. **Sensors**, vol. 17, n. 3, 2017. pp. 1-23
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

- JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, J. S. Análise do uso combinado GPS/GLONASS no posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 67, 2015. pp. 201-214
- KIEFT, P.; AQUINO, M.; DODSON, A. Using ordinary kriging for the creation of scintillation maps. **Mitigation of Ionospheric Threats to GNSS: an Appraisal of the Scientific and Technological Outputs of the TRANSMIT Project**, InTech, 2014.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003.
- LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise variográfica com o variowin: lab. geomatemática**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2004.
- LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2002.
- LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.
- MACEACHREN, A. M. Visualizing uncertain information. **Cartographic Perspectives**, n. 13, 1992. pp. 10-19
- MARQUES, H. A.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M.; VEETIL, S. V.; MONICO, J. F. G. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric effects. **Journal of Space Weather and Space Climate**, vol. 8, 2018. pp. A15
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. **GPS Solutions**, vol. 15, 2011. pp. 305-314
- MARQUES, H. A. S.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; DE FRANCESCHI, G.; DODSON, A. Stochastic modeling considering ionospheric scintillation effects on GNSS relative and point Positioning. **Advances in Space Research**, vol. 45, 2010. pp. 1113-1121
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 56, n. 1, 2004. pp. 14-27

- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S.. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 12, 2006. pp. 315-334
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S.. Análise da ionosfera usando dados de receptores GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de Digissondas. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 27, n. 4, 2009. pp. 565-582
- MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. **Radio Science**, vol. 35, n. 3, 2000. pp. 885-904
- MUSHINI, S. C.; JAYACHANDRAN, P. T.; LANGLEY, R. B.; MACDOUGALL, J. W.; POKHOTILOV, D. Improved amplitude and phase scintillation indices derived from wavelet detrended high latitude GPS data. **GPS Solutions**, vol. 16, n. 3, 2012. pp. 363-373
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Programa científico para o monitoramento em tempo real ou pós-processado das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 22, n. 2, 2016. pp. 282-302
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. **GPS Solutions**, vol. 21, n. 3, 2017. pp. 1013-1025
- PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. **Geophysical Research Letters**, vol. 24, n. 18, 1997. pp. 2283-2286
- PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; MUELLA, M. T. A. H. Numerical simulations to assess ART and MART performance for ionospheric tomography of Chapman profiles. **Academia Brasileira de Ciências**, vol. 89, 2017. pp. 1531-1542
- SAYIN, I.; ARIKAN, F.; ARIKAN, O. Regional TEC mapping with random field priors and kriging. **Radio Science**, vol. 43, n. 5, 2008. pp. 1-14
- SILVA, H. R.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M. Análise do desempenho do RTK em rede no Brasil sob efeito da cintilação ionosférica. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 68, 2016. pp. 2083-2102

- SLOCUM, T. A. **Thematic cartography and visualization**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- UPTON, G.J.G., FINGLETON, B. **Spatial data analysis by example – volume I – point pattern and quantitative data**. Chichester: John Wiley & sons, 1985.
- VAN DIERENDONCK, A. J.; KLOBUCHAR, J.; HUA, Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. **Proceedings of the Institute of Navigation**, Alexandria, 1993. pp. 1324-1333.
- VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: the ISMR query tool. **Computers & Geosciences**, vol. 104, 2017. pp. 125-134
- WANNINGER, L. Ionospheric monitoring using IGS data. **1993 IGS Workshop**, Berne, 1993. pp. 351-360
- WIELGOSZ, P.; GREJNER-BRZEZINSKA, D.; KASHANI, I. Regional ionosphere mapping with kriging and multiquadric methods. **Journal of Global Positioning Systems**, vol. 2, n. 1, 2003. pp. 48-55