



***CARACTERIZAÇÃO DE BOLHAS DE PLASMA
IONOSFÉRICAS A PARTIR DE RECEPTORES DE GNSS.***

Anna Carollyne Dantas de Lima¹, Igo Paulino²

RESUMO

O presente relatório refere-se às atividades desenvolvidas no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), sob a orientação do Prof. Dr. Igo Paulino. O projeto em questão concentra-se no estudo acerca do fenômeno de bolhas de plasma ionosféricas a partir de receptores de GNSS, sobretudo, foram estudados e analisados arquivos gerados pelo monitor de cintilação ionosférica denominado ScintPi.

O ScintPi é um monitor de baixo custo projetado para questões científicas relacionadas a irregularidades ionosféricas, fornecendo informações relevantes, tais como o TEC (Conteúdo Total de Elétrons), índices S4, grau de elevação do satélite, entre outras informações úteis. Além disso, o ScintPi é capaz de receber sinais de múltiplas constelações GNSS, incluindo GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo.

Desse modo, o estudo tem como objetivo a identificação e análise de irregularidades ionosféricas captadas por receptores GNSS, especialmente no dia do eclipse ocorrido em 14 de outubro de 2023, a fim de identificar pontos importantes acerca das irregularidades nos dias anteriores e posteriores ao eclipse, bem como durante.

Palavras-chave: TEC, irregularidades, bolhas de plasma.

¹Aluno de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: anna.carollyne.lima@ee.ufcg.edu.br

²Doutor, Professor, Unidade Acadêmica de Física, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: igo.paulino@df.ufcg.edu.br

CHARACTERIZATION OF IONOSPHERIC PLASMA BUBBLES FROM GNSS RECEIVERS.

ABSTRACT

This report refers to the activities carried out under the Institutional Scientific Initiation Scholarship Program (PIBIC), under the guidance of Prof. Dr. Igo Paulino. The project in question focuses on the study of the phenomenon of ionospheric plasma bubbles from GNSS receivers. In particular, files generated by the ionospheric scintillation monitor called ScintPi were studied and analyzed.

ScintPi is a low-cost monitor designed for scientific questions related to ionospheric irregularities, providing relevant information such as TEC (Total Electron Content), S4 indices, satellite elevation degree, among other useful information. In addition, ScintPi is capable of receiving signals from multiple GNSS constellations, including GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo.

The study thus aims to identify and analyze ionospheric irregularities captured by GNSS receivers, especially on the day of the eclipse on October 14, 2023, in order to identify important points about irregularities on the days before and after the eclipse, as well as during it.

Keywords: TEC, irregularities, plasma bubbles.

INTRODUÇÃO

O projeto em questão concentra-se no estudo acerca do fenômeno de bolhas de plasma ionosféricas a partir de receptores de GNSS, sobretudo, foram estudados e analisados arquivos gerados pelo monitor de cintilação ionosférica denominado ScintPi.

O ScintPi é um monitor de baixo custo projetado para questões científicas relacionadas a irregularidades ionosféricas, fornecendo informações relevantes, tais como o TEC (Conteúdo Total de Elétrons, do Inglês “Total Electron Content”), índices S4, grau de elevação do satélite, entre outras informações úteis. Além disso, o ScintPi é capaz de receber sinais de múltiplas constelações GNSS, incluindo GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo.

Desse modo, o ScintPi permitiu o acompanhamento contínuo das variações ionosféricas, viabilizando a análise dos comportamentos e irregularidades observados. Além disso, as análises e dados conduzidos por Gopi K Seemala e Chandan Kapil (2023) também tiveram grande importância na interpretação dos dados.

Sendo assim, a pesquisa visa aprimorar o estudo dos dados gerados pelo ScintPi, de modo a estimular a plotagem de gráficos a fim de uma melhor visualização, além de se tornar possível fazer comparações com os dados gerados por versões anteriores e notar as maiores diferenças e avanços quanto às limitações anteriores.

Logo, este relatório tem como objetivo apresentar o estudo que abrange desde a fundamentação teórica sobre o fenômeno das bolhas de plasma até a análise dos gráficos gerados por meio da linguagem de programação Python. O estudo se baseia em trabalhos anteriores conduzidos por Josemaría et. al (2024), que contribuíram para o desenvolvimento das análises. Assim, este relatório parcial representa um bom avanço para a compreensão de fenômenos ionosféricos, validando também a eficiência do monitor ScintPi, reforçando a aplicabilidade desses monitores como ferramentas acessíveis e eficazes para pesquisas nessa área específica, comprovando sua utilidade em estudos de ionosfera e fenômenos correlacionados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As irregularidades no plasma da região F são caracterizadas como regiões com densidade de plasma reduzida, são um dos fenômenos mais importantes na região da ionosfera, e, quando ocorrem em grande escala, são denominadas como bolhas de plasma ionosféricas. As bolhas de plasma começaram a ser estudadas na década de 80 no Brasil. O estudo acerca desse fenômeno é muito importante para se entender os processos dinâmicos da alta atmosfera, sendo um elemento importante para a previsão do clima espacial, e, assim, essencial para o planejamento de atividades espaciais [Paulino et al. 2007]

Os principais mecanismos que explicam a geração e surgimento das bolhas de plasma são os fenômenos Rayleigh-Taylor, instabilidade entre materiais que ocorre quando um fluido leve empurra um mais denso, e a deriva ExB, que ocorre quando os campos elétrico e magnético não estão alinhados, conforme descrito por Haerendel (1973) e Reid (1968). Devido à deriva ExB, durante o dia, a ionosfera equatorial se desloca para cima, de modo que, durante a noite, a direção do campo elétrico é invertida, resultando no movimento descendente do plasma ionosférico. Este processo induz instabilidades na ionosfera que levam ao surgimento das bolhas de plasma, junto com outros fatores como sazonalidade, os mecanismos, a variabilidade dia-a-dia e a interação com ondas de gravidade e ondas de escalas planetárias.

As bolhas de plasma são observadas em altitudes de 200 a 1000 km e começam a se desenvolver na região equatorial da ionosfera após o pôr-do-sol, possuindo dimensões variadas, abrangendo desde dezenas até milhares de quilômetros. Devido a essa variedade dimensional das irregularidades, diferentes técnicas são empregadas para estudo e detecção. Entre essas técnicas, destacam-se radares de espalhamento coerente, utilizados para detectar irregularidades na faixa de 10 m a 700 km; radares de espalhamento incoerente, para irregularidades entre 10 km e 700 km, lançamento de foguetes, utilizados para estudar áreas entre 1 m e 100 km e observações por satélites, que são úteis para detectar dimensões de 1 m a 1000 km. Além disso, as análises de luminescência atmosférica e ionossondas, são utilizadas para investigar regiões entre 7 km e 700 km, além de outras abordagens.

A ocorrência de bolhas de plasma ionosféricas é mais frequente em regiões equatoriais, como na região brasileira. Além disso, análises estatísticas indicam que

essas irregularidades são menos frequentes nos meses de maio a agosto e mais frequentes nos meses de outubro a março, sendo esta variação de frequência associada aos períodos de maior atividade solar.

Além disso, estudos sobre a velocidade horizontal das bolhas de plasma na região tropical revelaram que, durante a noite, as bolhas tendem a se mover para o leste, com maior velocidade durante as primeiras horas da noite. Entretanto, após a meia-noite, essa velocidade diminui gradualmente. Durante tempestades geomagnéticas intensas, as bolhas de plasma tendem a deslocar-se para oeste, devido aos efeitos da penetração de campos elétricos de altas latitudes, correlacionados com um aumento na atividade magnética.

A detecção de bolhas de plasma pode ser feita de várias maneiras, como com a utilização de ionossondas, foguetes, imageadores "all-sky" e também com sensores e receptores GNSS (Global Navigation Satellite System), assim, sendo possível realizar a análise de parâmetros como o TEC (Total Electron Content) e índice de cintilação (S4).

É importante estudar e entender como as bolhas de plasma ionosféricas se comportam, visto que são responsáveis por causar interferências nos sinais de satélites, afetando sistemas de comunicação e navegação por satélite. As irregularidades no TEC podem induzir cintilações nos sinais, resultando em perda de sinal ou degradação significativa da precisão. [Kintner et al. 2007].

METODOLOGIA

Esta seção detalha como foram feitas todas as análises de gráficos para detecção da variação do TEC, além dos níveis dos índices S4, e do grau de elevação do satélite no momento da captura dos dados. O código foi desenvolvido em Python, com base no trabalho pioneiro de Gomez Socola e Rodrigues (2022).

Uma das principais motivações para o estudo de métodos para a análise dos dados se dá na ampliação da acessibilidade a medições, que possibilita tanto o monitoramento quanto estudos aprofundados de irregularidades e de cintilação ionosférica. Desse modo, nesse espaço serão destacadas algumas medições de perturbações ionosféricas realizadas.

Para ilustração dos resultados, os gráficos das figuras abaixo contém informações construídas a partir dos dados coletados pelo ScintPi 3.0, localizado em Campina Grande (CG). Na figura 1, é possível observar o ScintPi 3.0, ao lado de

suas duas versões anteriores, ScintPi 2.0 e ScintPi 1.0, todas mantendo sua comunicação através de um Raspberry Pi 3 Modelo B+.



Figura 1 –Versões do ScintPi. O ScintPi 1.0 foi descrito por (RODRIGUES; MORAES, 2019), já o ScintPi 2.0 e 3.0 são descritos por SOCOLA; RODRIGUES, (2022).

O Conteúdo Total de Elétrons (TEC) consiste no número total de elétrons ao longo do caminho entre um transmissor de rádio e um receptor, e é um importante parâmetro para monitorar impactos climáticos espaciais em comunicação terra-satélite e navegação por satélite. A unidade de medida utilizada é elétrons por metro quadrado (TECU), e seu valor varia de acordo com fatores como radiação solar, tempestades geomagnéticas e condições atmosféricas. É possível notar, também, grande modificação do TEC em dias em que ocorrem eclipses solares, visto que os eclipses possuem um grande impacto na ionosfera, de modo a se perder ionização pela falta de radiação solar no horário do eclipse máximo (Bamford, 2001; Stankov et al., 2017; Verhulst et al., 2016).

Sendo assim, durante eclipses solares, é possível notar uma grande modificação no TEC, de modo a reduzir bastante. O primeiro pico de redução pode estar relacionado a um grande fluxo de plasma inter-hemisférico em direção ao norte, como foi relatado em outros estudos sobre eclipses. Já o segundo pico de redução do TEC é observado após o horário de término do eclipse, podendo estar associado à evolução temporal do efeito equatorial que se torna dominante devido à fraqueza do fluxo inter-hemisférico deduzido pela

tendência de simetria do TEC. Desse modo, a diminuição do TEC mostra uma dependência linear da porcentagem de obscurecimento causado pelo eclipse. Além disso, a resposta ionosférica do TEC induzido pelo eclipse tem uma dependência latitudinal, com a redução do TEC sendo geralmente menor nas latitudes mais baixas do que nas latitudes médias, conforme mencionado por Le et al. (2009).

Para o cálculo dos parâmetros TEC, podem ser utilizadas as equações demonstradas abaixo, em que é possível ver que o conteúdo total de elétrons inclinado, STEC, é calculado como um integral que varia ao longo do caminho entre um satélite GPS (Tx) e um receptor terrestre (Rx), em que N é a densidade de elétrons dependente da localização e l é a direção do receptor para o satélite.

Além disso, cada satélite usado para posicionamento GPS transmite duas frequências de banda L (L1 e L2). Quando o sinal GPS se propaga pela ionosfera, um receptor GPS de frequência dupla mede a diferença no atraso ionosférico entre o sinal L1 e L2, que é usado para obter o valor TEC conforme declarado em Bagiya et al. (2009). Já o TEC vertical equivalente (VTEC) é calculado com a projeção do STEC, conforme descrito na equação.

$$STEC = \int_{Rx}^T N dl$$

$$STEC = \frac{1}{40.3} \times \left[\frac{1}{L1^2} - \frac{1}{L2^2} \right]^{-1} \times (P1 - P2) + TEC_{CAL}$$

$$VTEC = STEC \times \cos \chi$$

$$\cos \chi = \sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_E + h} \cos \theta \right)^2}$$

Portanto, é evidente que alterações na ionosfera influenciam a propagação de ondas de rádio, e o tempo de atraso de uma onda de rádio está relacionado tanto à frequência quanto ao TEC entre o transmissor e o receptor. Essas flutuações ionosféricas exercem um impacto significativo na precisão dos sistemas de navegação por satélite, como o GPS/GNSS, e até mesmo transmissões de rádio, que, enquanto estão em pico de radiação solar, conseguem se locomover por distâncias menores. Desse modo, é essencial levar em consideração essas variações ionosféricas para evitar grandes erros nos cálculos de posição.

Os sinais registrados pelos receptores GNSS são codificados usando sequências de ruído pseudo aleatório (PRN), que são códigos que cada satélite transmite para se diferenciar de outros satélites. Na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), os monitores ScintPi 3.0 podem decodificar sinais dos satélites geoestacionários Astra-5B (PRN123) e Astra Ses-5 (PRN136).

Desse modo, o ScintPi se mostrou eficiente para a observação e análise dessas informações sobre a ionosfera. O ScintPi gera dados de arquivos HDF5 (.h5), que é uma extensão capaz de armazenar e manipular grandes volumes de dados, o formato de arquivo HDF5. Para acessar e manipular esses dados, foi utilizada a biblioteca “h5py” do Python, que possibilita a leitura e escrita de arquivos no formato HDF5. Com h5py, é possível tratar os arquivos HDF5 como se fossem dicionários do Python, onde os datasets são acessados de forma semelhante a listas do NumPy.

Ainda, para tornar possível a visualização dos dados extraídos, foi empregada a biblioteca “matplotlib”, reconhecida para a criação de gráficos e visualizações de dados. Com o uso da biblioteca, foi possível plotar os dados presentes nos arquivos gerados pelo ScintPi (TEC, índices S4, etc.) em forma de gráficos, facilitando a análise e a apresentação dos resultados obtidos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos de acordo com as atividades realizadas e objetivos implementados, avaliando a eficiência do ScintPi de acordo com os dados coletados.

As figuras 1, 2 e 3 detalham o valor do TEC, em unidades de TEC, obtidos com o analisador ScintPi. Em dias normais, o TEC segue padrões típicos influenciados pelo ciclo diário da atividade solar (com maior TEC durante o dia e menor à noite), além de variações sazonais e de ciclo solar. Entretanto, os dados analisados foram coletados em dias específicos, ou seja, são dados referentes ao dia anterior, durante, e posterior ao dia do eclipse ocorrido em 14 de outubro de 2024. Durante um eclipse solar, a sombra da Lua bloqueia parte da radiação ultravioleta, impactando em alterações na ionosfera, visto que esta utiliza radiação solar para ionizar suas partículas. Sendo assim, a redução da radiação solar leva a uma diminuição na produção de elétrons, causando uma queda temporária no TEC nas regiões afetadas pelo eclipse.

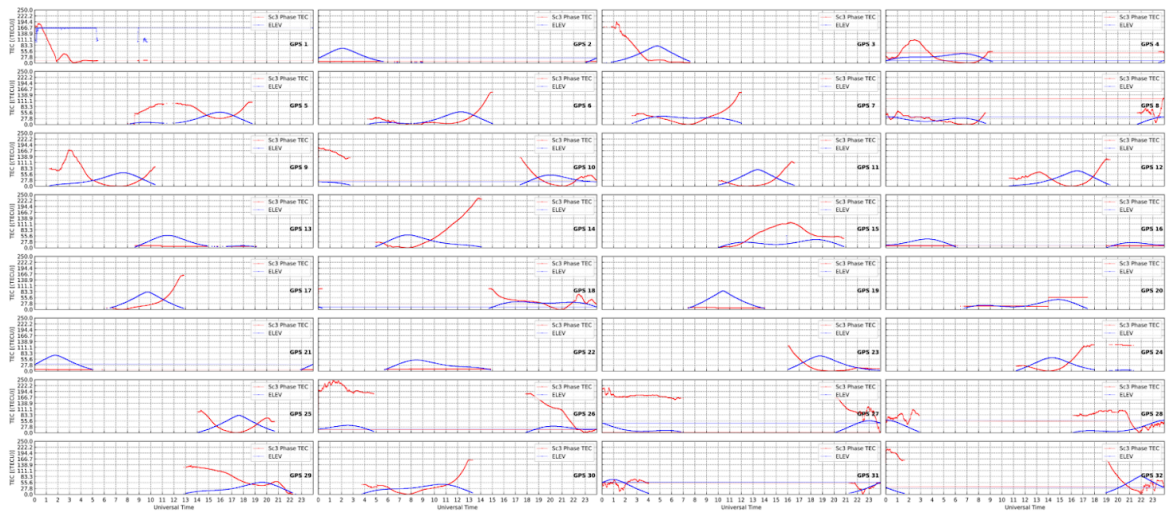


Figura 2: Resumo das medições do TEC feitas pelo ScintPi 3.0 (curvas vermelhas) e grau de elevação (curvas azuis) em 13 de outubro de 2023.

Esses monitores foram colocados em Presidente Prudente (PPR), Brasil. As curvas azuis representam a elevação do satélite. A constelação e o número do identificador do satélite são indicados em cada painel.

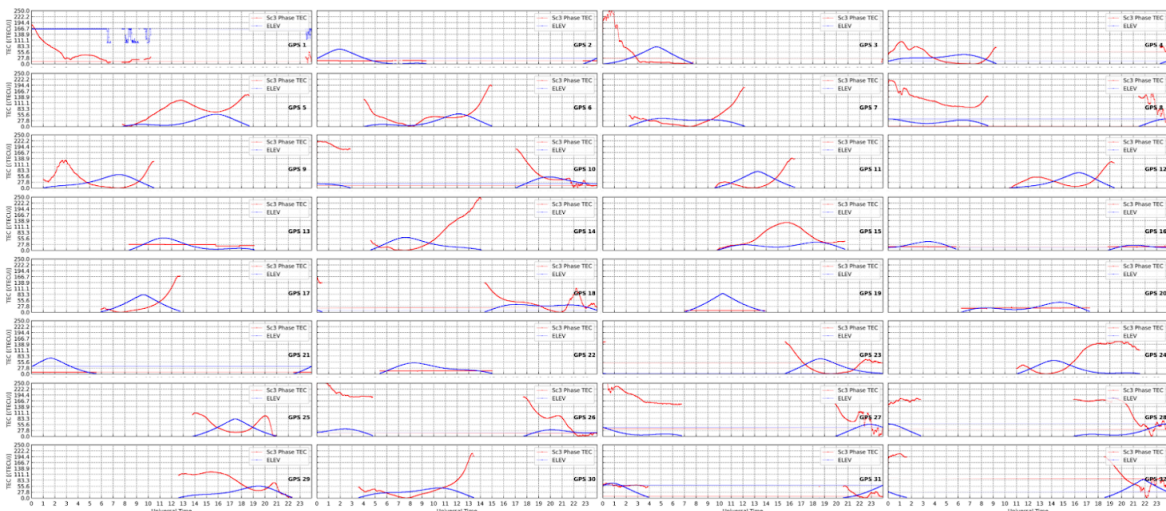


Figura 3: Resumo das medições do TEC feitas pelo ScintPi 3.0 (curvas vermelhas) e grau de elevação (curvas azuis) em 14 de outubro de 2023.

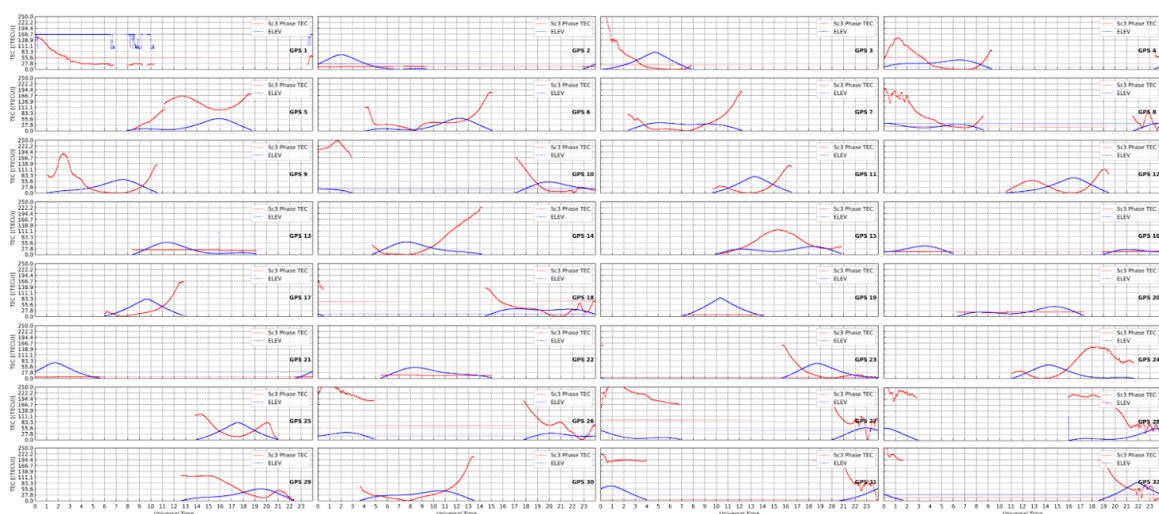


Figura 4: Resumo das medições do TEC feitas pelo ScintPi 3.0 (curvas vermelhas) e grau de elevação (curvas azuis) em 15 de outubro de 2023.

Durante a análise dos dados obtidos através dos arquivos lidos, foi identificado que, em cada dia de coleta, algumas PRNs apresentavam dados com imprecisões significativamente elevadas. Essa imprecisão era evidente mesmo após a aplicação do método de correção BIAS, que tem como objetivo ajustar os dados e melhorar a precisão das medições. Logo, para garantir a qualidade e a confiabilidade dos gráficos gerados, para cada dia foram removidas certas PRNs estratégicas do conjunto de dados utilizado para a plotagem, visando evitar distorções nos resultados e assegurar que as análises representassem o comportamento real do TEC. Na figura 5, é possível notar os gráficos dos dias 13, 14 e 15 de outubro, respectivamente, com a remoção de PRNs específicas.

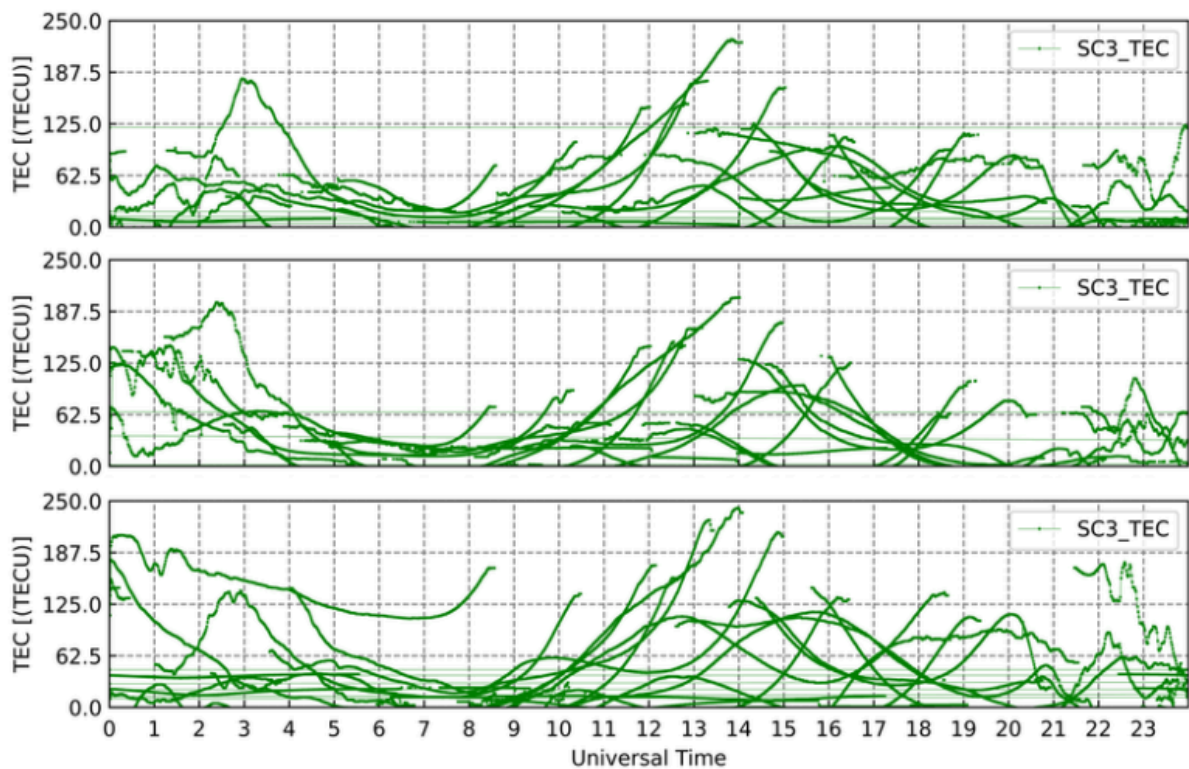


Figura 5: Dados referentes ao TEC (com ajustes do BIAS) dos dias 13, 14 e 15 de outubro, respectivamente. Remoção dos PRNs 1, 3, 10, 26, 27, e 32 para o dia 13. Remoção dos PRNs 4, 10, 26, 27, 28 e 32 para o dia 14. Remoção dos PRNs 3, 10, 26, 27, 28 e 32 para o dia 15.

Também foi realizado o cálculo da média diária do TEC utilizando os dados filtrados, dos quais foram removidas as mesmas PRNs identificadas como imprecisas. Após a aplicação desses filtros, os dados restantes foram utilizados para calcular a média do TEC ao longo do dia. O resultado deste cálculo está representado na figura 6, em que se observa a variação média do TEC ao longo do dia, com base nos dados ajustados. Os valores do TEC foram obtidos conforme o esperado durante a análise dos gráficos, demonstrando um pico significativo durante o período diurno, especialmente nas horas de maior atividade solar, visto que é o momento de maior ionização na ionosfera, com aumento na densidade eletrônica.

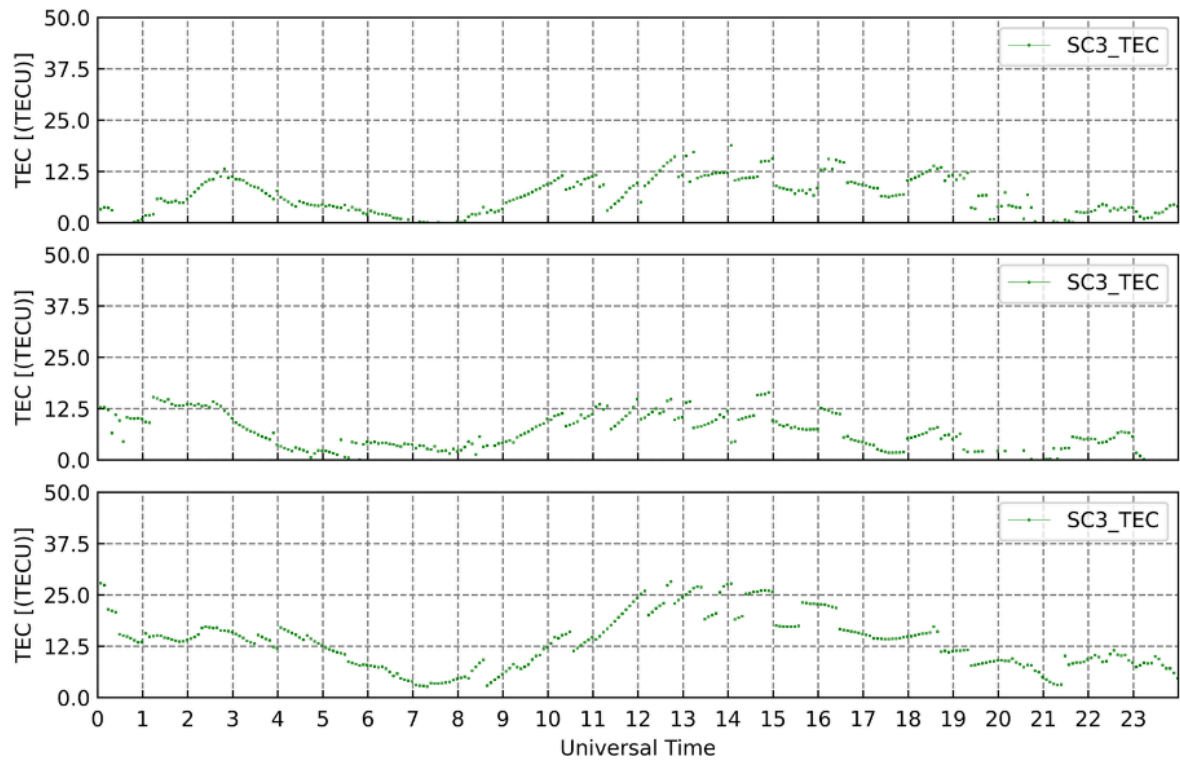


Figura 6: Variação do TEC ao longo de 24 horas, nos dias 13, 14 e 15 de outubro, respectivamente.

Os índices S4, utilizados para quantificar a intensidade da cintilação ionosférica em sinais de satélite, também foram avaliados a partir da plotagem de seus sinais. Valores mais elevados indicam maior degradação do sinal. O valor dos índices S4 varia de 0 a 1, em que valores próximos a 0 representam um sinal estável, enquanto valores mais próximos de 1 podem resultar em perda temporária de sinal ou erros em medições de posicionamento. As Figuras 7, 8 e 9 apresentam a análise dos índices S401 e S402, correspondentes aos sinais L1 e L2 do receptor, respectivamente. A avaliação dos parâmetros evidencia que os valores dos índices S4 tendem a se aproximar de 0, o que indica uma boa precisão nos dados recebidos. É possível notar, através da análise das figuras abaixo, que os PRNs excluídos da análise do TEC são aqueles que apresentam os menores índices de precisão nos dados S4 obtidos.

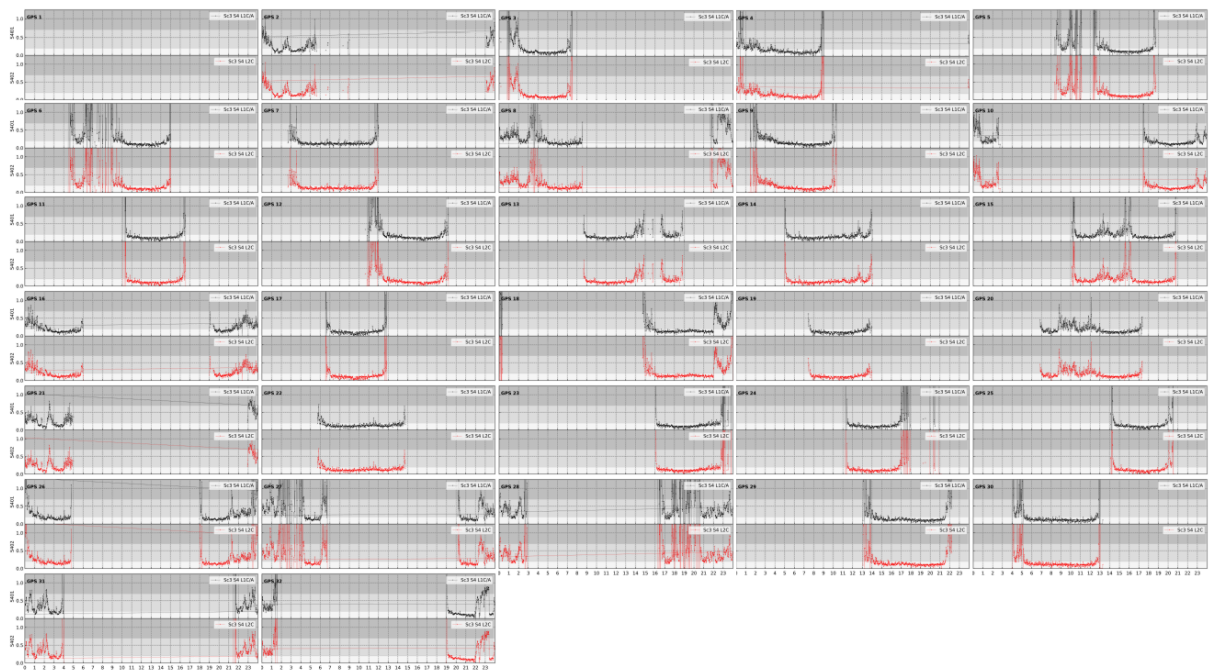


Figura 7: Índices S401 e S402 referentes ao dia 13 de outubro de 2023.

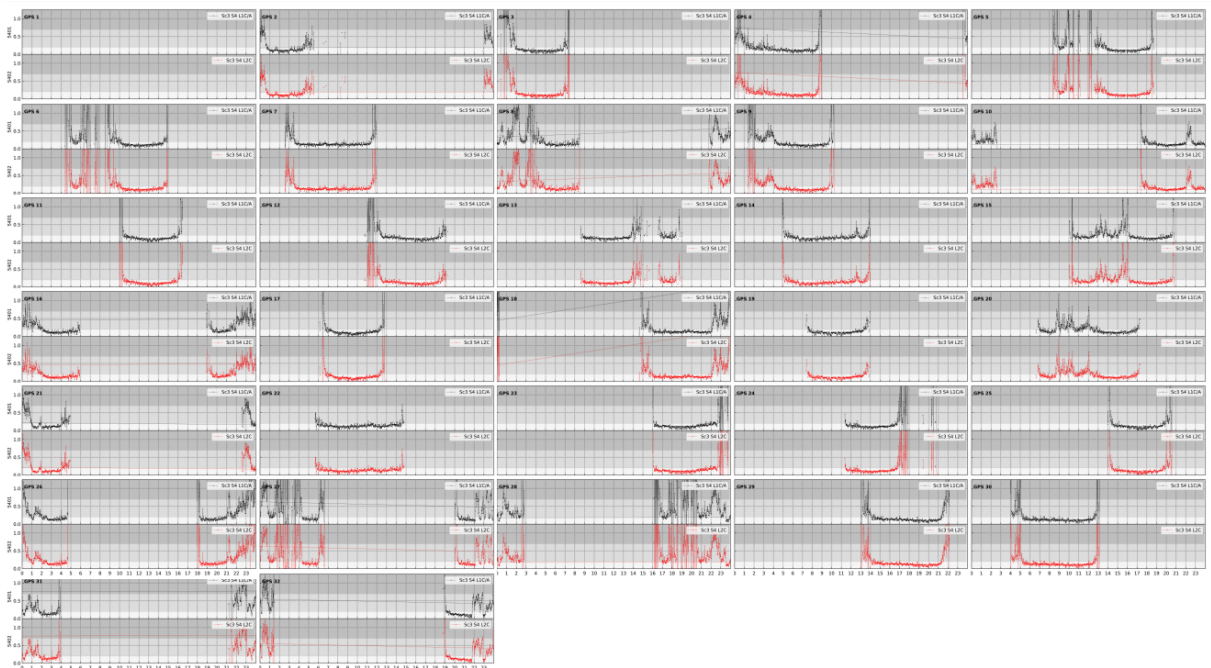


Figura 8: Índices S401 e S402 referentes ao dia 14 de outubro de 2023.

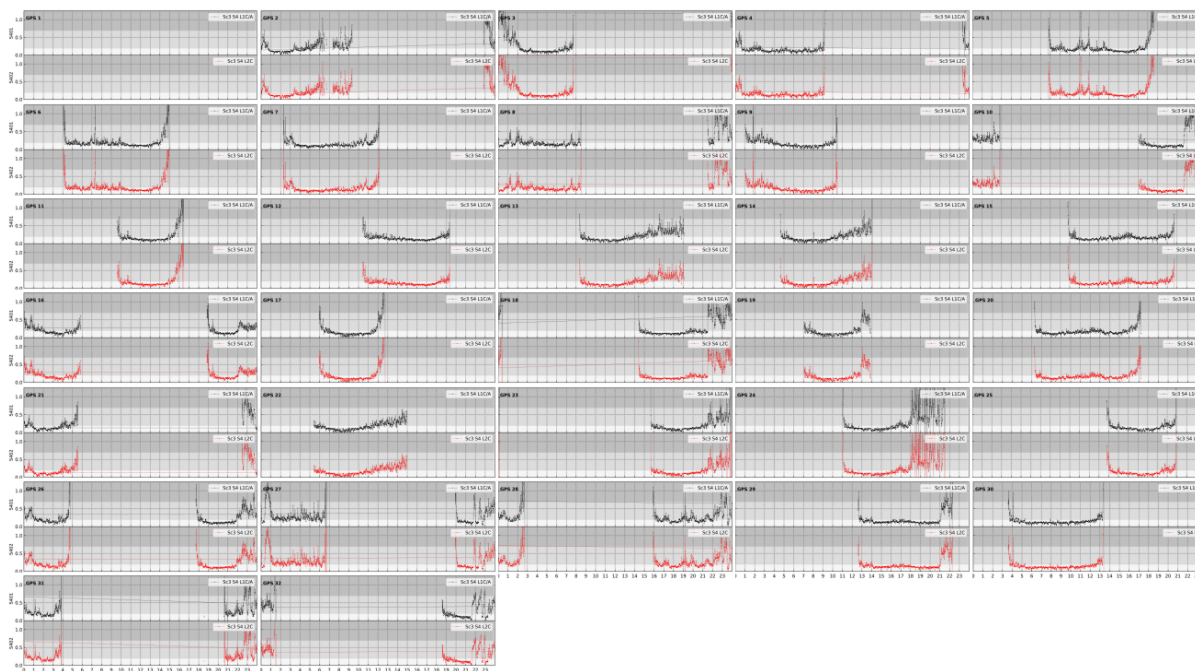


Figura 9: Índices S401 e S402 referentes ao dia 14 de outubro de 2023.

CONCLUSÃO

Assim, é possível concluir que o estudo das bolhas de plasma ionosféricas, bem como de outras irregularidades ionosféricas, é fundamental para a compreensão dos fenômenos que ocorrem na alta atmosfera, permitindo o desenvolvimento de estratégias que minimizem seus impactos em aplicações críticas, como sistemas de comunicação e navegação por satélite.

Foi, ainda, possível comprovar a utilidade do ScintPi na observação de fenômenos ionosféricos, visto que este permitiu o monitoramento de dados como o TEC e os índices S4, por exemplo. A análise desses dados revelou a eficácia do ScintPi como uma ferramenta acessível e eficaz para a coleta de informações sobre as irregularidades na ionosfera.

A análise dos dados obtidos mostrou que, ao remover PRNs com menor precisão, é possível garantir uma interpretação mais fiel do comportamento ionosférico, esperando-se que o resultado seja o mais preciso possível, contribuindo, assim, para a previsão de distúrbios ionosféricos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho do programa PIBIC/CNPq-UFCG foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

REFERÊNCIAS

SOCOLA, J. G.; RODRIGUES, F. S. Scintpi 2.0 and 3.0: low-cost gnss-based monitors of ionospheric scintillation and total electron content. *Earth, Planets and Space*, Springer, v. 74, n. 1, p. 185, 2022.

Verhulst, T. G. W., & Stankov, S. M. Height dependency of solar eclipse effects: The ionospheric perspective. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, p. 125, 2020.

Reid, G. C., The formation of small-scale irregularities in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 73(5), 1627–1640, 1968.

Paulino, Igo & Medeiros, A. & Buriti, Ricardo & Takahashi, Hisao. Preliminary study of ionospheric plasma bubble zonal drifts using five years of OI 630 nm airglow images data, 2007.

Lloyd, K. H., and G. Haerendel, Numerical modeling of the drift and deformation of ionospheric plasma clouds and of their interaction with other layers of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 78(31), 1973.

Bamford, Ruth. The effect of the 1999 total solar eclipse on the ionosphere. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 2001.

Tobias G.W. Verhulst, Danislav Sapundjiev, Stanimir M. Stankov, High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements, *Advances in Space Research*, Volume 57, Issue 11, Pages 2407-2419, 2016.

Silva, D. B. Formação e desenvolvimento de bolhas de plasma na ionosfera equatorial: observação e simulação. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

Socola, Josemaria & Rodrigues, Fabiano & Wrigth, Isaac & Paulino, Igo & Buriti, Ricardo. ScintPi measurements of low-latitude ionospheric irregularity drifts using the spaced-receiver technique and SBAS signals, 2024.

Kintner, P. M., B. M. Ledvina, and E. R. de Paula, GPS and ionospheric scintillations, Space Weather, 5, S09003, 2007

Chandan Kapil, Gopi K. Seemala, Machine learning approach for detection of plasma depletions from TEC, Advances in Space Research, Volume 73, Issue 7, Pages 3833-3844, 2024.