



Rádio Ocultação GNSS: Revisão Teórica, Missões e Produtos

GNSS Radio Occultation: a Review of the Theory, Missions, and Products

Gabriel Oliveira Jerez ¹, Daniele Barroca Marra Alves ², Raphael Silva Nespolo ³, João Francisco Galera Monico ⁴ e Manuel Hernández-Pajares ⁵

¹ Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. gabriel.jerez@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6893-2144>

² Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. daniele.barroca@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9033-8499>

³ Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. raphael.nespolo@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3696-1359>

⁴ Universidade Estadual Paulista, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil. galera.monico@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4101-9261>

⁵ *Universitat Politècnica de Catalunya*, Departamento de Matemática, Barcelona, Espanha. manuel.hernandez@upc.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9687-5850>

Recebido: 12.2021 | Aceito: 09.2022

Resumo: A rádio ocultação (RO) começou a ser utilizada para a sondagem da atmosfera de outros planetas a partir da década de 1960. Com o desenvolvimento do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e de missões com satélites de baixa órbita (*Low Earth Orbit* - LEO) surgiu a possibilidade de investigações da atmosfera terrestre com a aplicação da RO-GNSS. Dos satélites transmissores GNSS até os receptores instalados nos satélites LEO, os sinais propagados sofrem diferentes tipos de influência da atmosfera. O sinal transmitido é refratado e, com isso, pode ser coletado pelo receptor embarcado no LEO, apesar da obstrução pela Terra. Essa geometria possibilita o cálculo dos índices de refração, os quais possuem informações da composição da atmosfera terrestre. Entre os perfis obtidos a partir do índice de refração, destacam-se os de temperatura, pressão e densidade de elétrons. No presente trabalho é realizada uma revisão teórica da técnica de RO-GNSS, com o intuito de apresentar a técnica e seu potencial a pesquisadores de diversas áreas que tenham possibilidade de utilizá-la. Primeiramente é apresentado um breve histórico do desenvolvimento da técnica, bem como as principais missões relacionadas ao tema, incluindo a situação de missões atualmente em operação e algumas perspectivas futuras. Além disso, são apresentados os principais elementos envolvidos na geometria da ocultação, bem como os principais conceitos e formulações para a obtenção dos perfis. Por fim, alguns produtos provenientes de missões de RO-GNSS são apresentados e analisados.

Palavras-chave: Rádio ocultação. GNSS. Atmosfera. Perfis Atmosféricos.

Abstract: Radio occultation (RO) have been used for probing the atmosphere of other planets since the 1960s. With the development of *Global Navigation Satellite System* (GNSS) and missions with *Low Earth Orbit* (LEO) satellites emerged the possibility of investigations of the Earth's atmosphere with the application of RO-GNSS. From the GNSS satellites to the receivers onboard LEO satellites, the propagated signals are influenced by the atmosphere in different ways. The transmitted signal is refracted, so it can be collected by the onboard receiver in spite of the superposition made by the Earth. This geometry makes it possible to calculate refractive indices, which contain information about the composition of the Earth's atmosphere. Several profiles can be obtained from the refractive index, for instance temperature, pressure, and electron density. In this paper a theoretical review of the GNSS-RO technique is carried out, aiming to present the technique and its potential to researchers from various areas who have the possibility of using it. First, a brief history of the development of the technique is presented, as well as the main missions related to this topic, including the status of missions currently operational and some future perspectives. In addition, the main elements involved in the occultation geometry are presented, as well as the main concepts and formulations for obtaining the profiles. Finally, some products from RO-GNSS missions are presented and analyzed.

Keywords: Radio occultation. GNSS. Atmosphere. Atmospheric profiles.

1 INTRODUÇÃO

Na astronomia, a ocultação é o fenômeno pelo qual um corpo celeste deixa de ser visto em razão da obstrução por outro. A técnica começou a fazer parte de missões para exploração e sondagem das atmosferas planetárias ainda na década de 1960 (FJELDBO; ESHLEMAN, 1968; 1969; HOLZSCHUH; SAPUCCI; MONICO, 2010). Com o advento do *Global Navigation Satellite System* (GNSS), com o desenvolvimento do *Global Positioning System* (GPS), e das missões com satélites *Low Earth Orbit* (LEO), a técnica de rádio ocultação GNSS (RO-GNSS) se tornou uma importante ferramenta para investigações da atmosfera terrestre.

A RO-GNSS parte do princípio de que os sinais enviados pelos satélites GNSS e recebidos nos satélites LEO sofrem os efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera ao atravessarem essas camadas, afetando a fase, a amplitude e a pseudodistância dos sinais (KURSINSKI et al., 2000). A refração sofrida pela propagação do sinal permite o cálculo dos índices de refração, que possuem diversas informações da composição da atmosfera terrestre. A partir desses índices é possível extrair perfis como de umidade, pressão, temperatura e densidade de elétrons (KURSINSKI et al., 2000; HAJJ et al., 2002).

Em 1995 foi lançada a missão *GPS-Meteorology* (GPS/MET) com o objetivo de provar o conceito da técnica e, desde então, diversas missões foram desenvolvidas incluindo receptores para RO-GNSS. Uma das mais recentes foi a missão *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate* (COSMIC), lançada em 2006 como missão experimental, mas que resultou em dados operacionais. Devido ao sucesso da missão original, atualmente está em operação a missão COSMIC-2. Além de proporcionar melhor cobertura da região equatorial, os satélites da nova missão coletam não apenas dados da constelação GPS, mas também do *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS) e do Galileo (COSMIC, 2021).

O lançamento de novas constelações GNSS e LEO com receptores de RO-GNSS aumenta consideravelmente a quantidade e o potencial de aplicações da técnica em diversas áreas, como Meteorologia, Aeronáutica e Geodésia. A RO-GNSS pode ser empregada, por exemplo, na previsão numérica do tempo (PNT), na detecção de mudanças climáticas, prevenção de desastres naturais, recuperação do conteúdo total de elétrons (*Total Electron Content* - TEC), entre outros (HAJJ et al., 2002).

Estudos sobre a dinâmica da atmosfera são complexos e de extrema relevância, especialmente quando são consideradas as condições atmosféricas de regiões como a do território brasileiro. O Brasil apresenta características bastante distintas devido às suas dimensões continentais, à presença da floresta amazônica e à sua localização em região equatorial (relacionada a uma intensa atividade ionosférica). Com isso, tanto a camada atmosférica neutra quanto a ionizada apresentam significativa variabilidade (MUELLA et al., 2011; ALVES et al., 2016; TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). Logo, investigações e modelagens dessas camadas se tornam particularmente desafiadoras.

Considerando técnicas convencionais, como estações meteorológicas, estações GNSS, ionossondas ou radiossondas, entre outras, existe limitação em relação a regiões de difícil acesso, como montanhas, matas e oceanos. No caso das radiossondas (atmosfera neutra) e ionossondas (ionosfera), que realizam medições *in loco*, existem também limitações relacionadas ao número de observações e ao custo. No caso das radiossondas, as medições são dependentes dos seus lançamentos, que ocorrem em regiões específicas, com frequência de uma a duas vezes por dia. Já as ionossondas, apesar de possuírem estações fixas e medições mais constantes, assim como as radiossondas, consistem em uma técnica de alto custo. Uma das principais vantagens da RO-GNSS é a homogeneidade da distribuição das observações, visto que essa técnica depende dos satélites GNSS e receptores embarcados nos satélites LEO, e a cobertura está relacionada à geometria e inclinação das órbitas dos satélites. Com isso, devido à distribuição mais uniforme e com observações constantes, a RO-GNSS é capaz de suprimir lacunas deixadas por outras técnicas (KURSINSKI et al., 1997). E, assim, apresenta o potencial de beneficiar modelos atmosféricos a partir da assimilação de dados de diferentes técnicas, considerando a atmosfera neutra, como em modelos de PNT (CUCURULL et al., 2007; APARICIO; DEBLONDE, 2008; SAPUCCI et al., 2014; 2016), e a ionosfera (ANGLING; CANNON, 2004; AA et al., 2016; PROL et al., 2018a; 2018b).

Considerando o potencial da técnica, bem como o desenvolvimento de novas missões, fica evidente a importância da RO-GNSS para diversas áreas de aplicação. Com isso, o presente trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão teórica dos principais conceitos e elementos envolvidos na técnica, incluindo as

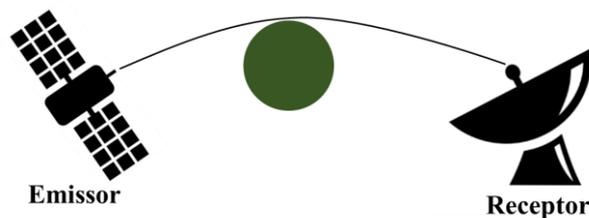
principais missões desenvolvidas, formulações relacionadas e alguns produtos atualmente disponíveis. O trabalho está estruturado em 5 seções, a seção 2 apresenta um breve histórico do desenvolvimento da RO-GNSS e as primeiras missões realizadas, já na seção 2.1 são apresentadas as principais missões de RO-GNSS desenvolvidas para o estudo da atmosfera terrestre, incluindo missões atualmente em andamento e algumas perspectivas futuras. Na seção 3 é apresentada a teoria envolvida na RO-GNSS, na seção 3.1 é abordada a geometria de uma ocultação e os principais elementos envolvidos, na sequência, a seção 3.2 apresenta as formulações envolvidas na recuperação de perfis atmosféricos e a 3.3 os perfis ionosféricos. A seção 4 apresenta alguns produtos derivados da RO-GNSS e, por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais.

2 HISTÓRICO

No final da década de 1950 a ocultação já era utilizada para o estudo da atmosfera de planetas do sistema solar. Nesses primeiros estudos era utilizada a ocultação de estrelas para o cálculo de parâmetros, como posição do centro dos planetas e componentes atmosféricos. Em Menzel e de Vaucouleurs (1960) são apresentadas as observações realizadas, por pesquisadores em observatórios de diferentes localidades, em relação ao aparecimento e oclusão da estrela Régulo utilizando referência de tempo. Com as observações de curvas luminosas fotoelétricas registradas e de informações complementares, foi possível estimar as coordenadas do centro de Vênus em relação à Régulo. Além disso, foram estimados valores de pressão da atmosfera do planeta, compatíveis com modelos atmosféricos da época.

Com a evolução tecnológica e a exploração espacial, a RO também evoluiu. Fjeldbo et al. (1965) avaliou a possibilidade de estudos da ionosfera de outros planetas propondo um método de ocultação utilizando um sistema de radar biestático a partir da propagação de ondas de rádio entre um veículo espacial e a Terra. Um sistema de radar biestático é composto por um receptor localizado em local diferente do emissor (Figura 1).

Figura 1 – Sistema de radar biestático.



Elaboração: Os Autores (2022).

Com o lançamento de missões de programas como *Mariner* e *Pioneer*, foi possível o desenvolvimento de diversas pesquisas relacionadas ao estudo da atmosfera de outros planetas. O Programa *Mariner* foi realizado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em parceria com o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) sendo constituído de dez missões (lançadas entre 1962 e 1973) com objetivo de explorar os planetas Mercúrio, Vênus e Marte (NASA, 2019b). Com a missão *Mariner IV* foram realizadas investigações sobre Marte. Em trabalhos como de Fjeldbo e Eshleman (1968) foi analisada a atmosfera do planeta utilizando técnicas de inversão a partir de dados de RO da missão.

A missão *Mariner V* permitiu investigações e experimentos de RO para o estudo da atmosfera de Vênus. Em Fjeldbo e Eshleman (1969), a partir de medidas Doppler de sinais transmitidos pela sonda, enquanto a mesma estava oculta por Vênus, foram derivadas variações da composição da atmosfera do planeta. Com isso, foi possível a obtenção de perfis de temperatura e pressão das camadas mais baixas da atmosfera de Vênus. Em Fjeldbo, Kliore e Eshleman (1971), medidas de RO foram utilizadas para obter, além dos perfis de temperatura e pressão, perfis de refratividade, densidade molecular e índices de absorção para realizar estudos da composição e comportamento da atmosfera de Vênus. Além do Programa *Mariner*, outras missões da NASA utilizaram a técnica de RO para investigação espacial, como as séries *Pioneer* e *Voyager* (KLIORÉ et

al., 1975, 1980; LINDAL; SWEETNAM; ESHLEMAN, 1985; LINDAL et. al., 1987).

Os primeiros trabalhos a abordarem a possibilidade de utilização da RO para a investigação da atmosfera terrestre surgiram no final da década de 1960. Fischbach (1965) e Lusignan *et al.* (1969) investigaram possibilidades de obtenção de informação atmosférica a partir de dados obtidos por satélites em órbitas com diferentes altitudes. Outros trabalhos pioneiros na área de sondagem da atmosfera terrestre utilizando satélites foram os de Yakovlev et al. (1995;1996) e Vilkov (1996). Quase concomitantemente aos estudos de Fischbach (1965) e Lusignan *et al.* (1969), na década de setenta começaram a ser desenvolvidos o GPS e o GLONASS, sistemas pioneiros da navegação global por satélites, que alcançaram constelação completa em 1995. Com os sistemas GNSS e o desenvolvimento de missões com satélites LEO, a utilização da técnica de RO-GNSS para investigações da atmosfera terrestre se tornou uma realidade. E, com isso, diversas missões foram desenvolvidas, nem todas especificamente para obtenção de dados de RO-GNSS, mas com satélites equipados com receptores para a exploração da técnica.

2.1 Principais missões de RO-GNSS para o estudo da atmosfera terrestre

Diversas missões foram lançadas com o objetivo de utilizar a técnica de RO-GNSS para investigação da atmosfera terrestre. Entre 1995 e 1997 foi realizada a missão GPS/MET com objetivo de aplicar o conceito da RO-GNSS. A missão resultou em diversos relatórios e trabalhos científicos, entre abordagens teóricas, com algoritmos de recuperação de perfis e assimilação de dados, até avaliação dos resultados obtidos. Alguns exemplos são Businger et al. (1996), Kursinski et al. (1996), Hajj e Romans (1998), Ahmad e Tyler (1999) e Feng e Herman (1999), que apresentam desde estudos teóricos a estudos práticos utilizando dados da missão GPS/MET para estudo tanto da atmosfera neutra quanto da ionosfera. Posteriormente, outras missões foram desenvolvidas, como CHAMP, GRACE, *Ionosphere Occultation Experiment onboard PicoSat* (IOX) e COSMIC. O Quadro 1 apresenta um resumo das missões lançadas com instrumentos de rádio ocultação, com respectivo período de dados disponíveis.

Quadro 1 – Missões de RO-GNSS com respectivos períodos de dados disponíveis.

Acrônimo	Missão	Período de dados
GPS/MET	<i>GPS Meteorology</i>	1995 – 1997
Sunsat	<i>Stellenbosch University Satellite</i>	1999 – 2001
-	<i>Oersted</i>	1999 – 2001
IOX	<i>Ionosphere Occultation Experiment onboard PicoSat</i>	2001 – 2004
CHAMP	<i>Challenging Mini-satellite Payload</i>	2001 – 2008
SAC-C	<i>Satélite de Aplicaciones Científicas-C</i>	2001 – 2013
Fesat	<i>Federation Satellite</i>	2002 – 2007
C/NOFS	<i>Communications/Navigation Outage Forecasting System</i>	2008 – 2015
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>	2006 – 2017
Formosat-3 / COSMIC	<i>Formosa Satellite 3 / Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate</i>	2006 – 2020
MetOp	<i>Meteorological Operational satellite programe</i>	2006 – atual
TerraSAR-X	<i>Terra-Synthetic Aperture Radar X-band</i>	2008 – atual
TanDEM-X	<i>TerraSAR-X Add-on for Digital Elevation Measurement at X-band</i>	2010 – atual
MT	<i>Megha-Tropiques</i>	2011 – atual
SAC-D	<i>Satélite de Aplicaiones Científicas-D</i>	2011 – 2015
KOMPSAT-5	<i>Korean Multipurpose Satellite-5</i>	2013 – atual
FY-3	<i>Feng Yun-3</i>	2013 – atual
CICERO	<i>Community Initiative for Continuing Earth Radio Occultation</i>	2017 – atual
Formosat-7 / COSMIC-2	<i>Formosa Satellite 7 / Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate 2</i>	2019 – atual

Fonte: Adaptado de Mannucci et al. (2014).

A missão CHAMP, lançada em 2000, teve a importância de ser a primeira missão a obter dados de RO-GNSS contínuos (2001-2008) em tempo quase real. Diversas pesquisas, incluindo as relacionadas à assimilação de dados de RO-GNSS para PNT, foram possíveis devido aos dados desta missão (WICKERT et al., 2001; JAKOWSKI, et al., 2002; HEALY; THÉPAUT, 2006). Apesar de ser considerada uma missão pioneira, o número diário de ocultações ainda era limitado, em torno de 150 (ELGERED; WICKERT, 2017). O experimento *IOX* foi componente da missão *PicoSat*, lançada em 2001. Este foi o primeiro conjunto de observações de cintilação ionosférica, com distribuição global, obtidos a partir de instrumentos de RO-GNSS. Straus, Anderson e Danaher (2003) apresentam alguns resultados obtidos no experimento, com estimativa de valores médios de cintilação obtidos com abrangência global.

A missão GRACE, lançada em 2002, teve como objetivo principal a detecção de variações a longo prazo do campo gravitacional da Terra. Os satélites gêmeos, que fizeram parte da missão, foram desenvolvidos com o mesmo modelo de receptor de RO-GNSS utilizado na missão CHAMP (ELGERED; WICKERT, 2017). Beyerle (2005) e Healy et al. (2007) apresentam algumas aplicações dos dados da missão.

FORMOSAT-3/COSMIC foi uma missão lançada em 2006 resultado de parceria entre Estados Unidos (UCAR) e Taiwan (NSPO – *National Space Organization*). A constelação, composta de seis satélites LEO, foi desenvolvida para realizar observações da atmosfera terrestre. Apesar de ter sido lançada como uma missão experimental, resultados operacionais foram obtidos. Seus dados apresentaram benefícios para meteorologia, permitindo a incorporação de informações em modelos de PNT (ANTHES et al., 2008). Com a missão, o número de ocultações diárias obtidas inicialmente era em torno de 2000. Até 2013 esse valor diminuiu para em torno de 1000 ocultações devido a problemas apresentados em alguns satélites, após o tempo de vida útil ter sido atingido (ELGERED; WICKERT, 2017). Com diversas aplicações, os dados da missão COSMIC possibilitaram pesquisas que avaliaram a qualidade dos dados, além de estudos relacionados à atmosfera neutra e à ionosfera (SCHREINER et al., 2007; HE et al., 2009; ZENG et al., 2008). No dia 28 de maio de 2020 o último satélite da missão COSMIC encerrou suas atividades, 14 anos após o início da missão (NCAR & UCAR NEWS, 2020).

Como continuidade à missão COSMIC, teve início o desenvolvimento da missão FORMOSAT-7/COSMIC-2, novamente uma parceria entre a UCAR e a NSPO. A constelação, contando com doze microssatélites LEO planejados, deverá realizar coleta de dados de previsão do tempo, ionosfera e gravidade. A missão tem por objetivo avançar a capacidade de previsões e modelagens atmosféricas com abrangência regional e global. O número de observações previstas para serem obtidas é maior que a geração anterior, devido ao maior número de satélites, e aos receptores multi-GNSS (TRIG-RO), com isso a missão deve rastrear dados das constelações GPS, Galileo e GLONASS, sendo esperada a obtenção de até 12.000 perfis por dia com a missão completa (ELGERED; WICKERT, 2017). A constelação COSMIC-2 foi dividida em dois grupos, COSMIC-2A e COSMIC-2B, apresentando configurações diferentes em relação à inclinação das órbitas da missão original. Os satélites COSMIC-2A possuem 24° de inclinação, enquanto os COSMIC-2B possuem 72° de inclinação. A intenção é que seja obtida uma melhor cobertura das regiões equatoriais, com a configuração dos satélites COSMIC-2A, enquanto os COSMIC-2B seriam substitutos da missão anterior, por isso a configuração semelhante (EO PORTAL DIRECTORY, 2019a). Após algumas mudanças nos planos de lançamentos dos satélites COSMIC-2A, os mesmos foram lançados em 25 de junho de 2019 (NOAA, 2021). Quanto aos satélites COSMIC-2B, devido a problemas de financiamento, a produção e lançamento foram suspensos em outubro de 2017 (GUNTER'S SPACE PAGE, 2019; EO PORTAL DIRECTORY, 2019a). Mesmo antes de seu lançamento, diversos trabalhos já exploravam o potencial da missão COSMIC-2, como Yue et al. (2014), Tseng et al. (2018) e Hsu, Matsuo e Liu (2018). E em trabalhos mais recentes podem ser verificados os primeiros resultados com dados da missão, como em Schreiner et al. (2020).

Desde 2009 estava em desenvolvimento a missão GRACE-FO e em 22 de maio de 2018 foram lançados os satélites gêmeos da missão (NASA, 2019d). Além de ter como objetivo dar continuidade às medidas do campo gravitacional da Terra, os satélites também são equipados com receptores TRIG-RO. Desenvolvidos pela NAPA/JPL, TRIG-RO são receptores de dados de RO-GNSS capazes de rastrear não apenas dados da constelação GPS, mas também GLONASS, Galileo e BeiDou (PODAAC, 2019). Esse tipo

de receptor foi originalmente desenvolvido para a missão COSMIC-2, passando a ser adotado em diversas missões como *Jason Continuity of Service* (Jason-CS) e *Deep Space Atomic Clock* (DSAC) (EO PORTAL DIRECTORY, 2019b). Trabalhos como os de Nie, Shen e Chen (2019) e Cossavella (2022) apresentam algumas investigações utilizando informações da missão GRACE-FO, no primeiro são realizados estudos com dados gravimétricos enquanto o segundo aborda estudos de controle de altitude com os dados da missão.

Após os lançamentos dos satélites da missão *Meteorological Operational satellite programme* (MetOP), *MetOp-A* (19/10/2006) e *MetOp-B* (17/09/2012), o terceiro e último satélite da série, *MetOp-C*, foi lançado em novembro de 2018 (OPPA, 2019). Atualmente, está em desenvolvimento a missão *MetOp-Second Generation program* (*MetOp-SG*), composta por dois satélites (*MetOp-SG-A* e *MetOp-SG-B*). Com lançamentos previstos para 2024, os satélites da missão também serão equipados com receptores de RO-GNSS (EUMETSAT, 2021).

Além dessas, existem ainda iniciativas privadas como *PlanetIQ*, *Spire* e *GeoOptics*, empresa que, entre outros projetos, desenvolveu a missão *Community Initiative for Continuous Earth Remote Observation* (CICERO) com objetivo de coletar dados de RO-GNSS e de reflectometria. Os dados da missão são disponibilizados de forma gratuita para pesquisas científicas na página da empresa. Os primeiros satélites foram lançados em julho de 2017 e já existem planos de expansão da missão com a CICERO-2. Dados da *GeoOptics* são utilizados inclusive por centros como o *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA). Trabalhos como Chen et al. (2021) e Chang et al. (2022) apresentam comparações entre dados de missões da *GeoOptics* e missões como COSMIC e COSMIC-2. Mais informações são disponibilizadas na página da *GeoOptics* (<http://www.geooptics.com>). Algumas investigações iniciais com dados da missão *PlanetIQ* podem ser obtidas em Kursinski (2019) e Kursinski et al. (2020) e estudos sobre a avaliação de dados provenientes da missão *Spire* podem ser obtidos em Bowler (2020).

3 FORMULAÇÃO ENVOLVIDA NA RO-GNSS

A presente seção é composta de três subseções, na primeira é apresentada a geometria e os principais elementos envolvidos na RO-GNSS. Na mesma subseção é apresentada a relação entre refração e índice de refração, bem como sua formulação em função dos principais componentes da atmosfera. Em seguida são apresentadas três abordagens utilizadas para a obtenção de três equações a partir das quais o ângulo de refração pode ser obtido de maneira iterativa. Então as subseções seguintes apresentam a obtenção do índice de refração em função do ângulo de refração e, a partir disso, a recuperação dos perfis da atmosfera neutra e ionosfera, respectivamente.

3.1 Geometria da RO-GNSS

A recuperação de perfis atmosféricos a partir de dados de RO está diretamente relacionada ao conceito de refração. Isso porque a RO é baseada no efeito da atmosfera, que refrata o sinal transmitido, alterando sua velocidade de propagação e, conseqüentemente, sua trajetória. Devido a essa ação, durante um curto intervalo (em geral de até três minutos), o sinal GNSS chega ao receptor instalado no satélite LEO, ainda que o mesmo esteja obstruído pela Terra (KURSINSKI et al., 1997; 2000). Durante uma ocultação, que em geral dura de um a três minutos, com a variação da posição entre os satélites GNSS e LEO, é possível obter um perfil de refração do sinal eletromagnético. A Figura 2 apresenta a geometria de uma ocultação, onde é possível verificar os principais elementos envolvidos: o ângulo de refração (α), o parâmetro de impacto (a) e o raio de tangência (r_t), que corresponde à distância entre o centro da Terra e o ponto tangente (p_t).

O índice de refração (n) em um meio é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no meio (v):

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1)$$

Considerando frequências de micro-ondas, o índice de refração total é próximo à unidade, de modo que normalmente é discutido em termos de refração (N), definida como (SYNDERGAARD, 1999):

$$N = (n - 1)10^6. \tag{2}$$

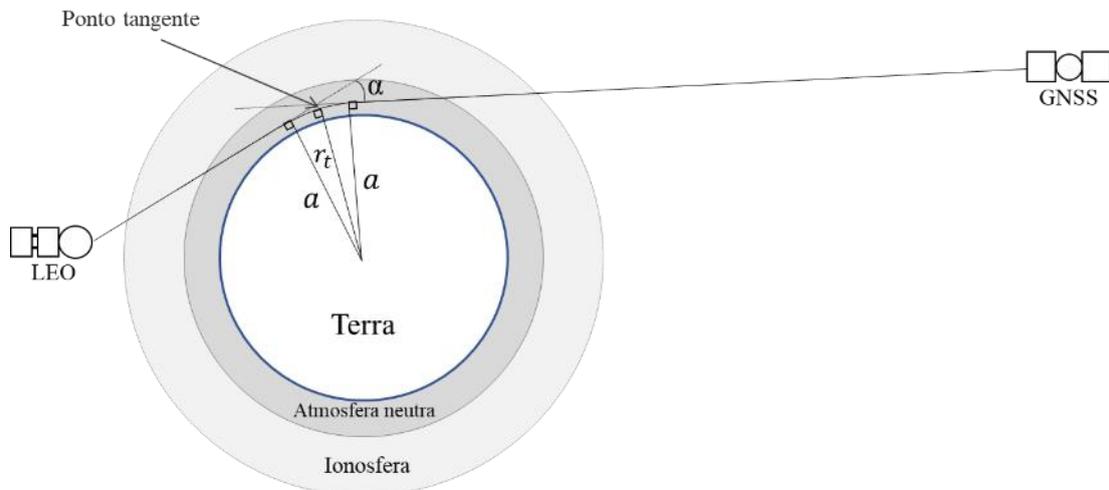
A partir do índice de refração diversos perfis atmosféricos podem ser obtidos, como a temperatura, pressão e umidade da atmosfera neutra, e a densidade de elétrons da ionosfera. A refratividade pode ser expressa em função da pressão atmosférica hidrostática (P_{hid}) dada em hectopascal, da pressão parcial de vapor d'água (P_w) dado em hectopascal, da temperatura atmosférica (T) dada em kelvin, da densidade de elétrons (n_e) por metro cúbico, da frequência (f) dada em hertz e do conteúdo líquido de água (W) dado em gramas por metro cúbico (KURSINSKI, 1997, SYNDERGAARD, 1999). A equação geral é dada por:

$$N = b_1 \frac{P_{hid}}{T} + b_2 \frac{P_w}{T} + b_3 \frac{P_w}{T^2} - b_4 \frac{n_e}{f^2} + b_5 W, \tag{3}$$

onde $b_1 = 77,6$ K/hPa, $b_2 = 70,4$ K/hPa, $b_3 = 3,73 \times 10^5$ K/hPa, $b_4 = 4,03 \times 10^7$ m³/s² e $b_5 = 1,4$ m³/g. Considerando a proximidade entre as constantes dos dois primeiros termos e que P_w é inferior a P_{hid} , o segundo termo geralmente é incluído no primeiro. Além disso, considerando que o último termo da expressão apresenta valores muito baixos em relação aos demais, o mesmo é comumente suprimido. Com isso, a expressão pode ser apresentada como (considerando $P = P_{hid} + P_w$, pressão total):

$$N = b_1 \frac{P}{T} + b_3 \frac{P_w}{T^2} - b_4 \frac{n_e}{f^2}. \tag{4}$$

Figura 2 – Geometria de uma ocultação GNSS.



Fonte: Adaptado de Kursinski (1997).

Para a recuperação do ângulo de refração (α) são consideradas três abordagens: o quadrilátero formado na geometria da ocultação, os índices de refração, e o efeito Doppler. A Figura 3 apresenta os elementos necessários para a derivação do ângulo de refração a partir da geometria de uma ocultação. Nela podem ser verificados os vetores de velocidade do receptor (\vec{v}_R) e do transmissor (\vec{v}_T), os vetores unitários indicando a direção do caminho do sinal (\vec{e}_R e \vec{e}_T), os raios contados dos satélites ao centro da esfera osculante ao elipsóide, que é excêntrica com relação ao centro da Terra (r_R e r_T), os ângulos formados entre os raios e o caminho percorrido pelo sinal (Φ_R e Φ_T), os ângulos formados entre as direções dos raios e os vetores de velocidades (β_R e β_T) e o ângulo formado pelos raios dos satélites em relação ao centro da Terra (θ).

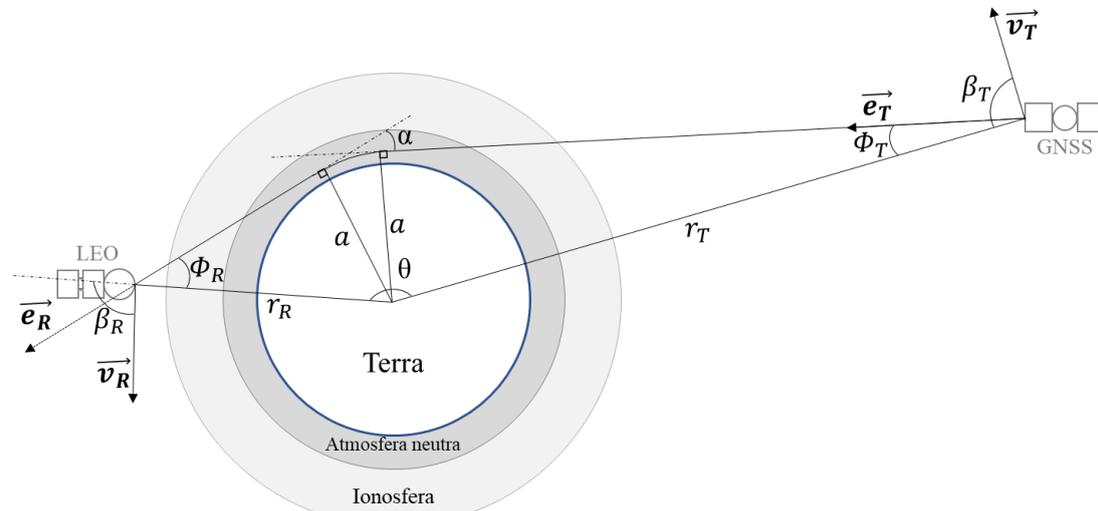
Considerando a geometria apresentada, a partir do quadrilátero formado, cujos ângulos internos são Φ_R , θ , Φ_T e $\pi - \alpha$, e o fato de que a soma dos ângulos internos de um quadrilátero corresponde a 2π , têm-se que:

$$\alpha = \Phi_T + \Phi_R + \theta - \pi. \tag{5}$$

A refração é o fenômeno que ocorre quando uma onda eletromagnética sofre influência devido à diferença de densidade do meio em que se propaga e, como consequência, ocorre um desvio em sua trajetória. A partir da lei da refração ou lei de Snell, considerando dois meios (a e b), a relação entre os ângulos (de incidência e refração) e os índices de refração dos meios (n) é dada por (BORN; WOLF, 1980):

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b. \tag{6}$$

Figura 3 – Elementos da geometria da ocultação GNSS necessários para a derivação do ângulo de refração (α).



Fonte: Adaptado de Kursinski (1997).

A partir da lei de Burguer, que é equivalente à lei de Snell em meio simetricamente esférico, têm-se que o produto do índice de refração (n), pelo raio (r) e pelo seno do ângulo formado entre o raio do ponto considerado e a tangente do caminho do sinal (Φ) se mantém constante, correspondendo ao parâmetro de impacto (a) (BORN; WOLF, 1980):

$$n_T r_T \sin \Phi_T = n_R r_R \sin \Phi_R = a, \tag{7}$$

em que n_T corresponde ao índice de refração do trajeto do sinal do transmissor do satélite GNSS até o ponto tangente e n_R corresponde ao índice de refração do trajeto do sinal desde o ponto tangente até o receptor instalado no satélite LEO.

O efeito Doppler é caracterizado pela variação observada na frequência de uma onda ocasionada pelo deslocamento relativo entre um emissor e um receptor (YOUNG; FREEDMAN, 2009). A relação entre a frequência emitida (f_e) e a frequência com efeito Doppler (f_d), considerando a velocidade da luz no vácuo (c) e a magnitude da velocidade aparente (v_a), é dada por:

$$f_d = -\frac{f_e}{c} v_a. \tag{8}$$

A partir da Figura 3, pode ser obtida a seguinte equação da frequência da onda portadora com efeito Doppler (f_d), utilizando os vetores unitários que indicam a direção do sinal transmitido (\vec{e}_T e \vec{e}_R) e respectivos vetores de velocidade (\vec{v}_T e \vec{v}_R):

$$f_d = -\frac{f_e}{c} (\vec{v}_T \cdot \vec{e}_T - \vec{v}_R \cdot \vec{e}_R). \tag{9}$$

A Figura 3 pode ser decomposta em dois triângulos retângulos conforme a Figura 4, o primeiro em relação ao

satélite LEO (a) e o segundo em relação ao GNSS (b).

A partir da Figura 4 é possível verificar que os vetores unitários podem ser obtidos por:

$$\vec{e}_T = -\vec{v}_T \cos(\beta_T - \Phi_T). \tag{10}$$

$$\vec{e}_R = -\vec{v}_R \cos(\beta_R - \Phi_R). \tag{11}$$

Assim, a equação (9) pode ser reescrita como:

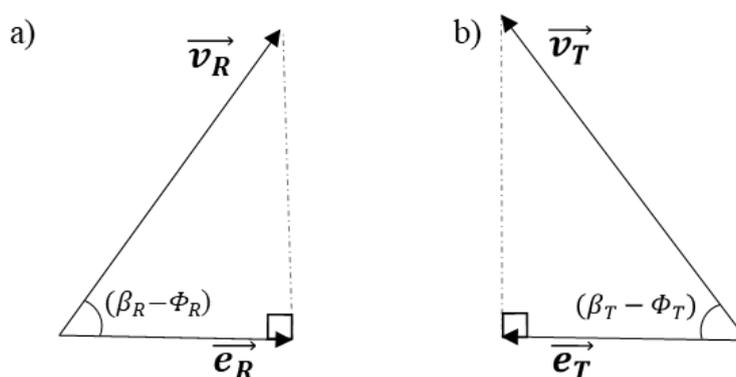
$$f_d = \frac{f_e}{c} [v_T \cos(\beta_T - \Phi_T) - v_R \cos(\beta_R - \Phi_R)]. \tag{12}$$

Esta equação considera que os índices de refração nas posições dos satélites LEO e GNSS são iguais a um, o que foi demonstrado por Hajj e Romans (1998) ser uma aproximação que não acarreta erro significativo para altitudes consideráveis, no caso do estudo, considerando os satélites da missão GPS/MET (com órbitas aproximadas de 750 km de altitude), também aplicável para a missão COSMIC, cujas órbitas possuem aproximadamente 800 km de altitude (0,5% dos valores reais de ângulo de refração ou densidade de elétrons). A frequência com deslocamento Doppler considerando os índices de refração na posição do receptor (LEO) e do transmissor (GNSS) é apresentada por Schreiner et al. (1999):

$$f_d = f_e \left[\frac{c - n_R v_R \cos(\beta_R - \Phi_R)}{c - n_T v_T \cos(\beta_T - \Phi_T)} - 1 \right]. \tag{13}$$

As equações (12) e (13) são equivalentes, desde que os índices de refração sejam considerados iguais a um. A partir das equações (5), (7) e (12) o ângulo de refração pode ser estimado de forma iterativa. As medidas utilizadas são obtidas com o GNSS (Doppler) e a partir da estimativa precisa dos vetores de posição e de velocidade dos satélites GNSS e LEO. No caso da missão COSMIC, todas essas informações são disponibilizadas nos arquivos de excesso de fase (produtos *level1b*) chamados *atmPhs* e *ionPhs*, para atmosfera neutra e ionosfera, respectivamente. A seguir são apresentadas as abordagens utilizadas para a recuperação de perfis da atmosfera neutra e da ionosfera, utilizando a técnica de RO-GNSS.

Figura 4 – Triângulos decompostos da geometria da ocultação para os satélites LEO (a) e GNSS (b).



Fonte: Jerez (2021).

3.2 Recuperação de perfis atmosféricos

A relação entre o ângulo de refração e o índice de refração é dado pela equação (SYNDERGAARD, 1999):

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_{pt}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr. \tag{14}$$

Aplicando a inversa de Abel (BRACEWELL, 1986), é possível expressar o índice de refração (n) em função do ângulo de refração (α), do parâmetro de impacto (a) e do raio do ponto considerado (r).

$$n(r) = \exp \left(\frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - n^2 r^2}} da \right). \tag{15}$$

A dedução de α(a) e n(r) (equações 14 e 15) com as particularidades para perfis da atmosfera neutra são apresentadas por Fjeldbo, Kliore e Eshleman (1971).

Conforme apresentado no início da seção 4, a refratividade (N) possui contribuições de quatro fontes principais, podendo ser generalizada pela equação (4), da qual fazem parte a pressão total (composta pela pressão hidrostática e pela pressão parcial de vapor), a temperatura e a densidade de elétrons. Em geral, a metodologia adotada para a recuperação de perfis da atmosfera neutra é a utilização de uma combinação linear de dupla frequência das observáveis GNSS para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera, deixando a refratividade relacionada apenas à atmosfera neutra (KURSINSKI, 1997; SYNDENGAARD, 1999). A combinação linear é realizada a partir dos perfis de ângulos de refração obtidos para os dados de cada portadora (ELGERED; WICKERT, 2017), assim a combinação dos ângulos de refração pode ser dada por:

$$\alpha_c(a) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \alpha_1(a) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \alpha_2(a), \tag{16}$$

em que α_c(a) corresponde ao ângulo de refração corrigido dos efeitos de primeira ordem da ionosfera; α₁(a) e α₂(a) são os valores dos ângulos de refração obtidos com dados das portadoras L₁ e L₂, respectivamente; e f₁ e f₂ correspondem às frequências nas portadoras L₁ e L₂, respectivamente. Com isso, a equação (4) pode ser reescrita apenas em função dos componentes da atmosfera neutra, eliminando o termo referente à ionosfera, assim temos que:

$$N = b_1 \frac{P}{T} + b_3 \frac{P_w}{T^2}, \tag{17}$$

Em regiões de com temperaturas inferiores a 250 K ~ -23,15°C, correspondente a altitudes a partir de ~10 km em latitudes tropicais, pode ser aplicado um modelo simplificado, que não considera a componente úmida da atmosfera (KURSINSKI, 1997; SYNDENGAARD, 1999), obtendo-se:

$$N = b_1 \frac{P}{T}, \tag{18}$$

Para as demais regiões, a equação (17) pode ser ainda combinada com a equação de estado dos gases ideais para fornecer a densidade em função da refratividade. A pressão pode ser estimada a partir da densidade atmosférica utilizando a equação de equilíbrio hidrostático. Para a determinação da pressão úmida, a equação (19) pode ser então apresentada como:

$$P_w = \frac{N T^2 - b_1 T P}{b_3}, \tag{19}$$

Neste caso, se faz necessária a obtenção de valores de temperatura de outras fontes, como modelos climatológicos. A dedução das formulações completas e análises dos erros obtidos devido às generalizações realizadas são desenvolvidas em Kursinski (1997), além de trabalhos como Kursinski et al. (1997) e Hocke

(1997).

Vale ressaltar que, no caso da ionosfera, especialmente se são consideradas altitudes a partir da camada F2, o ângulo de refração é muito pequeno e, com isso, a linha entre o receptor e o transmissor pode ser considerada uma linha reta (Hajj & Romans, 1998). Portanto, ao se tratar da ionosfera, não se tem uma ocultação propriamente dita, mas uma sondagem do limbo terrestre.

Considerando perfis ionosféricos, a dedução do ângulo de refração em função do parâmetro de impacto é apresentada por Garcia-Fernandez (2004). Nesta dedução, como é assumida simetria esférica, é possível utilizar a fórmula de Bourguer para relacionar o ângulo de refração e o índice de refração. Como o parâmetro de impacto é constante em uma linha reta, é possível obter a relação entre o ângulo de refração (α) e o índice de refração (n) partindo da equação (7):

(i) considerando a onda em uma linha reta, com índice de refração igual a um, assim:

$$r \sin \Phi_r = a_r. \tag{20}$$

(ii) considerando o caminho real, a partir da fórmula de Bourguer (BORN; WOLF, 1980), em que:

$$n r \sin \Phi = a. \tag{21}$$

Derivando as equações (20) e (21) em relação ao raio (r) e ao ângulo (Φ_r ou Φ), e apenas a equação (21) em relação ao índice de refração (n), tem-se:

$$\sin \Phi_r dr + r \cos \Phi_r d\Phi_r = 0. \tag{22}$$

$$r \sin \Phi dn + n \sin \Phi dr + n r \cos \Phi d\Phi = 0. \tag{23}$$

Realizando a multiplicação da equação (22) pelo índice de refração e realizando sua subtração da equação (23), obtemos:

$$r \sin \Phi dn + n (\sin \Phi - \sin \Phi_r) dr + n r (\cos \Phi d\Phi - \cos \Phi_r d\Phi_r) = 0. \tag{24}$$

Como o ângulo de refração não excede $0,03^\circ$ na camada ionosférica, é possível fazer uma aproximação da equação (24), considerando que Φ e Φ_r sejam muito próximos (HAJJ; ROMANS, 1998; SCHREINER et al., 1999). Com isso tem-se:

$$r \sin \Phi dn + n r \cos \Phi (d\Phi - d\Phi_r) = 0. \tag{25}$$

A diferença entre $d\Phi$ e $d\Phi_r$ corresponde ao incremento do ângulo de refração entre um ponto e outro (KURSINSKI, 1997), assim:

$$d\alpha = d\Phi - d\Phi_r. \tag{26}$$

Com isso, a equação (25) pode ser reescrita como:

$$d\alpha = - \frac{\sin \Phi dn}{\cos \Phi n}. \tag{27}$$

A partir da equação (27) e considerando que a derivada da função logarítmica natural é dada por:

$$\frac{d \ln(n)}{dn} = \frac{1}{n}. \tag{28}$$

Tem-se que:

$$d\alpha = -\frac{\sin \Phi}{\cos \Phi} d\ln(n). \quad (29)$$

A partir da equação (7), é possível obter:

$$\sin \Phi = \frac{a}{nr}. \quad (30)$$

Recorrendo à soma dos quadrados das funções seno e cosseno que é igual a um, tem-se que:

$$\cos \Phi = \sqrt{1 - \frac{a^2}{n^2r^2}}. \quad (31)$$

Substituindo as equações (30) e (31) na equação (29), tem-se:

$$d\alpha = -\frac{a}{\sqrt{n^2r^2 - a^2}} d\ln(n). \quad (32)$$

Considerando $x = nr$, a equação (32) pode ser reescrita como:

$$d\alpha = -\frac{a}{\sqrt{x^2 - a^2}} d\ln(n). \quad (33)$$

Integrando a equação (33) é obtida a expressão para o ângulo de refração no caminho entre os satélites GNSS e LEO:

$$\alpha(a) = -a \int_{x_{LEO}}^{x_{GNSS}} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d\ln(n)}{dx} dx, \quad (34)$$

em que x_{LEO} e x_{GNSS} são as posições dos satélites LEO e GNSS, respectivamente. Considerando a expressão para o ângulo de refração no caminho entre cada satélite e o ponto tangente (HAJJ; ROMANS, 1998), tem-se:

$$\alpha(a) = -a \left(\int_{r_t}^{x_{GNSS}} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d\ln(n)}{dx} dx + \int_{r_t}^{x_{LEO}} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d\ln(n)}{dx} dx \right). \quad (35)$$

Assumindo que a contribuição entre os caminhos percorrido pelo sinal do GNSS até o ponto tangente e do ponto tangente até o LEO são iguais (simetria esférica), a expressão pode ser generalizada para:

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d\ln(n)}{dx} dx. \quad (36)$$

Aplicando a inversa de Abel (BRACEWELL, 1986) é possível obter o índice de refração em função do ângulo de refração e do parâmetro de impacto:

$$\ln(n(x)) = \frac{1}{\pi} \int_a^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da. \quad (37)$$

Aplicando exponencial na equação, a mesma pode ser apresentada como (SCHREINER et al., 1999):

$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_a^\infty \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \right]. \tag{38}$$

3.3 Recuperação de perfis ionosféricos

A equação (38) é utilizada para estimar o índice de refração, a relação entre o índice de refração e a densidade de elétrons é obtida pelas equações (2) e (4), considerando-se eliminada a influência da atmosfera neutra. Com isso, é possível obter (HAJJ et al., 2000):

$$n = 1 - c_1 \frac{n_e}{f^2}, \tag{39}$$

com $c_1 = 40,3 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Outra abordagem utilizada é considerando a utilização do TEC para a inversão da densidade de elétrons. O TEC entre os satélites LEO e o GNSS pode ser obtido pela integração da densidade de elétrons (SCHREINER et al., 1999):

$$TEC = \int_{r_{LEO}}^{r_{GNSS}} n_e ds, \tag{40}$$

sendo s a distância entre o receptor e o transmissor. A equação (40) pode ser descrita ainda a partir das distâncias (l) dos satélites ao ponto tangente, assim:

$$TEC = \int_{p_t}^{x_{LEO}} n_e(r) dl + \int_{p_t}^{x_{GNSS}} n_e(r) dl, \tag{41}$$

sendo $l = \sqrt{r^2 - r_t^2}$. Assumindo simetria esférica da atmosfera, a equação (41) pode ser generalizada, considerando iguais as distâncias entre os dois satélites e o ponto tangente, assim:

$$TEC = 2 \int_{p_t}^{x_{LEO}} n_e(r) dl r_s. \tag{42}$$

Derivando l em relação a r , obtem-se:

$$dl = \frac{r}{\sqrt{r^2 - r_{pt}^2}} dr. \tag{43}$$

Substituindo a equação (43) em (42), tem-se:

$$TEC = 2 \int_{p_t}^{x_{LEO}} \frac{n_e(r) r}{\sqrt{r^2 - r_{pt}^2}} dr. \tag{44}$$

Recorrendo novamente à inversa de Abel (BRACEWELL, 1986), é obtida a equação para estimar a densidade de elétrons a partir do TEC.

$$n_e(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_R} \frac{dTEC/dr_{pt}}{\sqrt{r_{pt}^2 - r^2}} dr_{pt}. \tag{45}$$

A equação (45) é utilizada em diversas abordagens recentes, conforme será apresentado na próxima seção. A estimativa do valor do TEC tem algumas possibilidades. A equação (39) pode ser reescrita com a densidade de elétrons em função do índice de refração, assim:

$$n_e = -f^2 \frac{(n - 1)}{c_1} \tag{46}$$

A equação (46) pode ser substituída na equação (40), obtendo-se a relação entre o TEC e o índice de refração:

$$TEC = -\frac{f^2}{c_1} \int_{x_{LEO}}^{x_{GNSS}} (n - 1) ds. \tag{47}$$

Uma opção para estimativa do TEC é utilizar o excesso de fase. A equação para obtenção do excesso de fase é apresentada por Schreiner et al. (1999):

$$S(a) = \int_a^{x_{GNSS}} \frac{x(1 - xn^{-1} dn/dx)}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx + \int_a^{x_{LEO}} \frac{x(1 - xn^{-1} dn/dx)}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx - l. \tag{48}$$

O excesso de fase consiste na diferença entre a fase medida, já corrigida das ambiguidades, e a fase estimada considerando a propagação do sinal no vácuo, é equivalente à distância geométrica entre os satélites LEO e GNSS (s) e fornecido em metros (SYNDERGAARD, 1999). A partir da equação (47) e da definição do excesso de fase, pode ser obtida a relação entre o TEC e o excesso de fase (S):

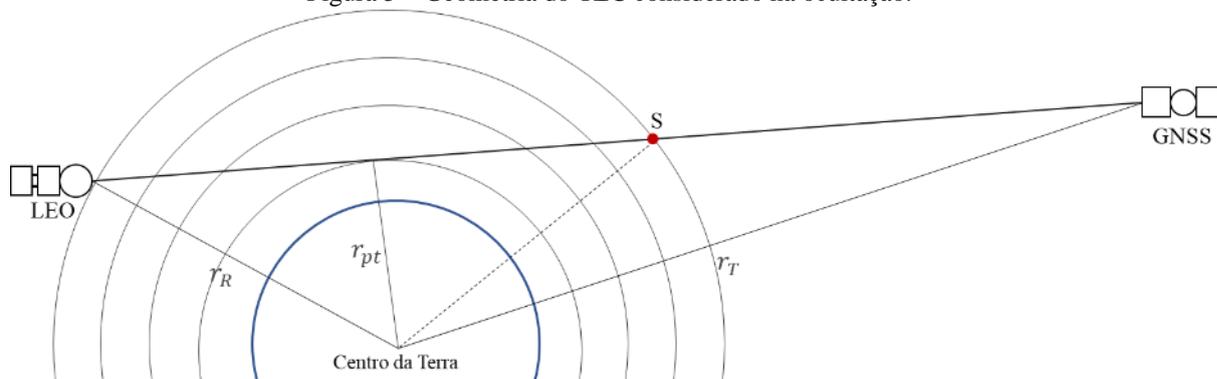
$$TEC = -\frac{f^2 S}{c_1} \tag{49}$$

Schreiner et al. (1999) mostram que apesar dos valores de TEC calculados em portadoras diferentes apresentarem pequenas diferenças devido às diferenças de caminhos, essas diferenças são desprezíveis. Com isso, considerando a equação (49), o TEC pode ser estimado a partir do excesso de fase na portadora L1, L2 ou a partir da diferença entre estas, conforme apresentado a seguir:

$$TEC = -\frac{S_1 f_1^2}{c_1} = -\frac{S_2 f_2^2}{c_1} = -\frac{(S_1 - S_2) f_1^2 f_2^2}{c_1 (f_1^2 - f_2^2)} \tag{50}$$

A principal vantagem da utilização do TEC estimado a partir da diferenciação entre os valores obtidos com as duas portadoras é a eliminação dos erros relacionados às órbitas e relógios dos satélites. Esses erros devem ser precisamente estimados caso sejam utilizados valores obtidos de apenas uma frequência (SCHREINER, 1999). Cabe ressaltar que a condição assumida na equação (42), além de considerar a variação esfericamente simétrica do TEC, é contado apenas o TEC pertencente à área de simetria limitada pela órbita do satélite LEO. A Figura 9 apresenta a geometria do TEC na ocultação ao se considerar a simetria esférica em relação à posição do satélite LEO, onde o ponto S corresponde ao ponto de mesma altitude que a órbita do LEO.

Figura 5 – Geometria do TEC considerado na ocultação.



Fonte: Jerez (2021).

Assim, o TEC calibrado (TEC_{cal}) apresentado por Schreiner et al. (1999) corresponde ao TEC entre o LEO e o ponto S (TEC_{LEO-S}), que equivale à diferença do TEC entre o LEO e o GNSS ($TEC_{LEO-GNSS}$) e o TEC entre o GNSS e o ponto S (TEC_{GNSS-S}). A partir do TEC calibrado, a densidade de elétrons apresentada anteriormente na equação (45) pode ser apresentada como:

$$n_e(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_R} \frac{dTEC_{cal}/dr_{pt}}{\sqrt{r_{pt}^2 - r^2}} dr_{pt}. \tag{51}$$

Em geral, os perfis de densidade de elétrons provenientes de RO-GNSS são utilizados para assimilação em modelos ionosféricos, em mapas de VTEC, por exemplo, que podem ser posteriormente utilizados para posicionamento GNSS em substituição ao modelo de Klobuchar para posicionamento por ponto simples utilizando simples frequência (AGUIAR; KOZELINSKI, 2015; PROL et al., 2018c). Além disso, pode ser realizada a obtenção de valores de TEC provenientes apenas de dados de RO-GNSS, a partir da integração dos valores de densidade de elétrons dos perfis ionosféricos (MUNGUFENI et al., 2020).

4 PRODUTOS

Com o intuito de armazenar e disponibilizar informações provenientes de missões de rádio ocultação, bem como realizar o processamento, foi criado o *COSMIC Data Analysis and Archive Center* (CDAAC), que consiste em um centro de dados que concentra produtos com observações recuperadas das camadas neutra e ionizada da atmosfera terrestre (COSMIC, 2021a). Esses produtos são disponibilizados de forma online e gratuita. O Quadro 2 apresenta missões e seus respectivos períodos de dados disponibilizados no CDAAC, em que YYYY.DDD representa o formato de data, em contagem direta, empregado ao realizar buscas neste centro, sendo os quatro primeiros dígitos relacionados ao ano e os três últimos ao dia.

Quadro 2 – Missões com dados disponibilizados pelo CDAAC com datas em formato YYYY.DDD, onde os quatro primeiros dígitos correspondem ao ano e os três últimos ao dia.

Missão	Pós-processado	Reprocessado	Quase tempo real
GPS/MET	1995.111 – 1997.047	–	–
GPS/MET-AS	1995.237 – 1997.016	–	–
CHAMP	–	2001.139 – 2008.279	–
SAC-C	2006.068 – 2011.215	–	–
GRACE	2007.059 – 2017.334	–	–
TerraSAR-X	2008.041 – 2021.334	–	–
CNOFS	2010.060 – 2011.365	–	–
COSMIC	2014.121 – 2020.116	2006.106 – 2014.120	–
KOMPASAT5	2015.022 – 2021.334	–	–
MetOp-A	2016.001 – 2021.334	2007.274 – 2015.365	–

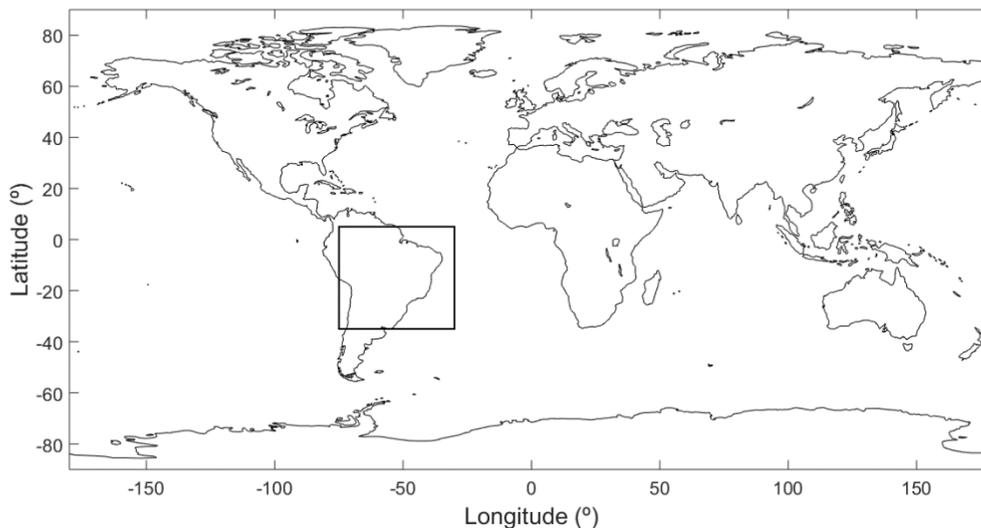
MetOp-B	2016.001 – 2021.334	2013.032 – 2015.365	–
TanDEM-X	2016.001 – 2021.334	–	–
PAZ	2018.130 – 2021.334	–	–
MetOp-C	2019.195 – 2021.334	–	–
COSMIC-2	2019.213 – 2021.031	–	2019.274 – Atual
GEOOPT	2020.336 – 2021.259	–	2020.350 – 2021.259
SPIRE	–	–	2020.351 – Atual

Fonte: Adaptado de JEREZ (2021) e CDAAC (2021).

A partir do download dos dados disponibilizados pelo CDAAC, é possível realizar o processamento ou a plotagem dos perfis por meio de softwares científicos. Dessa forma, de maneira a ilustrar o que pode ser extraído de um produto proveniente de RO-GNSS, foi selecionada a missão COSMIC como fonte de dados, visto que recebe destaque pelo grande volume de informações disponibilizadas, fato que pode auxiliar na geração de resultados mais representativos (ELGERED; WICKERT, 2017). Diversos produtos estão disponíveis para esta missão, no presente trabalho são apresentados os produtos *ionPrf* e *atmPrf* que apresentam respectivamente informações recuperadas da ionosfera, como a densidade de elétrons, e da atmosfera neutra, como temperatura e pressão atmosférica (COSMIC, 2021b).

Para a visualização dos dados ainda é possível delimitar uma área de ocorrência, o que permite, por exemplo, a escolha de uma região de interesse. Para os exemplos aqui apresentados foi utilizada a região do território brasileiro, a Figura 6 apresenta a região delimitada.

Figura 6 – Região delimitada para o território brasileiro.



Elaboração: Os Autores (2022).

As datas selecionadas para a utilização dos dados consistiram em dois dias. Para os arquivos *ionPrf*, 16 de junho e 14 de outubro, ambos em 2014 devido à proximidade com o pico de atividade solar mais recente (SIDC, 2021). Os meses de junho e outubro são interessantes para a análise da sazonalidade, sendo o primeiro período relacionado a menores efeitos ionosféricos, enquanto o segundo, a maiores efeitos (McNAMARA, 1991; MATSUOKA, 2007). Os dias foram estabelecidos de acordo com o maior número de ocultações registradas para cada mês. Com relação aos dados do *atmPrf*, foram selecionados 20 de janeiro e 26 de julho de 2008. O ano de 2008 pode ser caracterizado como um período de maior estabilidade da missão e grande volume de dados, visto que a missão foi lançada em 2006 e até meados de 2007 se encontrava em período de estabilização (ELGERED; WICKERT, 2017). Os meses de janeiro e julho retratam diferentes períodos da atmosfera, sendo o primeiro correspondente ao verão e, o segundo, no inverno para o hemisfério Sul. A seleção dos dias seguiu o mesmo critério estabelecido para o *ionPrf*. O Quadro 3 reúne as datas e quantidades de ocultações encontradas em todo o globo e na região de interesse.

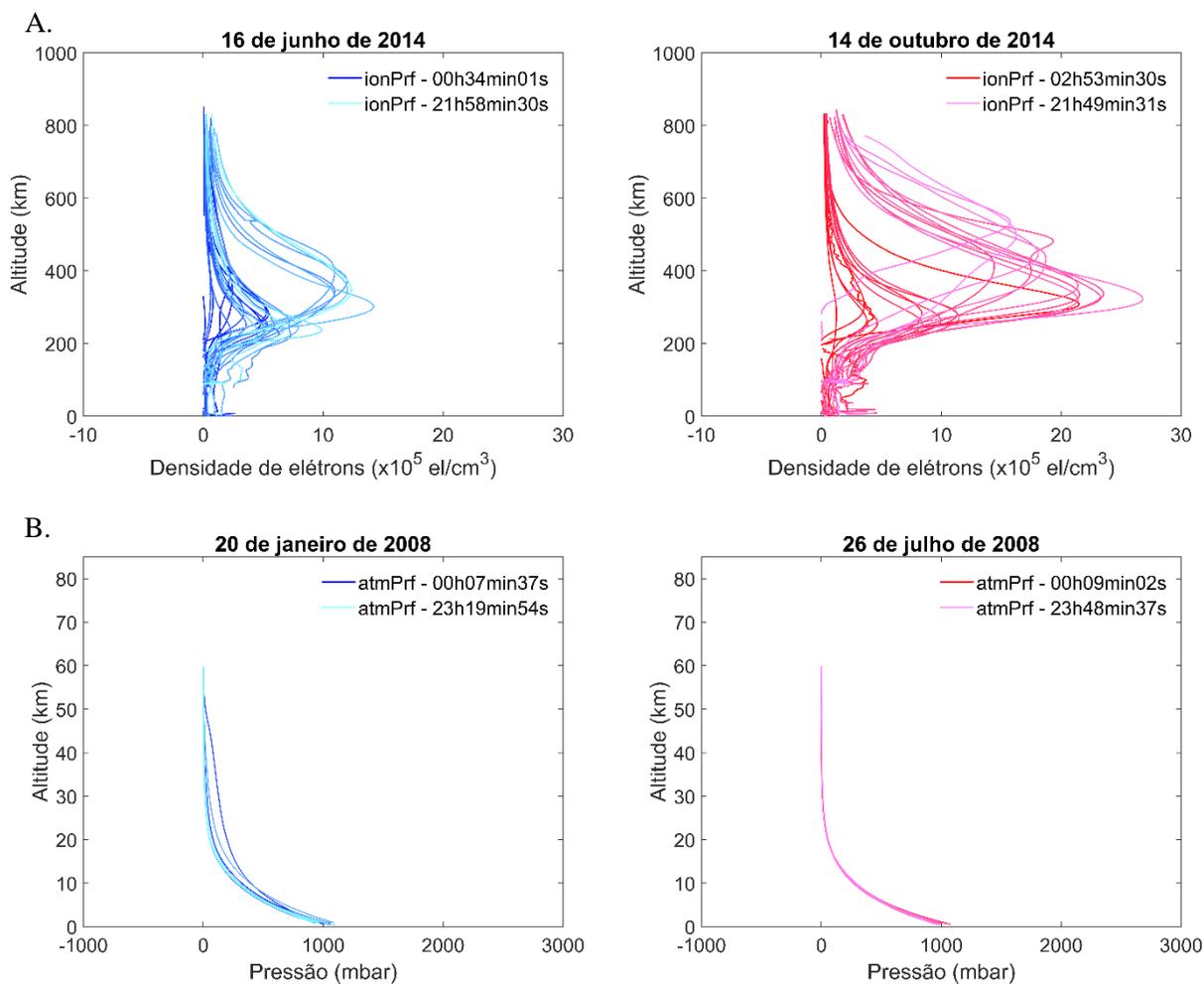
Quadro 3 – Quantidade de ocultações registradas nas datas selecionadas.

<i>ionPrf</i>		
Data	Ocultações no mundo	Ocultações na região delimitada
16 de junho de 2014	1099	28
14 de outubro de 2014	1057	23
<i>atmPrf</i>		
Data	Ocultações no mundo	Ocultações na região delimitada
20 de janeiro de 2008	3078	94
26 de julho de 2008	3230	89

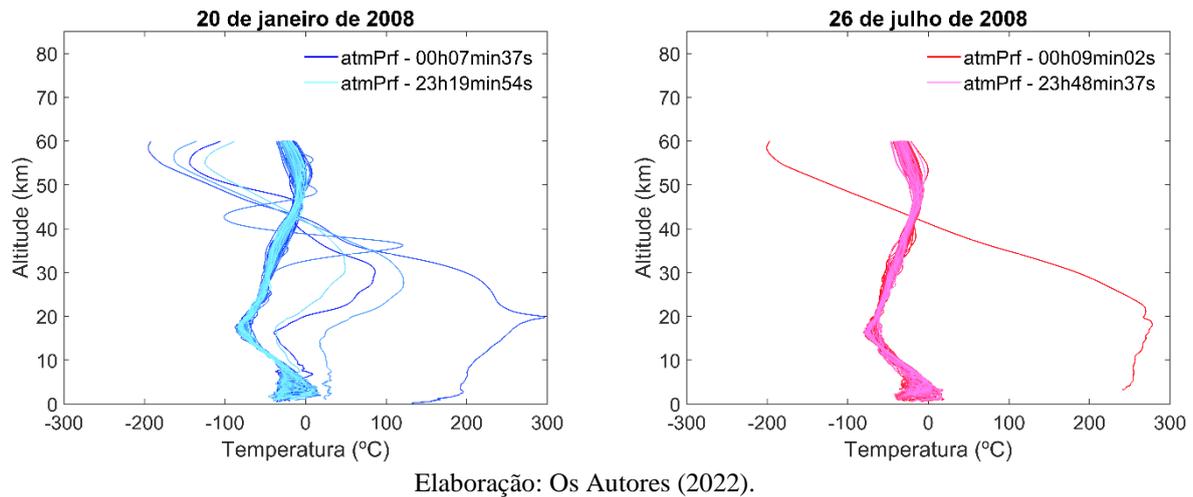
Elaboração: Os Autores (2022).

Os valores correspondentes aos perfis podem ser visualizados na Figura 7, na qual foram utilizadas as cores azul e vermelho para diferenciar os diferentes períodos selecionados para cada tipo de arquivo. As tonalidades mais escuras dessas cores retratam o comportamento dos dados das primeiras ocultações do dia analisado, enquanto as mais claras se relacionam às últimas horas desse dia, os horários são fornecidos em tempo GPS. Além disso, um processo de filtragem se fez necessário para que a análise não fosse prejudicada por dados ruidosos. Para isso, nos gráficos da densidade de elétrons, valores negativos e com comportamento muito irregular foram descartados. Perfis de pressão com valores negativos ou acima de 1500 mbar também foram excluídos, bem como perfis de temperatura com dados abaixo de 273,15°C ou acima de 300°C.

Figura 7 – Resultados obtidos para os perfis de densidade de elétrons (A), pressão atmosférica (B) e temperatura (C) utilizando arquivos *ionPrf* e *atmPrf*.



C.



A Figura 7-A apresenta os perfis de densidade de elétrons. É possível verificar a presença da variação sazonal, pois outubro apresenta, de modo geral, os maiores valores. A variação diurna também pode ser observada por meio da variação na tonalidade de cores, visto que os tons mais claros representam as últimas horas de cada dia, e retratam as maiores variações. As Figuras 7-B e 7-C apresentam os valores obtidos para as informações de pressão e temperatura, respectivamente. O comportamento dos valores de pressão é bem semelhante para ambos os casos. Em relação à temperatura, os perfis em geral apresentaram variabilidade semelhante em relação à altitude, as maiores diferenças eram esperadas para as baixas altitudes, porém, com esse tipo de visualização houve sobreposição dos perfis, o que dificultou a observação de variabilidade entre os períodos considerados. Para evitar essa limitação, outros tipos de visualização podem ser empregados como a divisão dos perfis por períodos mais curtos ou a aplicação de valores médios, por exemplo. Adicionalmente, deve-se considerar que as observações analisadas correspondem a dados de uma região extensa, apesar da delimitação de área, sendo análises de regiões com variações atmosféricas. E, além disso, vale ressaltar que dados provenientes de RO-GNSS podem conter informações bastante ruidosas principalmente em regiões próximas à superfície terrestre, mesmo depois de filtragens como as que foram aplicadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A RO-GNSS ocultação é uma importante técnica que permite a obtenção de informações atmosféricas com cobertura de forma mais homogênea e de regiões muitas vezes não alcançadas por outras técnicas, como por exemplo as baseadas na utilização de redes terrestres de receptores GNSS. Diversas missões preparadas para a utilização dessa técnica foram lançadas desde a década de 1990, sendo que a maior parte das missões apresentadas se utilizaram de dados da constelação GPS. Além deste sistema, existe ainda o russo GLONASS, o europeu Galileo e o chinês BeiDou, também operacionais. Com esse novo cenário, as missões que estiverem preparadas para as configurações desses sistemas terão a possibilidade de obter um número significativamente maior de ocultações por dia, em comparação às missões anteriores. Com isso, a técnica possui uma grande possibilidade de expansão na quantidade de informações e aplicações. O uso dos dados, no entanto, deve ser criterioso, uma vez que os dados são obtidos a partir de uma geometria específica e podem apresentar valores bastante ruidosos.

O presente trabalho teve por objetivo apresentar um breve histórico das missões de RO-GNSS, a teoria envolvida na técnica e as formulações que permitem a obtenção dos perfis atmosféricos, considerando atmosfera neutra e ionizada. Além disso, foram apresentados alguns exemplos de plotagens de perfis da missão COSMIC, umas das mais bem sucedidas missões de RO-GNSS até o momento, com 14 anos de dados disponibilizados de forma online e gratuita. Existe uma vasta gama de investigações que ainda se faz necessária nessa área de pesquisa, não apenas em relação às novas missões, mas também quanto às configurações de processamento, metodologias envolvidas na obtenção e validação dos perfis atmosféricos e, ainda, as metodologias de assimilação dos dados de RO-GNSS em modelos atmosféricos. Diversos estudos recentes apresentam importantes contribuições em relação à atmosfera neutra (ANTHES et al., 2022; FU et al., 2022;

CHANG; YANG, 2022) e à ionosfera (BERGSSON; SYNDERGAARD, 2022; SUN et al., 2022; PROL et al., 2022).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processos: 2021/05285-0 e 2020/09443-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) Código de Financiamento 001 (Processo nº 88882.433954/2019-01), à Universidade Estadual Paulista (UNESP), à Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) e ao projeto INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) (Processo CNPq: 465548/2014-2) e Políticas Públicas (Processo FAPESP: 2017/50115-0) “Tecnologia GNSS no suporte à Navegação Aérea”.

Contribuição dos Autores

Conceituação, G.O.J., D.B.M.A., R.S.N., J.F.G.M. e M.H.P; curadoria dos dados e investigação: G.O.J., R.S.N. e D.B.M.A.; metodologia: G.O.J., D.B.M.A., R.S.N., J.F.G.M. e M.H.P; visualização e software: G.O.J. e R.S.N.; aquisição de financiamento: G.O.J., D.B.M.A., J.F.G.M. e M.H.P.; supervisão: D.B.M.A., J.F.G.M. e M.H.P.; redação - minuta inicial: G.O.J. e R.S.N.; redação – revisão e edição: G.O.J., D.B.M.A., R.S.N., J.F.G.M. e M.H.P. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- AA, E.; LIU, S.; HUANG, W.; SHI, L.; GONG, J.; CHEN, Y.; LI, J. Regional 3-D ionospheric electron density specification on the basis of data assimilation of ground-based GNSS and radio occultation data. **Space Weather**, v. 14, n. 6, p. 433-448, 2016. DOI. 10.1002/2016SW001363.
- AGUIAR, C. R.; KOZELINSKI, A. Mapas de TEC IONEX em tempo real gerados pelo modelo GIB (Grade Ionosférica Brasileira). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 8, p. 1569-1585, 2015.
- ANTHES, R.; SJOBERG, J.; FENG, X.; SYNDERGAARD, S. Comparison of COSMIC and COSMIC-2 Radio Occultation Refractivity and Bending Angle Uncertainties in August 2006 and 2021. **Atmosphere**, v. 13, n. 5, p. 790, 2022. DOI. 10.3390/atmos13050790.
- AHMAD, B.; TYLER, G. L. Systematic errors in atmospheric profiles obtained from Abelian inversion of radio occultation data: Effects of large-scale horizontal gradients. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D4, p. 3971-3992, 1999. DOI. 10.1029/1998JD200102.
- ANGLING, M. J.; CANNON, P. S. Assimilation of radio occultation measurements into background ionospheric models. **Radio Science**, v. 39, n.1, p. 1-11, 2004. DOI. 10.1029/2002RS002819.
- ANTHES, R. A.; BERNHARDT, P. A.; CHEN, Y.; CUCURULL, L.; DYMOND, K. F.; ECTOR, D.; HO, S.; HUNT, D.; KUO, Y.; LIU, H.; MANNING, K.; MCCORMICK, C.; MEEHAN, T. K.; RANDEL, W. J.; ROCKEN, C.; SCHREINER, W. S.; SOKOLOVSKIY, S. V.; SYNDERGAARD, S.; THOMPSON, D. C.; TRENBERTH, K. E.; WEE, T.; YEN, N. L.; ZENG, Z. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 89, n. 3, p. 313-334, 2008. DOI. 10.1175/BAMS-89-3-313.
- APARICIO, J. M.; DEBLONDE, G. Impact of the Assimilation of CHAMP Refractivity Profiles on Environment Canada Global Forecasts. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 1, p. 257–275, 2008. DOI. 10.1175/2007mwr1951.1.

- BERGSSON, B.; SYNDERGAARD, S. Global Temporal and Spatial Variations of Ionospheric Sporadic-E Derived From Radio Occultation Measurements. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 127, n. 4, e2022JA030296, 2022. DOI. 10.1029/2022JA030296.
- BEYERLE, G. **Simulating GPS radio occultation events**. Scientific Report 05-09, Danish Meteorological Institute, 2005. Disponível em: <<https://preop.romsaf.org/Publications/reports/sr05-09.pdf>>. Acesso em out. 2021.
- BORN, M.; WOLF, E. **Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light**. 6ª ed. Oxford: Pergamon Press, 1980.
- BOWLER, N. E. An assessment of GNSS radio occultation data produced by Spire. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 733, p. 3772-3788, 2020. DOI. 10.1002/qj.3872.
- BRACEWELL, R. N. **The Fourier transform and its applications**. New York: McGraw-Hill, 1986.
- BUSINGER, S.; CHISWELL, S. R.; BEVIS, M.; DUAN, J.; ANTHES, R. A.; ROCKEN, C.; WARE, R. H.; EXNER, M.; VANHOVE, T.; SOLHEIM, F. S. The promise of GPS in atmospheric monitoring. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 1, p. 5-18, 1996. DOI. 10.1175/1520-0477(1996)077<0005:TPOGIA>2.0.CO;2.
- COSSAVELLA, F.; HERMAN, J.; HOFFMANN, L.; FISCHER, D.; SAVE, H.; SCHLEPP, B.; USBECK, T. Attitude Control on GRACE Follow-On: Experiences from the First Years in Orbit. In: CRUZEN, C.; SCHMIDHUBER, M.; LEE, Y. **Space Operations: Beyond Boundaries to Human Endeavours**. 1ª ed. Londres: Springer Cham, 2022. p. 493-517.
- COSMIC DATA ANALYSIS AND ARCHIVE CENTER (CDAAC). **General Documentation about CDAAC Data**. Disponível em: <<https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/doc/overview.html>>. Acesso em: ago. 2021.
- CHANG, H.; LEE, J.; YOON, H.; MORTON, Y.; SALTMAN, A. Performance assessment of radio occultation data from GeoOptics by comparing with COSMIC data. **Earth, Planets and Space**, v. 74, n. 1, p. 1-17, 2022. DOI. 10.1186/s40623-022-01667-6.
- CHANG, C. C.; YANG, S. C. Impact of assimilating Formosat-7/COSMIC-II GNSS radio occultation data on heavy rainfall prediction in Taiwan. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 33, n. 1, p. 1-24, 2022. DOI. 10.1007/s44195-022-00004-4.
- CHEN, Y.; SHAO, X.; CAO, C.; HO, S. P. Simultaneous Radio Occultation Predictions for Inter-Satellite Comparison of Bending Angle Profiles from COSMIC-2 and GeoOptics. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3644, 2021. DOI. 10.3390/rs13183644.
- CONSTELLATION OBSERVING SYSTEM FOR METEOROLOGY, IONOSPHERE AND CLIMATE (COSMIC). **COSMIC-2**. Disponível em: <<https://www.cosmic.ucar.edu/cosmic2/index.html>>. Acesso em: fev. 2021a.
- CONSTELLATION OBSERVING SYSTEM FOR METEOROLOGY, IONOSPHERE AND CLIMATE (COSMIC). **Data Products**. Disponível em: <<https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-offer/data-products-support/>>. Acesso em abr. 2021b.
- CUCURULL, L.; DERBER, J. C.; TREADON, R.; PURSER, R. J. Assimilation of Global Positioning System Radio Occultation Observations into NCEP's Global Data Assimilation System. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 9, p. 3174-3193, 2007. DOI. 10.1175/mwr3461.1.
- ELGERED, G.; WICKERT, J. Monitoring of the Neutral Atmosphere. In: TEUNISSEN, P., MONTENBRUCK, O. (Eds). **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, 2017. p. 1109-1138.
- EO PORTAL DIRECTORY. **FormoSat-7 / COSMIC-2 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)**. Disponível em: <<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-7>>. Acesso em: fev. 2019a.
- EO PORTAL DIRECTORY. **GRACE-FO (Gravity Recovery And Climate Experiment - Follow-on)**.

- Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/g/grace-fo>>. Acesso em: fev. 2019b.
- EUROPEAN ORGANISATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES (EUMETSAT). **Metop series**. Disponível em: <<https://www.eumetsat.int/our-satellites/metop-series?sjid=future>>. Acesso em: ago. 2021.
- FISCHBACH, F. F. A satellite method for temperature and pressure below 24 km. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 9, p. 528-532, 1965. DOI. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-46.9.528>.
- FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V.R. Atmosphere of Venus as studied with the Mariner 5 dual radio-frequency occultation experiment. **Radio Science**, v. 4, n. 10, p. 879–897, 1969. DOI. [10.1029/RS004i010p00879](https://doi.org/10.1029/RS004i010p00879).
- FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V.R. The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner IV occultation data. **Planetary and Space Science**, v. 16, n. 8, p. 1035–1059, 1968. DOI. [10.1016/0032-0633\(68\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(68)90020-2).
- FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V.R.; GARRIOTT, O. K.; SMITH, F. L. The two-frequency bistatic Radar-Occultation method for study of planetary ionospheres. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 15, p. 3701–3710, 1965. DOI. [10.1029/JZ070i015p03701](https://doi.org/10.1029/JZ070i015p03701).
- FJELDBO, G.; KLIORÉ, A.; ESHLEMAN, V.R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V Radio Occultation Experiments. **The Astronomical Journal**, v. 76, n. 2, p. 123–140, 1971. DOI. [10.1086/111096](https://doi.org/10.1086/111096).
- FU, N.; JIANG, M.; LI, F.; GUO, P.; HOU, C.; WU, M.; KAN, L. Assessment of ZTD Derived from COSMIC Occultation Data with ECWMF, Radiosondes, and GNSS. **Sensors**, v. 22, n. 14, p. 5209, 2022. DOI. [10.3390/s22145209](https://doi.org/10.3390/s22145209).
- GARCIA-FERNANDEZ, M. **Contributions to the 3D Ionospheric Sounding with GPS data**. 2004. Tese (Doutorado em Ciência Espacial e Tecnologia) - Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha. 2004.
- GUNTER'S SPACE PAGE. **FORMOSAT-7/COSMIC-2**. Disponível em: <https://space.skyrocket.de/doc_sdat/formosat-7-cosmic-2.htm>. Acesso em: fev. 2019.
- HAIJ, G.; LEE, L.; PI, X.; ROMANS, L.; SCHREINER, W.; STRAUS, P.; WANG, C. COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather. **Terrestrial atmospheric and oceanic sciences**, v. 11, n. 1, p. 235-272, 2000.
- HAIJ, G. A.; ROMANS, L. J. Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment. **Radio Science**, v. 33, n. 1, p. 175-190, 1998. DOI. [10.1029/97RS03183](https://doi.org/10.1029/97RS03183).
- HAIJ, G.A.; KURSINSKI, E.R.; ROMANS, L.J.; BERTIGER, W.I.; LEROY, S.S. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 4, p. 451-469, 2002. DOI. [10.1016/S1364-6826\(01\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00114-6).
- HE, W.; HO, S. P.; CHEN, H.; ZHOU, X.; HUNT, D.; KUO, Y. H. Assessment of radiosonde temperature measurements in the upper troposphere and lower stratosphere using COSMIC radio occultation data. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 17, 2009. DOI. [10.1029/2009GL038712](https://doi.org/10.1029/2009GL038712).
- HEALY, S. B.; THÉPAUT, J.-N. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, n. 615, p. 605-623, 2006. DOI. [10.1256/qj.04.182](https://doi.org/10.1256/qj.04.182).
- HEALY, S. B.; WICKERT, J.; MICHALAK, G.; SCHMIDT, T.; BEYERLE, G. Combined forecast impact of GRACE-A and CHAMP GPS radio occultation bending angle profiles. **Atmospheric Science Letters**, v. 8, n. 2, p. 43-50, 2007. DOI. [10.1002/asl.149](https://doi.org/10.1002/asl.149).
- HOCKE, K. Inversion of GPS meteorology data. In: **Annales Geophysicae**. Springer-Verlag, 1997. p. 443-450.
- HOLZSCHUH, M. L.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Avaliação de perfis atmosféricos de rádio ocultação GPS do satélite CHAMP sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 25, p. 147-155, 2010. DOI. [10.1590/S0102-77862010000200001](https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200001).

- HSU, C.-T.; MATSUO, T.; LIU, J.-Y. Impact of Assimilating the FORMOSAT-3/COSMIC and FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO Data on the Midlatitude and Low-Latitude Ionospheric Specification. **Earth and Space Science**, v. 5, n. 12, p. 875-890, 2018. DOI. 10.1029/2018EA000447.
- JAKOWSKI, N.; WEHRENFENNIG, A.; HEISE, S.; REIGBER, C.; LÜHR, H.; GRUNWALDT, L.; MEEHAN, T. K. GPS radio occultation measurements of the ionosphere from CHAMP: Early results. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 10, 2002. DOI. 10.1029/2001GL014364.
- JEREZ, G. O. **Estimativa e análise de perfis de densidade de elétrons para a região brasileira: integração de rádio ocultação GNSS e de informações ionosféricas provenientes de estações GNSS terrestres**. 2021. 189p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2021.
- KLIORE, A. J.; FJELDBO, G.; SEIDEL, B. L.; SWEETNAM, D. N.; SESPLAUKIS, T. T.; WOICESHYN, P. M.; RASOOL, S. I. The atmosphere of Io from Pioneer 10 radio occultation measurements. **Icarus**, v. 24, n. 4, p. 407-410, 1975. DOI. 10.1016/0019-1035(75)90057-3.
- KLIORE, A. J.; PATEL, I. R.; LINDAL, G. F.; SWEETNAM, D. N.; HOTZ, H. B.; WAITE JR, J. H.; MCDONOUGH, T. R. Structure of the ionosphere and atmosphere of Saturn from Pioneer 11 Saturn radio occultation. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 85, n. A11, p. 5857-5870, 1980. DOI. 10.1029/JA085iA11p05857.
- KURSINSKI, E. R. **The GPS radio occultation concept: theoretical performance and initial results**. 1997. Tese (Doutorado em Ciências Planetárias) – California Institute of Technology, Pasadena. 1997.
- KURSINSKI, E. R. Weather & Space Weather RO Data from PlanetiQ Commercial GNSS RO. In: 6th ROM SAF Data User Workshop and 7th IROWG Workshop, 2019, Elsinore. **Proceedings of the Joint 6th ROM SAF Data User Workshop and 7th IROWG Workshop**, Elsinore: ROMSAF, 2019. p. 19-25.
- KURSINSKI, E. R.; BRANDMEYER, J.; BOTMICK, A.; LEROY, S. S. Initial Atmosphere and Ionosphere Results from PlanetiQ's First GNSS RO Satellite. In: AGU Fall Meeting, 2020, Online. **AGU Fall Meeting Abstracts**, Online: AGU, 2020, p. N029-05.
- KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; BERTIGER, W. I.; LEROY, S. S.; MEEHAN, T. K.; ROMANS, L. J.; SCHOFIELD, J. T.; MCCLEESE, D. J.; MELBOURNE, W. G.; THORNTON, C. L.; Y; YUNCK, T. P. EYRE, J. R.; NAGATANI, R. N. Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System. **Science**, v. 271, n. 5252, p. 1107-1110, 1996. DOI. 10.1126/science.271.5252.1107.
- KURSINSKI, E.; HAJJ, G.; SCHOFIELD, J.; LINFIELD, R.; HARDY, K. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D19, p. 23429-23465, 1997. DOI. 10.1029/97JD01569.
- KURSINSKI, E.R.; HAJJ, G.A.; LEROY, S.S.; HERMAN, B. The GPS Radio Occultation Technique. In: LEE, L.C.; ROCKEN, C.; KURSINSKI, R. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Hong Kong: Springer-Verlag, 2000.
- LINDAL, G. F.; LYONS, J. R.; SWEETNAM, D. N.; ESHLEMAN, V. R.; HINSON, D. P.; TYLER, G. L. The atmosphere of Uranus: Results of radio occultation measurements with Voyager 2. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 92, n. A13, p. 14987-15001, 1987. DOI. 10.1029/JA092iA13p14987.
- LINDAL, G. F.; SWEETNAM, D. N.; ESHLEMAN, V. R. The atmosphere of Saturn-an analysis of the Voyager radio occultation measurements. **The Astronomical Journal**, v. 90, p. 1136-1146, 1985.
- LUSIGNAN, B.; MODRELL, G.; MORRISON, A.; POMALAZA, J.; UNGAR, S. G. Sensing the Earth's atmosphere with occultation satellites. **Proceedings of the IEEE**, v. 57, n. 4, p. 458-467, 1969. DOI. 10.1109/PROC.1969.7000.
- MANNUCCI, A. J.; AO, C. O.; YOUNG, L. E.; MEEHAN, T. K. Studying the atmosphere using global navigation satellites. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 95, n. 43, p. 389-391, 2014. DOI. 10.1002/2014EO430001.

- McNAMARA, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Florida: Krieger Publishing Company, 1991.
- MENZEL, D. H.; DE VAUCOULEURS, G. Results from the Occultation of Regulus by Venus, July 7, 1959. **The Astronomical Journal**, v. 65, p. 351, 1960.
- MUNGUFENI, P.; RABIU, B. A.; OKOH, D.; JURUA, E. Characterisation of Total Electron Content over African region using Radio Occultation observations of COSMIC satellites. **Advances in Space Research**, v. 65, n.1, p. 19-29, 2020. DOI. 10.1016/j.asr.2019.08.009.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **NASA History: 45 Years Ago, Mariner 10 Off to Venus and Mercury**. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/45-years-ago-mariner-10-off-to-venus-and-mercury>>. Acesso em: fev. 2019b.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION/JET PROPULSION LABORATORY (NASA/JPL). **GRACE-FO**. Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/images/gracefo/20180430/PIA22440-16.jpg>>. Acesso em: fev. 2019d.
- NCAR & UCAR NEWS. **After 14 years, first COSMIC satellite mission come to an end**. Disponível em: < <https://news.ucar.edu/132736/after-14-years-first-cosmic-satellite-mission-comes-end>>. Acesso em: jun. 2020.
- NIE, Y.; SHEN, Y.; CHEN, Q. Combination Analysis of Future Polar-Type Gravity Mission and GRACE Follow-On. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 200, 2019. DOI. 10.3390/rs11020200.
- OPPA. **Office of Projects, Planning and Analysis: Metop-C**. Disponível em: <<https://www.nesdis.noaa.gov/OPPA/metopc.php>>. Acesso em: Mar. 2019.
- PHYSICAL OCEANOGRAPHY DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER (PODAAC). **GRACE-FO**. Disponível em: <<https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE-FO>>. Acesso em: fev. 2019.
- PROL, F. D. S.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; CAMARGO, P. D. O.; MUELLA, M. T. D. A. H. Spatial and temporal features of the topside ionospheric electron density by a new model based on GPS radio occultation data. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, n. 3, p. 2104-2115, 2018a. DOI. 10.1002/2017JA024936.
- PROL, F. S.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; MUELLA, M. T. A. H.; CAMARGO, P. O. Tomographic imaging of ionospheric plasma bubbles based on GNSS and radio occultation measurements. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1529, 2018b. DOI. 10.3390/rs10101529.
- PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; MUELLA, M. T. A. H. A new method for ionospheric tomography and its assessment by ionosonde electron density, GPS TEC, and single-frequency PPP. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 5, p. 2571-2582, 2018c. DOI. 10.1109/TGRS.2018.2874974.
- PROL, F. S.; SMIRNOV, A. G.; HOQUE, M. M.; SHPRITS, Y. Y. Combined model of topside ionosphere and plasmasphere derived from radio-occultation and Van Allen Probes data. **Scientific Reports**, v. 12, n.1, p. 1-11, 2022. DOI. 10.1038/s41598-022-13302-1.
- SAPUCCI, L. F.; BASTARZ, C. F.; CERQUEIRA, F.; AVANÇO, L. A.; HERDIES, D. L. Impacto de perfis de rádio ocultação GNSS na qualidade das Previsões de tempo do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 551-567, 2014. DOI. 10.1590/0102-778620140013.
- SAPUCCI, L. F.; DINIZ, F. L.; BASTARZ, C. F.; AVANÇO, L. A. Inclusion of Global Navigation Satellite System radio occultation data into Center for Weather Forecast and Climate Studies Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) using the Radio Occultation Processing Package as an observation operator. **Meteorological Applications**, v. 23, n. 2, p. 328-338, 2016. DOI. 10.1002/met.1559.
- SCHREINER, W. S.; WEISS, J. P.; ANTHES, R. A.; BRAUN, J.; CHU, V.; FONG, J.; ZENG, Z. COSMIC-2 radio occultation constellation: First results. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 4, 2020. DOI. 10.1029/2019GL086841.
- SCHREINER, W.; ROCKEN, C.; SOKOLOVSKIY, S.; SYNDERGAARD, S.; HUNT, D. Estimates of the

- precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 4, 2007. DOI. 10.1029/2006GL027557.
- SCHREINER, W.; SOKOLOVSKIY, S.; ROCKEN, C.; HUNT, D. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere. **Radio Science**, v. 34, n. 4, p. 949-966, 1999. DOI. 10.1029/1999RS900034.
- SUN, Y. Y.; CHEN, C. H.; LIN, C. Y. Detection of Vertical Changes in the Ionospheric Electron Density Structures by the Radio Occultation Technique Onboard the FORMOSAT-7/COSMIC2 Mission over the Eruption of the Tonga Underwater Volcano on 15 January 2022. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, p. 4266, 2022. DOI. 10.3390/rs14174266.
- SYNDERGAARD, S. **Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique**. 1999. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Danish Meteorological Institute, Copenhagen. 1999.
- TSENG, T. P.; CHEN, S. Y.; CHEN, K. L.; HUANG, C. Y.; YEH, W. H. Determination of near real-time GNSS satellite clocks for the FORMOSAT-7/COSMIC-2 satellite mission. **GPS Solutions**, v. 22, n. 2, p. 47, 2018. DOI. 10.1007/s10291-018-0714-1.
- WICKERT, J.; REIGBER, C.; BEYERLE, G.; KÖNIG, R.; MARQUARDT, C.; SCHMIDT, T.; SCHMIDT, T.; GRUNWALDT, L.; GALAS, R.; MEEHLAN, T. K.; MELBOURNE, W. G.; HOCKE, K. Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 17, p. 3263-3266, 2001. DOI. 10.1029/2001GL013117.
- VILKOV, I. A.; MATYUGOV, S. S.; YAKOVLEV, O. I. Scintillation and Absorption of Radio Waves in the Earth's Atmosphere in Radio Occultation Experiments on the Satellite-to-Satellite Link. **Turkish Journal of Physics**, v. 20, n. 8, p. 814-818, 1996.
- YAKOVLEV, O. I.; VILKOV, I. A.; ZAKHAROV, A. I.; KUCHERYAVENKOVA, I. L.; KUCHERYAVENKOV, A. I. Frequency shift, time delay, and refraction of radio waves in eclipse experiments along satellite-to-satellite path. **Journal of communications technology & electronics**, v. 40, n. 12, p. 73-80, 1995.
- YAKOVLEV, O. I.; MATYUGOV, S. S.; VILKOV, I. A.; ZAKHAROV, A. I.; KUCHERYAVENKOVA, I. L. Radio-wave phase and frequency fluctuations as observed in radio-eclipse experiments along a satellite-satellite link. **Journal of communications technology & electronics**, v. 41, n. 11, p. 993-998, 1996.
- YOUNG, H; FREEDMAN, R. **Física IV: Ótica e física moderna**. São Paulo: PEARSON ADDISON Wesley, 2009.
- YUE, X.; SCHREINER, W. S.; PEDATELLA, N.; ANTHES, R. A.; MANNUCCI, A. J.; STRAUS, P. R.; LIU, J. Y. Space weather observations by GNSS radio occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2. **Space Weather**, v. 12, n. 11, p. 616-621, 2014. DOI. 10.1002/2014SW001133.
- ZENG, Z.; BURNS, A.; WANG, W.; LEI, J.; SOLOMON, S.; SYNDERGAARD, S.; QIAN, L.; KUO, Y. H. Ionospheric annual asymmetry observed by the COSMIC radio occultation measurements and simulated by the TIEGCM. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A7, 2008. DOI. 10.1029/2007JA012897.

Biografia do autor principal



Gabriel Oliveira Jerez possui graduação em Engenharia Cartográfica (2014) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Possui mestrado (2017) e doutorado (2021) em Ciências Cartográficas também pela UNESP. Durante o doutorado realizou período sanduíche junto ao Departamento de Matemática da *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC) (dez/2019-abr/2021). Atualmente é pesquisador de pós-doutorado no Departamento de Cartografia da UNESP de Presidente Prudente. Seus interesses de pesquisa incluem posicionamento GNSS, irregularidades ionosféricas e rádio ocultação GNSS.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.