



Estimativa da Umidade do Solo por Refletometria GNSS: uma Revisão Conceitual

Soil Moisture Estimation with GNSS Reflectometry: a Conceptual Review

Jorge Felipe Euriques ¹, Claudia Pereira Krueger ², Wagner Carrupt Machado ³, Luiz Fernando Sapucci ⁴ e Felipe Geremia-Nievinski ⁵

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil. jorge.euriques@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9234-7551>

² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil. cprkrueger64@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4839-1317>

³ Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Monte Carmelo, Brasil. wagnercarrupt@ufu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3112-7808>

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Cachoeira Paulista, Brasil. luiz.sapucci@inpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8420-8033>

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geodésia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, Brasil. felipe.nievinski@ufrgs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3325-1987>

Recebido: 05.2020 | Aceito: 10.2020

Resumo: O monitoramento da umidade do solo possibilita o manejo e uso eficiente de recursos hídricos, sendo uma atividade importante em diversas áreas, tais como: no monitoramento de áreas de risco; delimitação de áreas suscetíveis a enchentes; atividades da geotecnia; e na agricultura. A Refletometria GNSS (GNSS-R) é um desenvolvimento científico e tecnológico que permite realizar sensoriamento remoto ou proximal, a depender da altura da antena em relação à superfície, com satélites de navegação. Neste método, explora-se os sinais GNSS que chegam à antena receptora de maneira direta e indireta, após reflexão nas superfícies existentes no entorno da antena. A combinação destes dois sinais ocasiona o efeito de multicaminho, que afeta as observáveis GNSS e deteriora o posicionamento. Por outro lado, ao interagir com estas superfícies, o sinal indireto permite estimar atributos acerca destas superfícies, como por exemplo a umidade do solo. Uma das principais vantagens em relação aos métodos convencionais reside no fato do GNSS-R proporcionar uma área de abrangência intermediária e o uso da estrutura bem estabelecida dos satélites GNSS, que garantem resolução temporal apropriada. O escopo deste trabalho é apresentar uma revisão conceitual acerca do GNSS-R aplicado no monitoramento da umidade do solo.

Palavras-chave: GNSS-R. Multicaminho. Umidade do Solo. SNR.

Abstract: Soil moisture monitoring enables efficient management and use of water resources, having great importance for several purposes, such as: monitoring of risk areas; delimitation of areas susceptible to flooding; geotechnical activities; and in agriculture development. GNSS Reflectometry (GNSS-R) is a scientific and technological development that allows one to perform proximal or remote sensing, depending on the antenna height concerning the surface, by means of navigation satellites. This method exploits GNSS signals indirectly reaching a receiver antenna after they are reflected on the surrounding surfaces. In this method, direct and indirect GNSS signals that reach the receiving antenna are exploited, after reflection on the surfaces existing around the antenna. The combination of these two signals causes the multipath effect, which affects GNSS observable and deteriorates positioning. On the other hand, when interacting with these reflecting surfaces one can estimate their properties. One of the main advantages of GNSS-R, when compared with the conventional methods, is the intermediate coverage area, as well as, the use of the well-defined structure of GNSS systems that guarantee appropriate temporal resolution. The scope of this paper is to present a conceptual review of GNSS-R applied to soil moisture monitoring.

Keywords: GNSS-R. Multipath. Soil Moisture. SNR.

1 INTRODUÇÃO

A umidade do solo pode ser definida como o conteúdo de água presente na zona insaturada do solo, também chamada de zona vadosa (HILLEL, 1998). Esta região contém a zona de raízes das plantas e se estende desde a superfície do solo até a profundidade do lençol freático não confinado, onde os poros do solo estão completamente preenchidos pela água (ARORA et al., 2019).

Seneviratne et al. (2010) indicam que a umidade do solo não se distribui espacialmente de maneira homogênea, seja ao longo da superfície do solo, horizontalmente, tampouco verticalmente, em profundidade. Conforme Tuller e Or (2004), essa grandeza é comumente expressa em relação a uma dada porção de solo, através de unidades gravimétricas, quando a razão é dada em termos de massa (g/g), ou unidades volumétricas, quando a razão é obtida entre o volume de água em um determinado volume do solo (cm^3/cm^3) (BABAEIAN et al., 2019).

A umidade do solo está ligada a processos que se caracterizam em diferentes escalas. De forma mais abrangente, ela está relacionada aos ciclos da água e biogeoquímicos, como também aos fluxos e troca de energia entre a superfície física da Terra e a atmosfera, influenciando fenômenos atmosféricos e o sistema terrestre (ENTEKHABI et al., 2010; ROBINSON et al., 2008). No âmbito do ciclo da água, quantificar a umidade do solo permite alimentar modelos para delimitação de áreas de recarga de aquíferos e áreas de inundação (OCHSNER et al., 2013). Como a água é um agente relevante nos deslocamentos de massa, a umidade do solo é um parâmetro a ser considerado nos sistemas de monitoramento de áreas de risco ou suscetíveis a desastres naturais, em atividades da geotecnia e no planejamento e controle de obras da construção civil. Localmente, esta grandeza tem grande relevância na agricultura, por exemplo, pois é essencial para o desenvolvimento saudável das plantas. Conforme Pereira (2001), o monitoramento da umidade do solo permite otimizar o uso de recursos hídricos e energéticos empregados nos mecanismos de irrigação. Deste modo, seu manejo contribui para o aumento da produção e, de maneira concomitante, com a preservação do meio ambiente.

A Refletometria GNSS (GNSS-R), do inglês *Global Navigation Satellite System Reflectometry*, vem sendo empregada com êxito nesta aplicação (Tabela 1), surgindo como método alternativo aos métodos convencionais (Seção 2). Este método permite a realização de sensoriamento remoto ou proximal explorando-se reflexões das ondas de rádio transmitidas pelos satélites GNSS. Isto possibilita estimar propriedades acerca da superfície de reflexão (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017), tais como a umidade de solo. Conforme Edokossi et al. (2020), a GNSS-R apresenta certas vantagens em relação aos demais métodos, dentre as quais: cobertura global; baixo custo; independência de condições climáticas; possibilidade de obtenção de informações quase em tempo real; e o rápido tempo de revisita dos satélites GNSS. Neste artigo apresenta-se uma revisão conceitual acerca do método GNSS-R na estimativa da umidade do solo.

2 MÉTODOS CONVENCIONAIS

Existem diversas formas para se determinar a umidade do solo, seja pelo método direto, ou por métodos indiretos (SENEVIRATNE et al., 2010). No método gravimétrico ou de estufa, a umidade é medida diretamente. Em laboratório, a massa da água contida em uma amostra de solo é determinada pela diferença de pesagem antes e após secagem. O volume de água da amostra é calculado dividindo-se a massa pela sua densidade e a razão entre este volume e o volume da amostra resulta na umidade volumétrica do solo (HANSON, 2009). De acordo com Mendes (2006), este é o método mais acurado, sendo recomendado na calibração de equipamentos dos métodos indiretos. Contudo, ele proporciona determinações pontuais, que em alguns casos podem não ser representativas da área de interesse. Além disto, é trabalhoso e destrutivo, devido à coleta de amostra do solo ser necessária (ZHANG et al., 2014). Portanto, não é adequado para o monitoramento contínuo. Nos demais métodos a umidade do solo é estimada indiretamente a partir da medida de propriedades físicas do solo que variam em função da umidade. Nestes casos, as medidas podem ser efetuadas através de sondas de contato instaladas *in situ*, ou então, por sensoriamento remoto ou proximal (BABAEIAN et al., 2019).

As sondas são autônomas e permitem o amplo registro de dados, permitindo o monitoramento

contínuo. A principal propriedade explorada por estes equipamentos é a permissividade do solo. Conforme Seneviratne et al. (2010), as duas técnicas mais comuns entre as sondas que medem a permissividade são a TDR (*Time Domain Reflectometry*¹) e a FDR (*Frequency Domain Reflectometry*). Nas sondas TDR a permissividade é determinada através da variação do tempo de propagação de um pulso eletromagnético. Por outro lado, nas FDR ou de capacitância, ela é estimada em função da variação da frequência do pulso eletromagnético (LIMA, SILVA e KOIDE, 2012). Estas sondas são precisas, porém limitadas em termos de alcance, que é de poucos centímetros no entorno do sensor. Além disto, as sondas de capacitância têm limitações relacionadas à composição do solo, principalmente em função do teor de salinidade e de óxidos de ferro (DELTA-T DEVICES LTD, 2001).

Ademais, pode-se avaliar a moderação de nêutrons rápidos, o que está ligado à presença de átomos de hidrogênio. As sondas de nêutrons podem ser ativas ou passivas. As ativas possuem uma fonte de radiação própria, principalmente de Amerício e Berilo, para dar origem aos nêutrons rápidos (PEREIRA, 2001). Elas possuem a desvantagem de apresentar riscos biológicos ao operador do equipamento e ao meio ambiente devido à emissão da radiação ionizante. Por sua vez, as sondas passivas exploram a radiação proveniente de fontes externas (extraterrestres) que originam raios cósmicos galácticos. Quando estes raios adentram a atmosfera dão origem a uma cascata de nêutrons com alta energia que continuam a se propagar. Ao atingirem o solo, surge uma segunda cascata de nêutrons, os quais são moderados por átomos de hidrogênio contidos na água que caracteriza a umidade do solo (DESILETS; ZREDA; FERRÉ, 2010). As sondas da rede COSMOS (*COsmic-ray Soil Moisture Observing System*), exploram esta propriedade (ZREDA et al., 2012). Elas têm alcance de centenas de metros, são acuradas e permitem o registro amplo e autônomo dos dados, entretanto, podem ter custo elevado.

Por outro lado, através do sensoriamento remoto orbital e aéreo, atinge-se um nível de abrangência global ou regional (respectivamente), porém com informações generalizadas (VEY et al., 2016). A resolução espacial obtida com sensores orbitais é de aproximadamente 100 m para sensores ativos (radares) e 10 km para sensores passivos (radiômetros) (EDOKOSSI et al., 2020). Além disto, a resolução temporal, que está ligada à revisita do satélite sobre o mesmo local, é baixa. Estas características dificultam seu emprego em algumas aplicações, como no caso da agricultura. Ondas eletromagnéticas de diferentes faixas do espectro podem ser empregadas, do visível às micro-ondas, através de sensores ativos e passivos. Neste âmbito, podem ser citadas as missões satelitais *Soil Moisture and Ocean Salinity satellite* (SMOS) da Agência Espacial Europeia (KERR et al., 2001) e *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) da Agência Espacial dos Estados Unidos (ENTEKHABI et al., 2010). Ambas empregam ondas de rádio, em combinações com sensores ativos e passivos. Também podem ser utilizadas nesta temática outras missões como: *Special Sensor Microwave/Imager* (DE RIDDER, 2003), *Tropical Rainfall Measuring Mission* (GAO et al., 2006) e *Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System* (XIE; MENENT; JIA, 2019), e missões gravimétricas como a *Gravity Recovery and Climate Experiment* (SWENSON et al., 2008).

3 REFLETOMETRIA GNSS

Pesquisas têm mostrado que a umidade do solo pode ser determinada por GNSS-R (Seção 4). Além dos resultados obtidos por estes pesquisadores demonstrarem a eficiência do GNSS-R nesta temática, algumas vantagens podem ser destacadas: 1) área de abrangência em escala intermediária entre os métodos convencionais (sondas de contato e imagens orbitais), com cerca de 50 metros para antenas com 2 metros de altura (TABIBI et al., 2017); 2) resolução espaço-temporal apropriada garantida pela estrutura GNSS existente, que conta com cobertura global, sinais enviados continuamente por dezenas de satélites, além da independência de condições climáticas (SEEBER, 2003); e 3) possibilidade do uso compartilhado de estações GNSS para o posicionamento e para a refletometria (LARSON; NIEVINSKI, 2013).

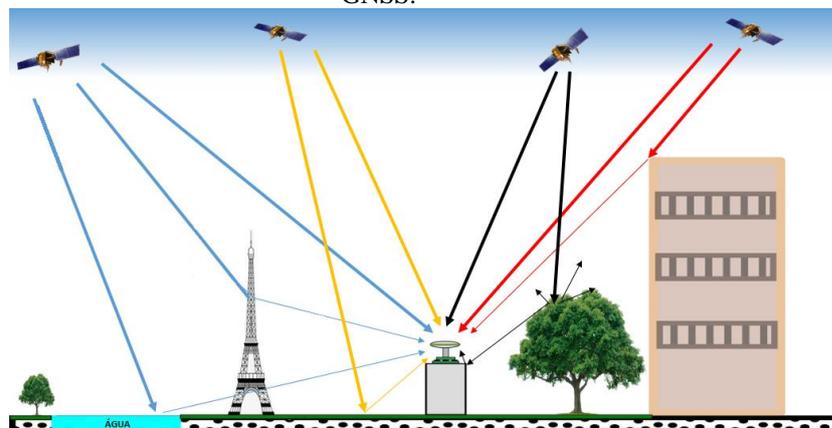
Os satélites GNSS transmitem ondas eletromagnéticas do tipo rádio ou micro-ondas com frequência no intervalo de 1 a 2 GHz, portanto, na banda L (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). Coincidentemente,

¹ Cabe ressaltar a relação de paronímia entre estes métodos convencionais de medição indireta da umidade do solo Refletometria no Domínio do Tempo (TDR) e Refletometria no Domínio da Frequência (FDR), e o método geodésico GNSS-R, que é baseado nas transmissões GNSS.

são próximas às frequências utilizadas nas missões orbitais SMOS e SMAP. Quando estas ondas refletem nas superfícies no entorno de uma antena GNSS, elas podem chegar a esta antena indiretamente (Figura 1) e com atraso de tempo devido ao percurso adicional percorrido (LEICK, 1995). A combinação ou sobreposição entre as ondas diretas e refletidas dá origem ao chamado efeito do multicaminho, que é uma das principais fontes de erros que afeta o posicionamento GNSS, dependendo da qualidade da antena (TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017).

Da interação com essas superfícies, as ondas de rádio têm suas características (amplitude, fase, polarização e frequência) alteradas, possibilitando a estimação de atributos acerca das superfícies refletoras (ROUSSEL et al., 2016). Este é o princípio do sensoriamento remoto, contemplando também a GNSS-R, no qual as observáveis afetadas pelas reflexões recebidas pelas antenas dos receptores são exploradas. Desta forma, o multicaminho, que é prejudicial ao posicionamento GNSS, viabiliza a GNSS-R, ampliando a gama de aplicações desta tecnologia.

Figura 1 – Recepção de ondas diretas e indiretas provenientes de reflexões nas superfícies de entorno de uma antena GNSS.



Fonte: Euriques (2019).

O método GNSS-R pode ser considerado como um radar multiestático, visto que a antena do receptor recebe múltiplas transmissões a partir de uma variedade de satélites (JIA; PEI, 2018). Essa configuração contrasta com radares monoestáticos, em que receptores e transmissores ficam na mesma plataforma, como no caso dos satélites altímetros nadirais.

Embora o conceito da Refletometria GNSS tenha sido proposto inicialmente por Martin-Neira (1993), grande parte do estado da arte procede da última década, onde se destacam aplicações que envolvem a determinação de atributos geométricos e de composição das superfícies refletoras. A altimetria é contemplada no primeiro caso e consiste na determinação da distância vertical entre a antena GNSS e a superfície de reflexão, por exemplo, o monitoramento da espessura da neve (ZHOU et al., 2019), do nível do mar (STRANDBERG; HOBIGER; HAAS, 2017), e do crescimento de vegetação (ZHANG et al., 2017). No caso da composição, cita-se a determinação da umidade do solo (TABIBI et al., 2015).

Como o multicaminho afeta todas as observáveis, a princípio o GNSS-R pode ser efetuado através da pseudodistância, do Doppler, da fase da onda portadora ou da Razão Sinal-Ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*). De acordo com Nievinski e Larson (2014a), a SNR pode ser simplificada como a potência da onda portadora (em watts) normalizada pela potência do ruído ou sua densidade espectral (watts ou watts por hertz), sendo frequentemente expressa em escala logarítmica, em decibel (dB) ou decibel-hertz (dB-Hz). Esta observável é registrada continuamente pelos receptores ao longo do rastreamento, considerando cada satélite individualmente (BILICH; LARSON, 2007).

Com o movimento dos satélites em suas órbitas, o atraso de propagação e a diferença de fase entre as ondas diretas e refletidas sofre variação, criando um padrão ou assinatura de interferência construtiva ou destrutiva entre as duas ondas sobrepostas, resultando em oscilações (Figura 2) nas séries temporais da SNR (TABIBI et al., 2015). A SNR é a observável GNSS que melhor revela o efeito do multicaminho, pois é invariável aos efeitos em comum entre os caminhos direto e indireto, mesmo com receptores mono frequência,

como por exemplo: erros relativos às órbitas, a maior parte dos atrasos atmosféricos e erros de sincronia, que afetam as demais observáveis GNSS (LARSON et al., 2008a). Em comparação, as demais observáveis exigem combinações entre duas ou três frequências de portadora para isolar o efeito do multicaminho. Em qualquer caso, é possível realizar determinações refletométricas a partir de rastreios GNSS projetados para posicionamento, não sendo exigidas alterações no equipamento ou na instalação da antena receptora (LARSON et al., 2010). Neste âmbito, pode-se utilizar dados provenientes de estações GNSS existentes, tais como da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS (RBMC), da Rede de Monitoramento Contínuo do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, ou do Serviço Internacional GNSS (*International GNSS Service*).

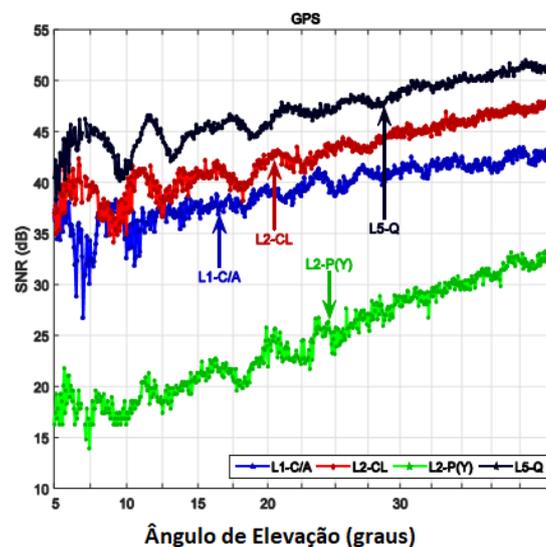
Diferentes denominações podem ser encontradas na literatura sobre a categoria do GNSS-R que explora instrumentos convencionais, desenvolvidos para posicionamento e adaptados à refletometria: Refletometria GNSS por Multicaminho (GNSS-MR, *GNSS Multipath Reflectometry*) por Nievinski et al. (2016); Técnica do Padrão de Interferência GNSS (GNSS-IPT, *GNSS Interference Pattern Technique*) por Rodriguez-Alvarez et al. (2011a); Refletometria GNSS Interferométrica (GNSS-IR, *GNSS Interferometric Reflectometry*) por Larson (2016); GNSS-R baseada em SNR, por Löfgren e Haas (2014). GNSS-MR pode ser desenvolvida com qualquer observável GNSS, enquanto que GNSS-IPT/IR é restrita ao emprego da observável do tipo SNR.

O acesso a SNR pode ser efetuado por duas diferentes maneiras:

- a) arquivo de observação do rastreio no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), o qual possui diferentes tipos de SNR para cada frequência da onda portadora (GURTNER; ESTEY, 2015). A partir da versão 3, são apresentados valores SNR em função das diferentes modulações em uma mesma frequência (p.ex., civil e militar);
- b) formato *National Marine Electronics Association* (NMEA) 0183, o qual se caracteriza como uma especificação relacionada a padronização de dados para a comunicação entre equipamentos eletrônicos (MARTÍN et al., 2020). Esta especificação inclui a transmissão de dados SNR através da mensagem GPS *Satellites in View* (\$GPGSV).

Na Figura 2 tem-se um interferograma SNR para diferentes modulações, considerando o arco ascendente de um satélite da constelação GPS. Observa-se que nem todos os sinais têm a mesma qualidade no que diz respeito à assinatura do multicaminho. Em geral, modulações GPS modernas, como L2C e L5, correspondem melhor aos modelos teóricos, enquanto modulações clássicas, como C/A e P(Y), exibem mais distorções (TABIBI et al., 2017).

Figura 2 –SNR (dB) por diferentes modulações para um arco ascendente de satélite GPS considerando ângulos de elevação entre 5 e 45 graus.



Fonte: Adaptada de Tabibi et al. (2017).

3.1 Área de abrangência

A área de abrangência da GNSS-R é definida principalmente em função da altura (H) da antena sobre a superfície. Neste sentido, o alcance é local, quando as estações GNSS estão instaladas a poucos metros do solo (LARSON et al., 2008a); regional, quando a antena receptora é fixada em plataformas aéreas como aviões convencionais e aeronaves remotamente pilotadas (RODRIGUEZ-ALVAREZ et al., 2013); ou global, quando o sensor está fixado em plataformas orbitais (GLEASON et al., 2005).

A área de abrangência para estações instaladas em solo pode ser aproximada pelas zonas de Fresnel. Cada zona é formada por uma elipse definida em termos do ângulo de elevação (e) e do azimute (a) sobre o horizonte da antena (Figura 3) (JIN; QIAN; KUTOGLU, 2016). Neste cálculo, também deve ser considerada a altura da antena e o comprimento de onda (λ) do sinal GNSS. Supondo a superfície plana e horizontal, Larson e Nievinski (2013) indicam a formulação para cálculo da primeira zona de Fresnel definida por seus semieixos maior (a) e menor (b), bem como a distância horizontal até o centro (D):

$$a = \frac{b}{\operatorname{sene}} \tag{1}$$

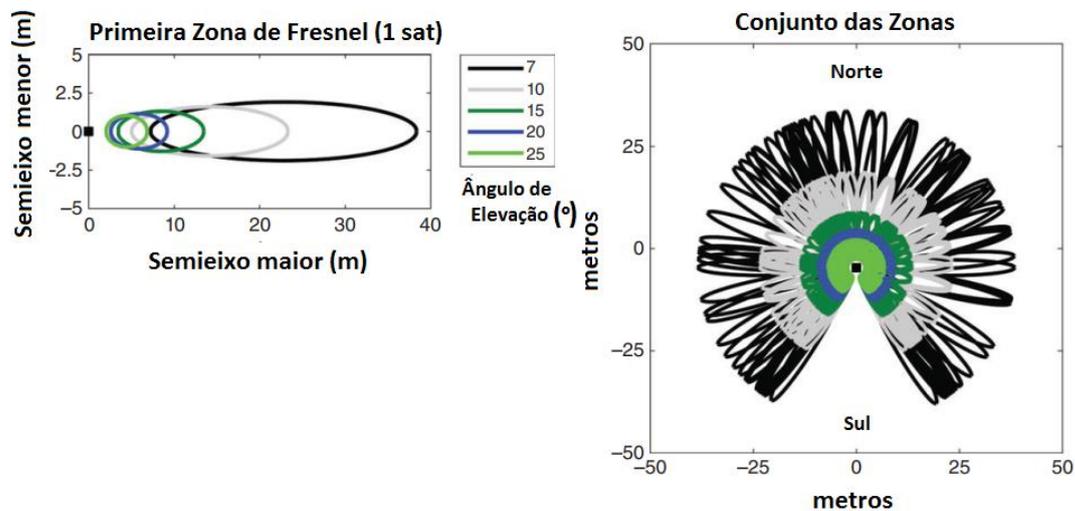
$$b = \sqrt{\frac{2dH}{\operatorname{sen} e} + \frac{d^2}{\operatorname{sen}^2 e}} \tag{2}$$

$$D = \frac{H}{\tan e} + \frac{d}{\operatorname{sin} e \tan e} \tag{3}$$

sendo $d = 0.5\lambda^{-1}$. O semieixo maior é posicionado ao longo do azimute de passagem do satélite.

Na Figura 3 são mostradas as zonas de Fresnel de uma estação GNSS com altura de antena de 1,8 metros. À esquerda, apresenta-se a zona de Fresnel de um satélite com azimute de 90° . Verifica-se as diferentes elipses dadas em função do ângulo de elevação, sendo que, quanto maior o ângulo de elevação (mais próximo ao zênite), menor e mais próxima é a respectiva elipse. À direita, tem-se o conjunto de zonas de Fresnel para esta estação, suposta no Hemisfério Sul. Nota-se a ausência de zonas nas proximidades da direção Sul, o que ocorre em função da inclinação do plano orbital dos satélites (LARSON, 2016). Na hipótese da estação GNSS se situar no Hemisfério Norte, esta lacuna ocorria naquela direção.

Figura 3 – Zonas de Fresnel de uma estação GNSS simulada considerando ângulos de elevação dos satélites entre 7 e 25 graus a partir do horizonte da antena.



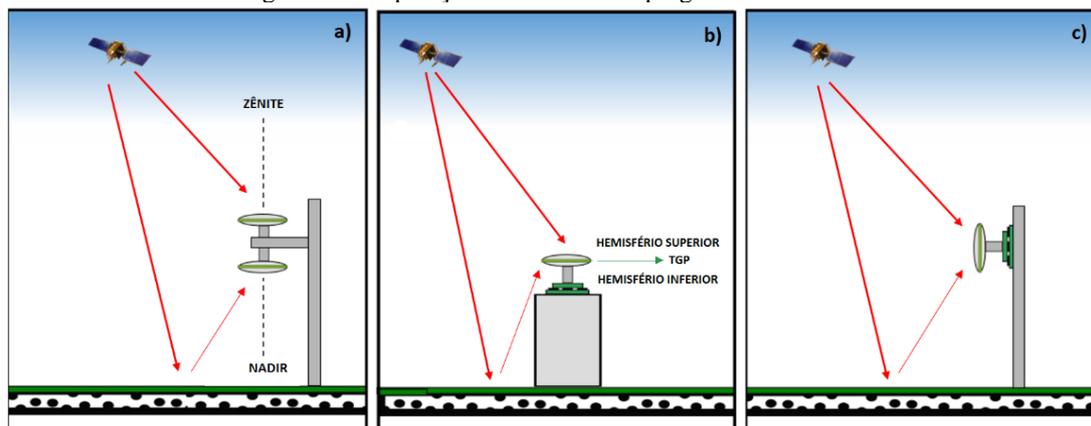
Fonte: Adaptada de Larson (2016).

3.2 Recepção das ondas refletidas

As ondas indiretas (refletidas) incidem, em grande parte, pelo hemisfério inferior da antena GNSS. Com isto, antenas GNSS são projetadas visando a rejeição ou mitigação das ondas refletidas. Por exemplo, é comum a existência de um prato metálico, dito plano terra (*ground plane*) ou anéis metálicos concêntricos (*choke rings*), logo abaixo do elemento principal da antena (MONICO, 2008). Configurações específicas foram desenvolvidas objetivando ampliar a recepção destas ondas (JIA; PEI, 2018), dentre estas cita-se:

- a) Duas antenas: uma delas orientada de maneira convencional para o zênite, visando à recepção de ondas diretas, e outra antena orientada para o nadir, ou próximo a ele, de maneira a captar as ondas refletidas. Esta foi a primeira configuração proposta para GNSS-R (MARTIN-NEIRA, 1993). Essa configuração não é compatível com GNSS-MR/IPT/IR, pois receptores GNSS convencionais são incapazes de rastrear as duas ondas separadamente. Uma ilustração pode ser vista na Figura 4a;
- b) Antena única e vertical: neste caso, utiliza-se apenas uma antena apontada para o zênite que capta tanto as ondas diretas quanto as refletidas, conforme ilustra a Figura 4b. Esta configuração permite o uso compartilhado da estação GNSS para posicionamento e refletometria (LARSON et al., 2008a);
- c) Antena única inclinada: análogo ao caso anterior, contudo com a antena apontada ao horizonte, ou próximo a este (Figura 4c) (RODRIGUEZ-ALVAREZ, 2009). Tem como vantagem amplificar a recepção das ondas refletidas no azimute visado e, como desvantagem, prejudicar a recepção no azimute oposto.

Figura 4 – Disposições de antenas empregadas no GNSS-R.



Fonte: Os autores (2021).

3.3 Modelagem da SNR

A modelagem da SNR para viabilizar a refletometria pode ser efetuada através da combinação entre um modelo físico, relativo à simulação teórica do multicaminho (NIEVINSKI; LARSON 2014b), e de um modelo inverso, pelo qual os parâmetros são estimados através das observações GNSS medidas em campo (NIEVINSKI; LARSON, 2014c).

3.3.1 MODELO FÍSICO: SIMULAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Zavorotny et al. (2015), o espalhamento das ondas eletromagnéticas pode ocorrer de três formas: difração, especular (reflexão coerente) e difusa (reflexão incoerente). Estas condições ocorrem principalmente em função das características das superfícies refletoras, sendo que as reflexões especulares são as que mais interferem nas ondas diretas, já que apenas ondas coerentes estão sujeitas a sobreposição. Nievinski e Monico (2016) afirmam que as observações coerentes mantêm uma relação estável na fase entre as ondas direta e refletida. Em contrapartida, observações incoerentes têm fase aleatória, ou seja, não mantêm uma

relação previsível entre estas ondas.

Quanto à polarização, as transmissões GNSS são do tipo circular à direita (*Right-Hand Circularly Polarised*, RHCP) (WU; JIN, 2019). Ao refletirem nas superfícies, duas componentes podem ser geradas, uma RHCP e outra polarizada circularmente à esquerda (*Left-Hand Circularly Polarised*, LHCP) (KATZBERG et al., 2006). A proporção entre estas componentes depende da direção de incidência da onda direta e das propriedades dielétricas da superfície refletora. De acordo com Nievinski e Larson (2014a), o campo elétrico da onda refletida (\overline{E}_r , em volts por metro) é um vetor complexo, portanto com magnitude e fase, dado conforme Eq. (4):

$$\overline{E}_r = S \cdot I \cdot \overline{R} \cdot \overline{E}_d \tag{4}$$

onde \overline{E}_d é o campo elétrico direto. O escalar S representa a perda de potência coerente, efeito da rugosidade da superfície, $S = \exp(-2\pi^2 \lambda^{-2} \sigma_h^2 \sin^2 e)$, sendo este um valor real e menor que 1, com σ_h sendo o desvio padrão da altura da superfície (em metros). Já o escalar $I = \exp(2\pi \lambda^{-1} \tau_i \sqrt{-1})$ é um número complexo, normalmente unitário, relacionado à diferença de fase resultante do atraso de propagação (τ_i) entre as ondas refletida e direta. Para uma superfície plana e horizontal (τ_i , em metros) pode ser estimado como função do ângulo de elevação do satélite e da altura da antena, conforme a Eq. (5) (GEORGIADOU; KLEUSBERG, 1988).

$$\tau_i = 2H \sin(e) \tag{5}$$

Na Eq. (5), H é a distância medida ao longo da vertical entre o centro de fase da antena e a superfície de reflexão (TABIBI et al., 2015); não é exatamente a altura geométrica da antena acima da superfície do solo, pois depende da profundidade de penetração da onda eletromagnética.

A matriz de reflexão \overline{R} , representa o efeito da composição da superfície sobre a onda eletromagnética, e é dada pela Eq. (6), conforme Nievinski e Larson (2014a):

$$\overline{R} = \begin{bmatrix} R^S & R^X \\ R^X & R^S \end{bmatrix} \tag{6}$$

Esta matriz é determinada pela combinação dos coeficientes de reflexão circularmente polarizados (escalares complexos), sendo: R^S copolarizado (Eq. (8)); e R^X de polarização cruzada (Eq. (9)) (NIEVINSKI; LARSON, 2014a).

Apesar do campo elétrico direto ter apenas componente RHCP (E_d^R), sendo a componente LHCP desprezível ($E_d^L \approx 0$), a reflexão pode ter as duas componentes não nulas (E_r^R, E_r^L). Assim, no caso do GNSS, a Eq. (4) pode ser simplificada conforme indicado na Eq. (7):

$$\overline{E}_r = [E_r^R, E_r^L]^T = S \cdot I [R^S, R^X]^T E_d^R \tag{7}$$

Os coeficientes de reflexão copolarizada e de polarização cruzada são definidos pelas fórmulas de Fresnel (NIEVINSKI; LARSON, 2014a):

$$R^S = \frac{R^H + R^V}{2} \tag{8}$$

$$R^X = \frac{R^H - R^V}{2} \tag{9}$$

Esses coeficientes (Eq. (8) e Eq. (9)) são escalares complexos que dependem do ângulo de incidência da onda. Em geral, a reflexão copolarizada tende a zero para a incidência normal (perpendicular à superfície), enquanto

a reflexão com polarização cruzada tende a zero para incidência rasante. No caso do GNSS, isso implica que satélites altos e baixos no céu tendem a ter reflexões LHCP e RHCP, respectivamente. Portanto, para satélites próximos ao zênite a recepção das reflexões seria melhor com uma antena LHCP.

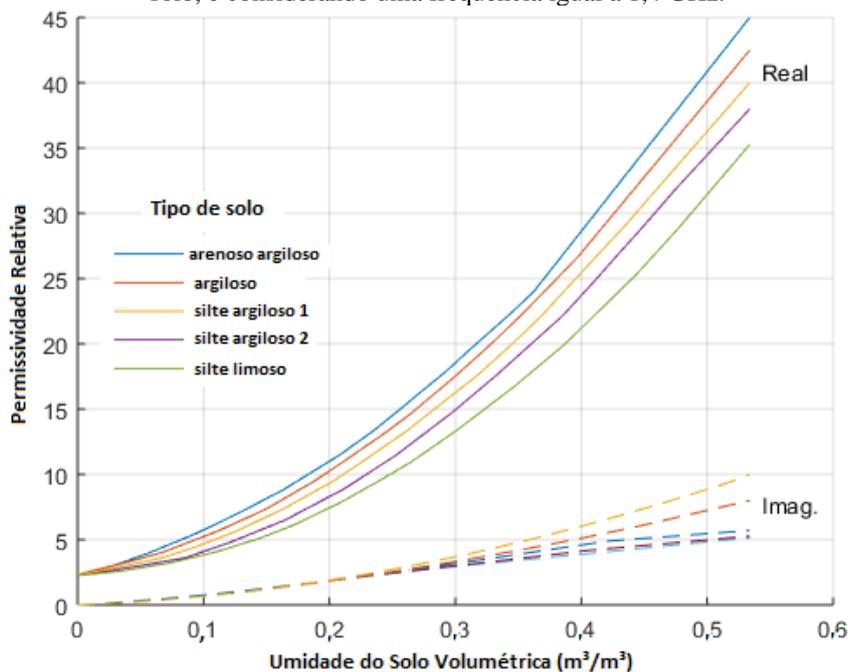
Nas Eq. (8) e Eq. (9), os coeficientes no lado direito das igualdades são os coeficientes de reflexão lineares, vertical (R^V) e horizontal (R^H) (NIEVINSKI; LARSON, 2014a):

$$R^V = \frac{(\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \text{sen}^2 \theta})}{(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \text{sen}^2 \theta})} \tag{10}$$

$$R^H = \frac{(\varepsilon \cdot \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \text{sen}^2 \theta})}{(\varepsilon \cdot \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \text{sen}^2 \theta})} \tag{11}$$

onde $\theta = 90^\circ - e$ (supondo superfície plana). A permissividade elétrica ($\varepsilon = \varepsilon' + \sqrt{-1}\varepsilon''$) do material que compõe a superfície de reflexão está relacionada com a condutividade deste material e é um número complexo composto por componentes real (ε') e imaginária (ε'') (EDOKOSSKI et al., 2020). No caso do solo, o valor dessas componentes varia com a umidade, conforme curvas calibradas empiricamente (Figura 5), as quais relacionam a permissividade relativa (adimensional) e a umidade para diferentes tipos de solo (HALLIKAINEN et al., 1985).

Figura 5 – Componentes complexas da permissividade relativa do solo em função da umidade, para diferentes tipos de solo, e considerando uma frequência igual a 1,4 GHz.



Fonte: Adaptada de Hallikainen et al. (1985).

De acordo com Tabibi et al. (2015), o campo elétrico indicado existe apenas no espaço entre as antenas transmissoras dos satélites e receptoras. Assim, é preciso calcular as tensões elétricas, em volts, das ondas diretas (V_d) e refletidas (V_r) induzidas na conexão elétrica entre a antena até o receptor. Isso é feito multiplicando o vetor campo elétrico pelo comprimento efetivo da antena (\bar{L} , um vetor complexo, em metros):

$$V_d = E_d^R \cdot L_d^R \tag{12}$$

$$V_r = L_r^R \cdot E_r^R + L_r^L \cdot E_r^L = S \cdot I \cdot X \cdot E_d^R \tag{13}$$

Nota-se que há componentes de L para cada polarização (RHCP ou LHCP), cuja indicação está sobrescrita, e para direção de chegada da onda (direta ou refletida), com indicação subscrita; por exemplo, L_d^R é a resposta da antena para a onda direta RHCP. A magnitude e o argumento de cada componente de L advém, respectivamente, do padrão de ganho e da variação de centro de fase da antena, ambos previamente calibrados. De acordo com Tabibi et al. (2015), o fator $X = L_r^R R^S + L_r^L R^X$ representa a interação entre as respostas da antena (L) e da superfície refletora (R) e, portanto, depende da umidade do solo.

Finalmente, a tensão combinada, resultante da sobreposição entre as duas ondas, é simplesmente $V = V_d + V_r$. Essa soma ocorre no plano complexo, separadamente para as componentes real e imaginária. A potência correspondente $P = V^2$, em watts, é dada por:

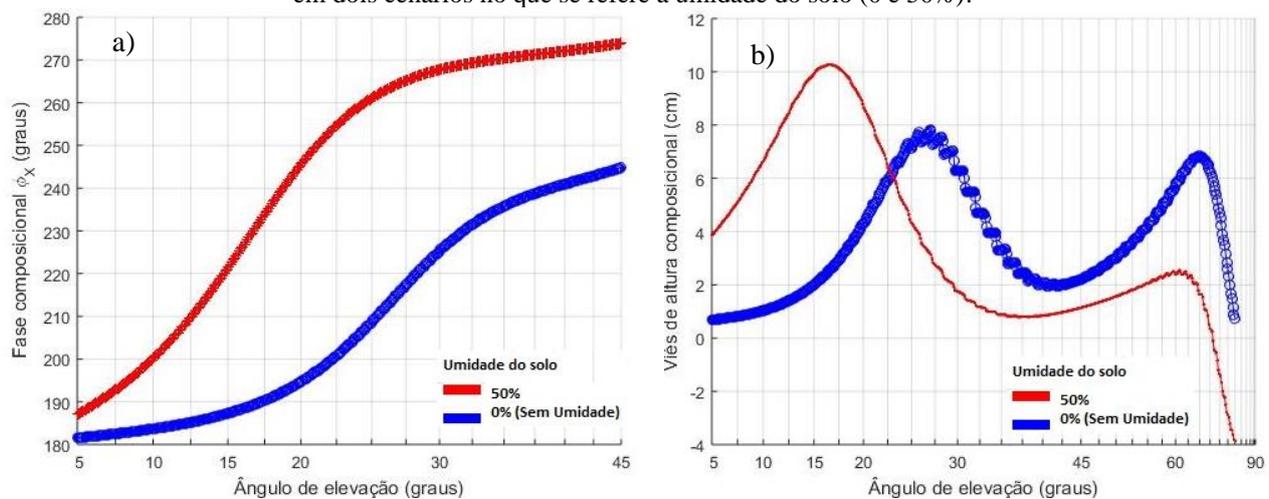
$$P = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}\cos\phi_i \tag{14}$$

Esta grandeza (P) envolve a potência da onda direta ($P_d = |V_d|^2$) e a potência da onda refletida ($P_r = |V_r|^2$) acrescidas de um termo trigonométrico ditado pela chamada fase interferométrica (ϕ_i), que se refere à diferença entre as fases das duas tensões: $\phi_i = \phi_r - \phi_d = \arg(V_r) - \arg(V_d)$ (NIEVINSKI; LARSON, 2014a). Esta fase interferométrica é dominada pelo atraso de propagação (τ_i) proveniente do percurso adicional do sinal refletido (TABIBI et al., 2015), e é determinada aplicando-se a Eq. (15):

$$\phi_i \cong 2\pi\lambda^{-1}\tau_i + \phi_X = 2\pi\lambda^{-1}2H\text{sen}(e) + \phi_X \tag{15}$$

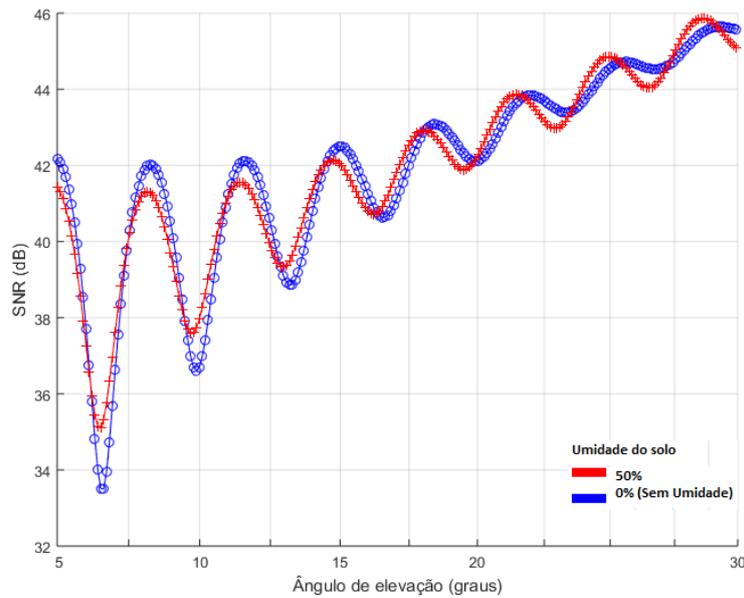
Esta equação inclui, também, o termo $\phi_X = \arg(X)$, chamado de fase composicional, que decorre da combinação das propriedades da superfície refletora e da antena GNSS (NIEVINSKI; LARSON, 2014a). Essa é a componente da fase que depende da umidade do solo e varia também com o ângulo de elevação do satélite, à medida que a onda refletida muda de polarização. Na Figura 6a, a relação entre estas grandezas é ilustrada em dois cenários teóricos: o primeiro em um solo totalmente seco (curva azul) e o segundo com o solo contendo 50% de umidade (curva vermelha). Conforme Liu e Larson (2018), a variação da fase composicional acarreta um viés na altura geométrica, designando um viés de altura composicional $H_X = \partial\phi_X/\partial k_z$, dada pela taxa de variação ϕ_X com relação a número-de-onda vertical, $k_z = 4\pi\lambda^{-1}\text{sen}(e)$. Na Figura 6b, o viés da altura simulado em função do ângulo de elevação nos dois cenários da umidade do solo é indicado.

Figura 6 – Fase composicional (ϕ_X) à esquerda, e viés da altura à direita, em função e do ângulo de elevação do satélite em dois cenários no que se refere a umidade do solo (0 e 50%).



Fonte: Os autores (2021).

Figura 7 – SNR (dB) simulado para dois cenários: solos sem umidade (em azul); solo com umidade de 50% (em vermelho).



Fonte: Os autores (2021).

Conforme Nievinski e Monico (2016), quando o receptor recebe o sinal de entrada, posteriormente ele registra a sua potência (P) normalizada pela potência do ruído (P_n , uma constante arbitrária nesse contexto), na forma da razão sinal/ruído ($SNR = P/P_n$), em watts por watts. Esta razão, por sua vez, pode ser modelada pela soma de duas componentes, $SNR = tSNR + dSNR$: uma tendência ($tSNR$) e um termo oscilante de interferência ($dSNR$) (TABIBI et al., 2017). A tendência, $tSNR = P_n^{-1}(P_d + P_r)$ decorre principalmente do padrão de ganho da antena e tem forma polinomial. Já a componente complementar, $dSNR = 2P_n^{-1}\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}\cos\phi_i$, decorre do alinhamento em fase ou fora de fase das ondas direta e refletida e tem forma de uma senoide amortecida. (NIEVINSKI; LARSON, 2014c). A Figura 7 apresenta duas simulações de SNR geradas a partir da modelagem direta (simulação teórica) para solos com diferentes umidades.

3.3.2 MODELO EMPÍRICO: AJUSTE DE CURVAS

O modelo físico apresentado na seção 3.3.1 pode ser aproximado pelo modelo empírico da Eq. (16). Nesta equação, k_z é adota- como variável independente, pois essa é a base do atraso de propagação $\phi_i = k_z H + \phi_X$, supondo uma superfície plana e horizontal (ZAVOROTNY et al., 2010).

$$\begin{aligned} tSNR &\approx (c_0 + c_1 k_z + c k_z^2 + \dots) \\ dSNR &\approx A_m \cdot \cos(H_m k_z + \phi_m) \end{aligned} \tag{16}$$

O parâmetro H_m é responsável pela frequência das oscilações. O somatório, $\sum c_i k_z^i$, é um polinômio que aproxima a tendência; já a senoide aproxima o complemento $dSNR$. A sua amplitude A_m (Eq. (17)), fase inicial ϕ_m (Eq. (18)) e a altura efetiva H_m (Eq. (19)), responsável pela frequência das oscilações do multicaminho, são dadas respectivamente pelas seguintes expressões (NIEVINSKI; LARSON, 2014c):

$$A_m \approx E\{2P_n^{-1}\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}\} \tag{17}$$

$$\phi_m \approx E\{\phi_X - k_z H_m\} \tag{18}$$

$$H_m \approx H + E\{H_X\} \tag{19}$$

Destaca-se que esses parâmetros empíricos (A_m , ϕ_m e H_m) são constantes definidas a partir de valores médios $E\{\cdot\}$ das variáveis resultantes da formulação rigorosa do modelo teórico. Por exemplo, o viés de altura composicional H_X acaba sendo absorvido em uma altura efetiva $H_m = H + H_X$ (Figura 6b) (NIEVINSKI; LARSON, 2014a). Já a fase empírica ϕ_m é a média da fase composicional residual, $\phi_X - k_z H_m$.

As grandezas A_m , ϕ_m e H_m observadas no SNR variam em função de fatores como o comprimento de onda, o meio de propagação e o equipamento empregado, além da influência do sinal refletido. Cada um destes parâmetros empíricos responde melhor a uma dada aplicação. A altura empírica H_m , tem sido usada principalmente para aplicações altimétricas, como o monitoramento do nível do mar e da espessura de neve. Por sua vez, a amplitude empírica A_m tem sido empregada no monitoramento da vegetação (SMALL et al., 2016) e das ondas do mar, pois tais fenômenos afetam a rugosidade da superfície. Já os parâmetros da fase empírica ϕ_m têm sido utilizados na estimativa da umidade do solo (CHEW et al., 2014).

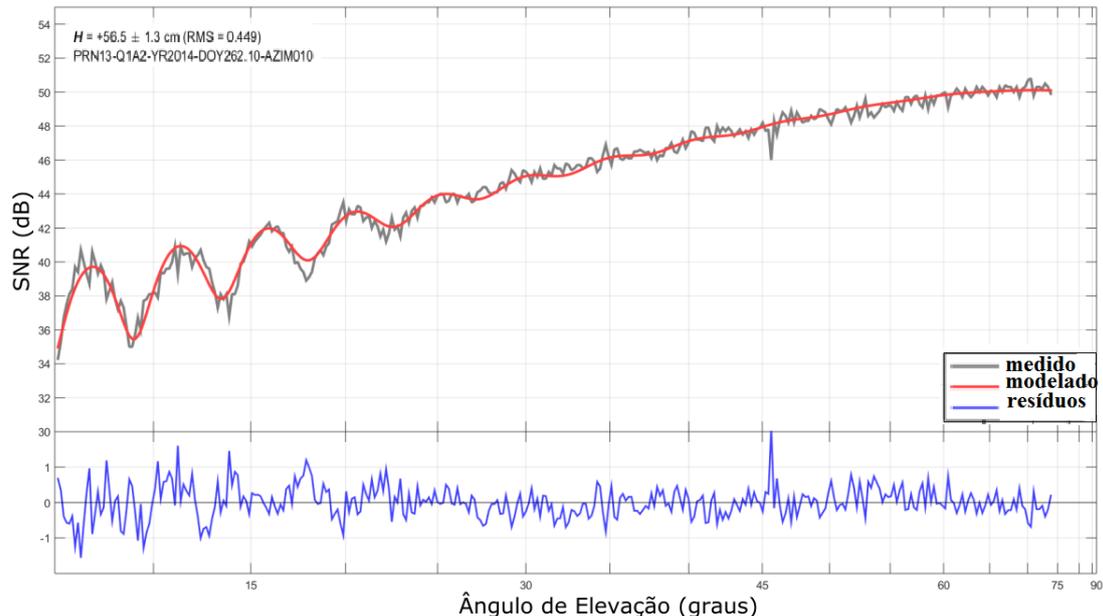
3.3.3 MODELO INVERSO: MODELO ESTATÍSTICO

Os modelos físico e empírico anteriormente citados podem ser combinados de forma ideal utilizando ao máximo a informação previamente disponível, como o modelo da antena e o tipo de solo e estimando como incógnitas apenas os efeitos que variam com o tempo, como a umidade do solo. Essa estratégia foi desenvolvida e aplicada inicialmente para a medição da neve (NIEVINSKI; LARSON, 2014c, 2014d). Posteriormente, foi adaptada visando o emprego na determinação da umidade do solo (TABIBI et al., 2015). A inversão é um modelo estatístico através do qual se determinam os parâmetros incógnitos a partir das observações GNSS. Estas observações medidas são confrontadas internamente com as observações simuladas pelo modelo físico direto (NIEVINSKI; LARSON, 2014b). Então, as observações simuladas são ajustadas às medidas, envolvendo neste processo um ajustamento por mínimos quadrados não linear dos parâmetros incógnitos (NIEVINSKI; LARSON, 2014c). Como resultados se tem os parâmetros estimados e suas respectivas precisões: amplitude, fase, altura da antena, e coeficientes polinomiais da tendência.

3.3.4 PÓS-PROCESSAMENTO: COMBINAÇÃO FÍSICO-ESTATÍSTICA

Posteriormente à inversão, através do módulo de pós-processamento, os parâmetros resultantes da inversão passam por inferências estatísticas, controle de qualidade e refinamento dos resultados (NIEVINSKI; LARSON, 2014d). Na Figura 8 são indicadas observáveis SNR simuladas e medidas, bem como os resíduos associados à diferença entre estas observáveis.

Figura 8 – Assinatura SNR simulada e medida e resíduos para um arco ascendente do satélite PRN13.



Fonte: Os autores (2021).

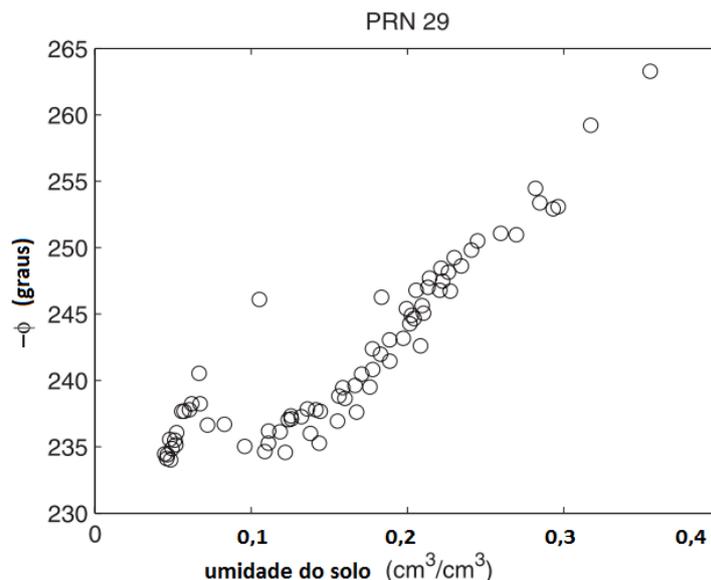
No caso da umidade do solo, os parâmetros de fase (deslocamento de fase e a respectiva taxa de variação da fase), têm suas precisões degradadas, pois são muito correlacionados. Como o volume de umidade interfere na profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas no solo (LARSON, 2016), isto cria variações na altura efetiva da antena. Desta forma, uma estratégia para melhorar a estimativa dos parâmetros de fase é definir um valor médio para esta altura e introduzi-lo como injeção no pós-processamento (EURIQUES, 2019).

Também é necessário combinar as estimativas independentes dos diversos satélites em uma média para a estação. Finalmente, uma curva de calibração, empregando-se um polinômio de primeiro ou segundo grau, estabelece a relação entre os parâmetros da fase interferométrica com os valores de umidade do solo. A Figura 9 exemplifica o relacionamento entre valores da fase (eixo vertical) e de umidade do solo (eixo horizontal).

Na Figura 9, os valores de fase foram estimados a partir das ondas refletidas do satélite GPS PRN 29 em uma dada estação, ao passo que os valores de umidade foram determinados pela média de 5 sondas TDR situadas próximas a esta estação (LARSON et al., 2008b).

A curva de calibração entre a umidade do solo e o deslocamento de fase é baseada em uma regressão linear na forma $a \cdot \phi_m + b$, onde a inclinação (coeficiente angular) é frequentemente reportada pela literatura como $a = 1,48 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3 \circ -1}$ (CHEW et al., 2015) ou reciprocamente $a^{-1} = 65^\circ / (\text{cm}^3 / \text{cm}^3)$ (VEY et al., 2016). Estes valores foram determinados a partir de simulações físicas, considerando os modelos específicos de antena dos receptores de estudo. O intercepto ou coeficiente constante da regressão (b) está associado à umidade do solo residual, que representa o valor mínimo de umidade no solo, sendo normalmente suposto $b = 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^3$ (VEY et al., 2016). De acordo com Chew et al. (2015), o coeficiente b pode ser obtido também através da interpolação de mapas de textura do solo.

Figura 9 – Relacionamento entre a fase refletométrica e a umidade do solo determinada por sondas TDR.



Fonte: Adaptada de Larson et al. (2008b).

3.4 Limitações

Os dois coeficientes de calibração da fase com relação à umidade são dependentes do local e do modelo de antena GNSS; portanto, são incertos para locais sem dados adicionais provenientes de métodos convencionais ou que tiveram troca de antena. Esta é possivelmente a maior limitação do emprego do método GNSS-R no monitoramento da umidade do solo.

Outras limitações devem ser consideradas como os efeitos da topografia, da cobertura de vegetação, da rugosidade da superfície, e temperatura do solo, pois podem afetar as determinações. De acordo com Zhang et al., (2017), a vegetação obstrui a incidência e reflexão de ondas de rádio sobre o solo. Além disso, conforme

exposto na seção 3.3.2, a vegetação afeta a rugosidade da superfície de reflexão, podendo influenciar na coerência dos sinais e nas determinações de amplitude e fase. Ademais, deve-se ponderar a localização da estação GNSS e as características do entorno para que se tenha visibilidade desobstruída ao solo da área de reflexão, evitando-se grades ou outros objetos, o que é uma condição básica para se efetuar GNSS-R.

Outra limitação, não apenas ao GNSS-R, mas dos demais métodos de sensoriamento que empregam micro-ondas (bandas L, C e X), concerne ao poder de penetração destas ondas eletromagnéticas no solo, que no caso das frequências GNSS está limitado a uma profundidade de cerca de 5 cm (EDOKOSSY et al., 2020). Desta forma, considerando que a umidade varia ao longo de um perfil vertical no solo, ao se efetuarem comparações estatísticas entre diferentes métodos, deve-se ponderar estas possíveis diferenças entre as profundidades de referência de cada método.

4 ESTUDOS CORRELATOS

Nesta seção, destacam-se as principais pesquisas em que a umidade do solo foi estimada através da GNSS-R via SNR por estações próximas ao solo. Na Tabela 1, estão ressaltadas informações como: autoria; altura da antena em relação ao solo (metros); duração dos rastreios (dias); sistema GNSS, sendo GPS (G), GLONASS (R), BeiDou (B), Galileo (E); modulação GNSS; cobertura do solo; método de validação das determinações refletométricas; bem como, a correlação (em porcentagem).

Outras modalidades, como GNSS-R a partir de plataformas aéreas e orbitais, não são abordadas. Maiores detalhes podem ser encontrados por exemplo em: Jin, Cardellach e Xie (2014); Masters, Axelrad e Katzberg (2004); e Chew e Small (2018); Eroglu et al. (2019).

Larson et al. (2008a) foram os pioneiros nesta temática e detectaram sincronismo entre as séries temporais de amplitudes dos sinais refletidos, obtida pela SNR via RINEX, e de umidade do solo obtida pelo modelo *Noah Land Surface Model*. Este modelo permite avaliar a evolução da umidade usando parâmetros meteorológicos como dados de entrada. Foram utilizados dados GPS registrados na estação TASH, localizada em Tashkent, no Uzbequistão. O entorno desta estação é coberto por vegetação baixa (gramínea). Os efeitos da vegetação na modelagem dos sinais refletivos não foram considerados. Para determinar a série de amplitudes foi utilizada a frequência L2, em um intervalo de 15° a 30°, em termos dos ângulos de elevação dos satélites. Adicionalmente, verificou-se que as duas séries tiveram comportamento semelhante frente a eventos de precipitação. Larson et al. (2008b), empregaram a modulação L2C (6 satélites do Bloco IIR-M), para ângulos de elevação restritos ao intervalo 10° a 30°, para uma estação situada em Marshall - Estados Unidos. A série de phases gerada foi convertida empiricamente em série de umidade do solo. Os resultados foram validados através da série compilada a partir de 10 sondas de contato (TDR), calibradas pelo método gravimétrico. Obteve-se a correlação de 85% entre as séries. Esta pesquisa foi ampliada em Larson et al. (2010), sendo utilizados ângulos de elevação entre 5° e 25°, registrados pela estação NCAR (Marshall), a qual faz parte da rede ativa *Earthscope Plate Boundary Observatory* (PBO). Avaliou-se a variação da altura efetiva do refletor, portanto, da profundidade de penetração das ondas no solo em função do teor de umidade. Verificaram que o parâmetro com maior correlação com a umidade próxima à superfície é o deslocamento da fase e obtiveram correlação de 90% com sondas FTD calibradas pelo método gravimétrico.

Tabela 1 – Panorama de pesquisas (publicadas em artigos científicos) relacionadas a estimativa da umidade do solo por GNSS-R efetuada por SNR registrada em estações próximas ao solo.

Autoria	Altura (m)	Duração (dias)	Sistema	Modulação	Cobertura	Validação	Corr. (%)
Larson et al. (2008a)	6	70	G	L2	Gramma	Noah Model	-
Larson et al. (2008b)	1,9	83	G	L2C	Gramma	TDR	85
Larson et al. (2010)	1,8	210	G	L2C	Gramma	TDR	90
Rodriguez-Alvarez et al. (2009)	2,6	60	G	L1	Solo	FDR	-
Rodriguez-Alvarez et al. (2011a)	4,5	25	G	L1	Milho	FDR	-

Autoria	Altura (m)	Duração (dias)	Sistema	Modulação	Cobertura	Validação	Corr. (%)
Rodriguez-Alvarez et al. (2011b)	3	600	G	L1	Solo	Hydra	-
Chew et al. (2014)	2,4	230	G	L2	Solo	TDR	91
Arroyo et al. (2014)	3,6	11	G	L1	Gramma	OzNet SM	90
Yan et al. (2014)	1	2	G	L1	Gramma/solo	TDR	-
Tabibi et al. (2015)	2	153	G	L2C; L5	Veg. esparsa	TDR	70; 80
Roussel et al. (2016)	1,7	40	G; R	L1	Solo	FDR	95
Chew et al. (2015)	1,5 a 2,1	730	G	L2C	Veg. esparsa	TDR	-
Small et al. (2016)	2	730	G	L2C	Gramma	FDR	-
Vey et al. (2016)	1,5	2100	G	L2P; L2C	Solo	TDR	80
Yan et al. (2016)	2	60	B; G	B1; L1	Solo	FDR	80
Yan et al. (2017)	2	180	B; G		Solo	FDR	70
Yang et al. (2017)	2,2	105	B; G	B1, B2, L2C; L5	Veg. baixa	Permissividade	62;71
Zhang et al. (2017)	2,5	180	G	C/A	Trigo	FDR	74
Zhang et al. (2018)	29 e 3,3	300 e 120	G	L2C; L5	Gramma	FDR	86
Han et al. (2018)	1,7	40	G	L1	Soja	FDR	95
Yang et al. (2019)	2,4	300	G; B	L2C; L5; B1; B2	Veg. alpina	TDR	80; 85
Chang et al. (2019)	1,9	450 e 14	G	L2C	Veg. esparsa	Sonda	61; 87
Martín et al. (2020)	1,8	66	G; R; E	L1; L1; E1	Solo	Gravimétrico	70; 85
Han et al. (2020)	1,7	40	G	L1	Solo	FDR	95

Fonte: Os autores (2021).

Rodriguez-Alvarez et al. (2009) apresentaram a técnica GPS-IPT efetuada a partir de um equipamento desenvolvido para refletometria. O hardware GPS, frequência L1, foi conectado a uma antena com polarização linear vertical. Neste caso a antena foi orientada para o horizonte (Figura 4c), e o intervalo de ângulos de elevação entre 7° e 50°. Diferentemente dos casos anteriores, a métrica SNR nesta pesquisa foi o *notch*, a qual representa o ângulo de elevação onde ocorre a amplitude mínima da oscilação do multicaminho. O RMS máximo em relação às sondas FDR foi de 3,1%. Em pesquisas posteriores, Rodriguez-Alvarez et al. (2011a, e 2011b) avaliaram a influência de diferentes tipos de cobertura do solo nas determinações por GPS-IPT. Arroyo et al. (2014), estenderam esta técnica, passando a contar com as duas polarizações lineares (vertical e horizontal). Neste caso, as métricas SNR empregadas foram os pontos de amplitude máxima e mínima. A correlação foi de 90% com uma sonda da rede de monitoramento da umidade do solo Oznet SM.

Chew et al. (2014) avaliaram a performance de um modelo direto para testar a relação empírica observada em dados de campo. Foram simuladas modulações GPS portadora L2, isolando e desconsiderando a influência da vegetação, da topografia e da rugosidade da superfície na modelagem. Os resultados obtidos foram comparados com 11 sondas FDT, dispostas em diferentes profundidades. Os autores definiram um gradiente de umidade em função da profundidade, o qual apresentou correlação de 91% no intervalo entre 0 e 5 centímetros em relação à fase GNSS-R. Em Chew et al. (2015) desenvolveu-se um algoritmo que passou a considerar os efeitos da vegetação nas modelagens.

Yan et al. (2014) conduziram uma pesquisa utilizando um receptor GPS de baixo custo com frequência L1. Yan et al. (2016) utilizaram as modulações B1 (BeiDou) e L1 (GPS), com SNR obtida via mensagem NMEA 0138. Yan et al. (2017) não empregaram diretamente a SNR, mas sim o *Signal Strength Indicator*, também registrado continuamente pelos receptores durante os rastreios.

Na pesquisa de Tabibi et al. (2015) efetuou-se o monitoramento conjunto de umidade do solo e espessura da neve. Foram empregadas SNR de modulações modernas L2C e L5 alcançando correlações de 70 e 80%, respectivamente, em relação a dados de uma sonda de contato. Roussel et al. (2016) usaram modulações GPS e GLONASS registradas por uma estação situada em Lamasquère, França, considerando ângulos de elevação entre 2° e 70°.

Small et al. (2016) avaliaram o desempenho de diferentes algoritmos voltados a remoção dos efeitos da vegetação nos sinais refletidos. Para isto, foram utilizados dados provenientes de 11 estações da rede PBO.

Neste contexto, Zhang et al. (2017) efetuaram o monitoramento conjunto de umidade do solo e altura de vegetação em um campo de cultivo de trigo, na França. Yang et al. (2019), empregaram SNR por L2C, L5, B1 e B2 obtendo correlações de até 85%. Por sua vez, Martín et al. (2020) utilizaram modulações por múltiplas constelações (GPS, GLONASS e Galileo) por um receptor geodésico e outro de baixo custo. Os resultados desta pesquisa foram validados pelo método gravimétrico, sendo efetuada uma coleta de amostras por dia.

5 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cada um dos diferentes métodos de medição da umidade do solo possui limitações e especificidades, como a escala espacial das medidas: ora pontual, como no caso do método gravimétrico e das sondas de contato direto, ora de dezenas de km², como no caso do sensoriamento remoto orbital. Através destes métodos, tem-se informações que, em geral, não são representativas de uma parcela de interesse. Por outro lado, equipamentos como as sondas de nêutrons podem fornecer informações em escala intermediária, contudo, podem ter alto custo. A refletometria GNSS surge neste cenário como um método alternativo ou complementar aos métodos convencionais. Ao longo da última década, pesquisas têm sido efetuadas nesta temática em nível internacional, nas quais os resultados apontam boa correlação entre as determinações por GNSS-R em comparação aos métodos convencionais, indicando a eficiência da técnica.

Os sistemas GPS e o GLONASS possuem cobertura global e estão em plena operação. Pode-se contar, atualmente, com cerca de 60 satélites considerando apenas estes dois sistemas. Com isto, tem-se resolução temporal adequada para aquisição de dados, devido à repetitividade das trajetórias em termos de azimutes de passagem. Com a modernização do GNSS, novos sinais estão sendo introduzidos, tais como a onda portadora L5 e os códigos L2C e L1C. Ademais, novos sistemas como o Galileo e o BeiDou vem ampliando as possibilidades para se atingir melhores resultados nas mais diversas aplicações em que o GNSS-R pode ser empregado.

Pesquisas têm sido direcionadas ao refinamento das modelagens, incluindo a avaliação de diferentes padrões de antena (LI et al., 2018), e propriedades eletromagnéticas do solo (WU; JIN, 2019). Investigações têm avaliado a combinação entre técnicas, especialmente da missão CYGNSS, o que pode contribuir para a resolução espacial e temporal das determinações (KIM; LAKSHMI, 2018). A missão CYGNSS tem grande relevância no contexto orbital, pois se trata de uma constelação de oito satélites voltados ao monitoramento da Terra via GNSS-R (CALABIA; MOLINA; JIN, 2020).

Na GNSS-R baseada em SNR, os dados provenientes de estações GNSS convencionais podem ser utilizados, como dados das estações da RBMC. Séries históricas destas estações podem ser empregadas na refletometria viabilizando o aprimoramento de modelos, calibração de missões satelitais, ampliando o rigor de previsões, e contribuindo com o entendimento de fenômenos hidrológicos. Contudo, deve-se evidenciar que o emprego de uma dada estação para esta aplicação depende das condições de visibilidade direta ao solo. Neste âmbito, muitas das estações existentes, principalmente as urbanas, não atendem a este pré-requisito.

Em âmbito nacional o monitoramento da umidade do solo tem relevância em face da crescente demanda pela gestão de recursos hídricos em um país que detém cerca de 12% da disponibilidade hídrica do planeta (GAMARO, 2012) e da importância da agricultura, que é uma das bases da economia nacional. Até o momento, embora um considerável número de pesquisas tenha sido efetuado em nível internacional, apenas uma pesquisa empregando o GNSS-R com esta finalidade foi concluída no Brasil (EURIQUES, 2019); neste sentido, é imprescindível o incentivo à realização de mais pesquisas sobre o tema no país. Paralelamente, frutos destas iniciativas poderão contribuir diretamente com as atividades de instituições brasileiras responsáveis pelo monitoramento dos recursos hídricos, como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e a Agência Nacional de Águas (ANA). Perspectivas futuras de pesquisas estão relacionadas a investigações concernentes às limitações da técnica e no aprimoramento das modelagens, destacando-se os efeitos da topografia da superfície de reflexão, efeitos da vegetação, e rugosidade.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo fomento de bolsa (número do processo: 88882.382285/2019-01)

Contribuição dos Autores

O autor J.F.E. efetuou a concepção e redação inicial do artigo. Os autores J.F.E., F.G.N. e C.P.K. realizaram a conceptualização. Todos os autores contribuíram com a revisão, edição e desenvolvimento do artigo. O autor F.G.N. supervisionou a execução da pesquisa.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

Referências

- ARORA, B.; DWIVEDI, D.; FAYBISHENKO, B.; JANA, R. B.; WAINWRIGHT, H. M. Understanding and Predicting Vadose Zone Processes. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, v. 85, n. 1, p. 303-328, set. 2019. DOI: 10.2138/rmg.2019.85.10.
- ARROYO, A. A.; CAMPS, A.; AGUASCA, A.; FORTE, G. F.; MONERRIS, A.; RÜDIGER, C.; WALKER, J. P.; PACUAL, D.; ONRUBIA, R. Dual-polarization GNSS-R interference pattern technique for soil moisture mapping. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 1533-1544, mai. 2014. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2320792.
- BABAEIAN, E.; SADEGHI, M.; JONES, S. B.; MONTZKA, C.; VEREECKEN, H.; TULLER, M.. Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 2, p. 530-616, mar. 2019. DOI: 10.1029/2018RG000618.
- BILICH, A.; LARSON, K. M. Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). **Radio Science**, v. 42, n. 6, nov. 2007. DOI: 10.1029/2007RS003652.
- CALABIA, A.; MOLINA, I.; JIN, S. Soil Moisture Content from GNSS reflectometry using dielectric permittivity from fresnel reflection coefficients. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 1-21, jan. 2020. DOI: 10.3390/rs12010122.
- CHANG, X.; JIN, T.; YU, K.; LI, Y.; LI, J.; ZHANG, Q. Soil moisture estimation by GNSS multipath signal. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, p. 1-16, 2019. DOI: 10.3390/rs11212559.
- CHEW, C. C.; SMALL, E. E. Soil Moisture Sensing Using Spaceborne GNSS Reflections: Comparison of CYGNSS Reflectivity to SMAP Soil Moisture. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 9, p. 4049-4057, 2018. DOI:10.1029/2018GL077905.
- CHEW, C. C.; SMALL, E. E.; LARSON, K. M. An algorithm for soil moisture estimation using GPS-interferometric reflectometry for bare and vegetated soil. **GPS Solutions**, v. 20, n. 3, p. 525-537, mai. 2015. DOI: 10.1002/2016GL068189.
- CHEW, C. C.; SMALL, E. E.; LARSON, K. M.; ZAVOROTNY, V. U. Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: Development of a retrieval algorithm for soil moisture. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 537-543, jan. 2014. DOI: 10.1109/tgrs.2013.224232.
- DE RIDDER, K. Surface soil moisture monitoring over Europe using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) imagery. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. 14, 2003. DOI: 10.1029/2002JD002796.
- DESILETS, D.; ZREDA, M.; FERRÉ, T. P. A. Nature's neutron probe : Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. **Water Resources Research**, v. 46, n. 1, p. 1-7, jun. 2010. DOI:

10.1029/2009WR008726.

- DELTA-T DEVICES LTD, **User manual for the profile probe type PR1. Version PR1- UM-01-2. Delta-t Devices Ltd**, Cambridge – UK, 2001.
- EDOKOSS, K.; CALABIA, A.; JIN, S.; MOLINA, I. GNSS-reflectometry and remote sensing of soil moisture: A review of measurement techniques, methods, and applications. **Remote Sensing**, v. 12, n. 4, p. 2-26, fev. 2020. DOI.: 10.3390/rs12040614.
- ENTEKHABI, D.; NJOKU, E. G.; O'NEILL, P. E.; KELLOGG, K. H.; CROW W. T.; EDELSTEIN, W N.; ENTIN, J. K.; GOODMAN, S. D.; JACKSON, T. J.; JOHNSON, J; KIMBALL, J; PIEPMEIER, J. R.; KOSTER, R. D.; NEIL, M.; MCDONALD, K. C.; MOGHADDAM, M.; MORAN, S.; REICHLER, R.; SHI, J. C.; SPENCER, M. W.; THURMAN, S. W.; TSANG, L.; VAN ZYL J. The soil moisture active passive (SMAP) mission. **Proceedings of the IEEE**, v. 98, n. 5, p. 704-716, mai. 2010. DOI.: 10.1109/JPROC.2010.2043918.
- EROGLU, O.; KURUM, M.; BOYD, D.; GURBUZ, A. C. High spatio-temporal resolution CYGNSS soil moisture estimates using artificial neural networks. **Remote Sensing**, v. 11, n. 19, p. 2-32, set. 2019. DOI.: 10.3390/rs11192272.
- EURIQUES, J. F. **Determinação da umidade do solo por meio da técnica de Refletometria GNSS – Primeiros resultados no Brasil**. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/62323>. Acesso em: 20 set. 2020.
- GAMARO, P. E. **Medidores Acústicos Doppler de Vazão**. 1ª ed. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2012.
- GAO, H.; WOOD, E. F.; JACKSON, T. J.; DRUSCH, M.; BINDLISH, R. Using TRMM/TMI to retrieve surface soil moisture over the southern United States from 1998 to 2002. **Journal of Hydrometeorology**, v. 7, n. 1, p. 23-38, 2006.
- GEORGIADOU, P. Y.; KLEUSBERG, A. On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning. **Manuscripta Geodaetica**, v. 13, n. 1, p. 172-179, 1988.
- GLEASON, S.; HODGART, S.; SUN, Y.; GOMMENDINGER, C.; MACKIN, S.; ADJRAD, UNWIN, M. Detection and Processing of Bistatically reflected GPS signals from Low Earth Orbit for the purpose of Ocean Remote Sensing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 6, p. 1229-1241, jul. 2005. DOI.: 10.1109/TGRS.2005.845643.
- GURTNER, W.; ESTEY, L. **RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.03**. 2015. Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO. Disponível em: < <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex300.pdf> > Acesso em 23 set. 2020.
- HALLIKAINEN M.T.; F.T. ULABY; M.C. DOBSON; M. EL-RAYES; WU, L.-K. Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil - Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 23, n. 1, p. 25-34, jan. 1985. DOI.: 10.1109/TGRS.1985.289497.
- HAN, M.; ZHU, Y.; YANG, D.; CHANG, Q.; HONG, X.; SONG, S. Soil moisture monitoring using GNSS interference signal: proposing a signal reconstruction method. **Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 4, p. 373-382, 2020. DOI.: 10.1080/2150704X.2020.1718235.
- HAN, M.; ZHU, Y.; YANG, D.; HONG, X.; SONG, S. A semi-empirical SNR model for soil moisture retrieval using GNSS SNR data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 1-19, 2018. DOI.:10.3390/rs10020280.
- HANSON, B. Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 3, p. 628-759, 2009. DOI.: 10.2136/vzj2008.0171.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. 1º ed. San Diego: Academic Press, 1998.
- JIA, Y.; PEI, Y. Remote Sensing in Land Applications by Using GNSS-Reflectometry. In: HUNG, M.; WU, Y. **Recent Advances and Applications in Remote Sensing**. IntechOpen, 2018. p. 65-88.
- JIN, S.; CARDELLACH, E.; XIE, F. **Remote Sensing and Digital Image Processing: Theory, Methods and Applications**. 2014. Dordrecht: Springer, 2014.

- JIN, S.; QIAN, X.; KUTOGLU, H. Snow depth variations estimated from GPS-reflectometry: A case study in Alaska from L2P SNR data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 1, p. 1-15 jan. 2016. DOI.: 10.3390/rs8010063.
- KATZBERG, S. J.; TORRES, O.; GRANT, M. S.; MASTERS, D. Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: Results from SMEX02. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 1, p. 17-28, set. 2006. DOI.: 10.1016/j.rse.2005.09.015.
- KERR, Y. H.; WALDTEUFEL, P.; WIGNERON, J. P.; MARTINUZZI, J. M.; FONT, J.; BERGER, M. Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 8, p. 1729-1735, 2001. DOI.: 10.1109/36.942551.
- KIM, H.; LAKSHMI, V. Use of Cyclone Global Navigation Satellite System (CyGNSS) Observations for Estimation of Soil Moisture. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 16, p. 8272–8282, 2018. DOI.: 10.1029/2018GL078923.
- LARSON, K. M. GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 3, n. 6, p. 775-787, 2016. DOI.:10.1002/wat2.1167.
- LARSON, K. M.; BRAUN, J. J.; SMALL, E. E.; ; ZAVOROTNY, V. U.; GUTMANN, E. D.; BILICH A. L. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 91-99, 2010. DOI.: 10.1109/jstars.2009.2033612.
- LARSON, K. M.; NIEVINSKI, F. G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. **GPS Solutions**, v. 17, n. 1, p. 41-52, 2013. DOI.: 10.1007/s10291-012-0259-7.
- LARSON, K. M.; SMALL, E. E.; GUTMANN, E.; BILICH, A. L.; AXELRAD, P.; BRAUN, J. Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: Initial results. **GPS Solutions**, v. 12, n. 3, p. 173-177, 2008a. DOI.: 10.1007/s10291-007-0076-6.
- LARSON, K. M.; SMALL, E. E.; GUTMANN, E. D.; BILICH, A. L.; BRAUN, J. J.; ZAVOROTNY V. U. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 24, dez. 2008b. p. 1-5. DOI.:10.1029/2008gl036013.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- LI, F.; PENG, X.; CHEN, X.; LIU, M.; XU, L. Analysis of key issues on GNSS-R soil moisture retrieval based on different antenna patterns. **Sensors**, v. 18, n. 8, p. 1-16, ago. 2018. DOI.: 10.3390/s18082498.
- LIU, L.; LARSON, M. Decadal changes of surface elevation over permafrost area estimated using reflected GPS signals. **Cryosphere**, v. 12, n. 2, p. 477-489, fev. 2018. DOI.: 10.5194/tc-12-477-2018.
- LIMA, J.; SILVA, E.; KOIDE, S.; SANTOS, R. Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de Latossolos do Cerrado em Condições de Campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 1, p. 23-32, nov. 2012. DOI.:10.21168/rbrh.v17n1.p23-32.
- LÖFGREN, J. S.; HAAS, R. Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations. **Eurasip Journal on Advances in Signal Processing**, v. 2014, n. 1, 2014. DOI: 10.1186/1687-6180-2014-50.
- MARTIN-NEIRA, M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): application to ocean altimetry. **European Space Agency Journal**, v. 17, p. 331-355, 1993.
- MARTÍN, A.; IBÁÑEZ, S.; BAIXAULI, C., BLANC, S.; ANQUELA, A. B. Multi-constellation GNSS interferometric reflectometry with mass-market sensors as a solution for soil moisture monitoring. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, p. 3573-3582, jul. 2020. DOI.: 10.5194/hess-24-3573-2020.
- MASTERS, D.; AXELRAD, P.; KATZBERG, S. Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 507-520, mai. 2004. DOI.:

10.1016/j.rse.2004.05.016.

- MENDES, P. C. de S. **Caracterização de um sensor para medição de umidade do solo com termo-resistor a temperatura constante**. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 2ª ed. Presidente Prudente: Editora Unesp, 2008.
- NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications. **GPS Solutions**, v. 18, n. 2, p. 309-322, 2014a. DOI:10.1007/s10291-013-0331-y.
- NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. An open source GPS multipath simulator in Matlab/Octave. **GPS Solutions**, v. 18, n. 3, p. 473-481, Fev. 2014b. DOI:10.1109/tgrs.2013.2297688.
- NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation - Part I: Formulation and simulations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 10, p. 6555-6563, 2014c. DOI:10.1109/TGRS.2013.2297681.
- NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation - Part II: Application and validation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 10, p. 6564–6573, 2014d. DOI:10.1109/tgrs.2013.2297688.
- NIEVINSKI, F. G., MONICO, J. F. G. GPS como um sensor remoto. In: PARANHOS FILHO, A. C.; MIOTO, C. L.; MARCATO JUNIOR, J.; CATALANI, T. G. T. (Org.). **Geotecnologias em Aplicações Ambientais**. 1ª ed. Campo Grande: Editora da UFMS, 2016, vol.1, p.234-251.
- NIEVINSKI, F. G.; SILVA, M. F. E.; BONIFACE, K.; MONICO, J. F. G. GPS Diffractive Reflectometry: Footprint of a Coherent Radio Reflection Inferred from the Sensitivity Kernel of Multipath SNR. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 10, p. 4884-4891, Out. 2016. DOI:10.1109/jstars.2016.2579599.
- OCHSNER, T. E.; COSH, M. H.; CUENCA, R. H.; DORIGO, W. A.; DRAPER, C. S.; HAGIMOTO, Y.; KERR, Y.; LARSON, K. M.; NJOKU, E. G.; SMALL, E. R.; ZREDA, M. State of the Art in Large-Scale Soil Moisture Monitoring. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 6, p. 1888-1923, 2013. DOI:10.2136/sssaj2013.03.0093.
- PEREIRA, S. **Tecnologia da Reflectometria no Domínio do Tempo para medição da umidade do solo**. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- ROBINSON, D. A.; CAMPBELL, C. S.; HOPMANS, J. W.; HORNBUCKLE, B. K.; JONES, S. B.; KNIGHT, R.; OGDEN, F.; SELKER, J.; WENDROTH, O. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 1, p. 358-389, fev. 2008. DOI: 10.2136/vzj2007.0143.
- RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; AKOS, D. M.; ZAVOROTNY, V. U.; SMITH, J. A.; CAMPS, A.; FAIRALL, C. W. Airborne GNSS-R Wind Retrievals Using Delay – Doppler Maps. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 626-641, jan. 2013. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2196437.
- RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; BOSCH-LLUIS, X.; CAMPS, A.; VALL-LLOSSERA, M.; VALENCIA, E.; MARCHAN-HERNANDEZ, J. F.; RAMOS-PEREZ, I. Soil moisture retrieval using GNSS-R techniques: Experimental results over a bare soil field. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 11, p. 3616-3624, 2009. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2030672.
- RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; CAMPS, A.; VALL-LLOSSERA, M.; BOSCH-LLUIS, X.; MONERRIS, A.; RAMOS-PEREZ, I.; VALENCIA, E.; MARCHAN-HERNANDEZ, F.; MARTINEZ-FERNANDEZ, J.; BARONCINI-TURRICCHIA, G.; PÉREZ-GUTIÉRREZ, C.; SÁNCHEZ, N. Land geophysical parameters retrieval using the interference pattern GNSS-R technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 1, p.71-84, Jan. 2011a. DOI:10.1109/TGRS.2010.2049023.

- RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; BOSCH-LLUIS, X.; CAMPS, A.; AGUASCA, A.; VALL-LLOSSERA, M.; VALENCIA, E.; RAMOS-PEREZ, I.; PARK, H. Review of crop growth and soil moisture monitoring from a ground-based instrument implementing the Interference Pattern GNSS-R Technique. **Radio Science**, v. 46, n. 5, p. 1-11, out. 2011b. DOI.: 10.1029/2011RS004680.
- ROUSSEL, N.; FRAPPART, F.; RAMILLIEN, G.; DARROZES, J.; BAUP, F.; LESTARQUIT, L.; HA, M. C. Detection of Soil Moisture Variations Using GPS and GLONASS SNR Data for Elevation Angles Ranging from 2° to 70°. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 10, p. 4781-4794, 2016. DOI.:10.1109/JSTARS.2016.2537847.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. 2ª ed. New York: Walter de Gruyter, 2003.
- SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E. R.; LEHNER, I. ORLOWSKY, B.; TEULING, A. J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, n. 4, p. 125-161, fev. 2010. DOI.:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- SMALL, E. E.; LARSON, K. M.; CHEW, C. C.; DONG, J.; OCHSNER, T. E. Validation of GPS-IR Soil Moisture Retrievals: Comparison of Different Algorithms to Remove Vegetation Effects. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 10, p. 4759-4770, out. 2016. DOI.: 10.1109/JSTARS.2015.2504527.
- STRANDBERG, J.; HOBIGER, T.; HAAS, R. Coastal Sea Ice Detection Using Ground-Based GNSS-R. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 14, n. 9, p. 1552-1556, 2017. DOI.: 10.1109/LGRS.2017.2722041.
- SWENSON, S.; FAMIGLIETTI, J.; BASARA, J.; WAHR, J. Estimating profile soil moisture and groundwater variations using GRACE and Oklahoma Mesonet soil moisture data. **Water Resources Research**, v. 44, n. 1, p. 1-12, 2008. DOI.:10.1029/2007WR006057.
- TABIBI, S.; NIEVINSKI, F. G.; VAN DAM, T. Statistical Comparison and Combination of GPS, GLONASS, and Multi-GNSS Multipath Reflectometry Applied to Snow Depth Retrieval. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 7, p. 3773-3785, 2017. DOI.:10.1109/tgrs.2017.2679899.
- TABIBI, S.; NIEVINSKI, F. G.; VAN DAM, T.; MONICO, J. F. G. Assessment of modernized GPS L5 SNR for ground-based multipath reflectometry applications. **Advances in Space Research**, v. 55, n. 4, p. 1104-1116, 2015. DOI.:10.1016/j.asr.2014.11.019.
- TEUNISSEN, P. J.; MONTENBRUCK, O. **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. [s.l.]: Springer International Publishing, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-42928-1
- TULLER, M.; OR, D. Water Retention and Characteristic Curve. In: HILLEL, D; HATFIELD, J. L.; POWLSON, D. S.; ROSENZWEIG, C.; SCOW, K. M.; SINGER, J. M.; SPARKS, D. L. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, 1º ed., Amsterdã, Elsevier Academic Press, 2004, p. 278-289. ISBN: 9780123485304.
- VEY, S.; GÜNTNER, A.; WICKERT, J.; BLUME, T.; RAMATSCHI, M. Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. **GPS Solutions**, v. 20, n. 4, p. 641-654, 2016. DOI.: 10.1007/s10291-015-0474-0.
- WU, X.; JIN, S. A Simulation Study of GNSS-R Polarimetric Scattering from the Bare Soil Surface Based on the AIEM. **Advances in Meteorology**, v. 2019, p. 1-9, mai. 2019. DOI.: 10.1155/2019/3647473.
- XIE, Q.; MENENTI, M.; JIA, L. Improving the AMSR-E/NASA soil moisture data product using in-situ measurements from the Tibetan Plateau. **Remote Sensing**, v. 11, n. 23, 2019. DOI.:10.3390/rs11232748.
- YAN, S.; LI, Z.; YU, K.; ZHANG, K. GPS-R L1 interference signal processing for soil moisture estimation: an experimental study. **Eurasip Journal on Advances in Signal Processing**, v. 107, n. 1, p. 1-13, 2014. DOI.: 10.1186/1687-6180-2014-107.
- YAN, S. H.; ZHANG, N.; CHEN, N. C.; GONG, J. Y. Feasibility of using signal strength indicator data to

- estimate soil moisture based on GNSS interference signal analysis. **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 1, p. 61-70, 2017. DOI:10.1080/2150704X.2017.1384587.
- YAN, S. H.; ZHAO, F.; CHEN, N. C.; GONG, J. Y. Soil moisture estimation based on BeiDou B1 interference signal analysis. **Science China Earth Sciences**, v. 59, n. 12, p. 2427-2440, 2016. DOI: 10.1007/s11430-015-0013-7.
- YANG, T.; WAN, W.; CHEN, X.; CHU, T.; QIAO, Z.; LIANG, H.; WEI, J.; WANG, G.; HONG, Y. Land surface characterization using BeiDou signal-to-noise ratio observations. **GPS Solutions**, v. 23, n. 2, p. 1-12, 2019. DOI .10.1007/s10291-019-0824-4.
- YANG, T.; WAN, W.; CHEN, X.; CHU, T.; HONG, Y. Using BDS SNR observations to measure near-surface soil moisture fluctuations: Results from low vegetated surface. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 14, n. 8, p. 1308-1312, 2017. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2710083.
- ZAVOROTNY, V. U.; LARSON, K. M.; BRAUN, J. J.; SMALL, E. E.; GUTMANN, E. D.; BILICH, A. L. A Physical Model for GPS Multipath Caused by Land Reflections : Toward Bare Soil Moisture Retrievals. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, n.1, p. 100-110, 2010, abr. 2010. DOI: 10.1109/JSTARS.2009.203360.
- ZAVOROTNY, V. U.; GLEASON, S.; CARDELLACH, E.; CAMPS, A. Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 2, n. 4, p. 8-45, 2015. DOI:10.1109/MGRS.2014.2374220.
- ZHANG, S.; ROUSSEL, N.; BONIFACE, K.; HA, C. M.; FRAPPART, F.; DARROZES, J.; BAUP, F.; CALVET, J. C. Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 9, p. 4767-4784, 2017. DOI:10.5194/hess-21-4767-2017.
- ZHANG, S.; CALVET, J. C.; DARROZES, J.; ROUSSEL, N.; FRAPPART, F.; BOUHOURS, G. Deriving surface soil moisture from reflected GNSS signal observations from a grassland site in southwestern France. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 3, p. 1931-1946, 2018. DOI: 10.5194/hess-22-1931-2018.
- ZHANG, F.; ZHANG, L.-W.; SHI, J.-J.; HUANG, J.-F. Soil Moisture Monitoring Based on Land Surface Temperature-Vegetation Index Space Derived from MODIS Data. **Pedosphere**, v. 24, n. 4, p. 450-460, 2014. DOI: 10.1016/S1002-0160(14)60031-X.
- ZHOU, W.; LIU, L.; HUANG, L.; YAO, Y.; CHEN, J.; LI, S. A New GPS SNR-based Combination Approach for Land Surface Snow Depth Monitoring. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-20, mar. 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-40456-2.
- ZREDA, M.; SHUTTLEWORTH, W. J.; ZENG, X.; DESILETS, D.; FRANZ, T.; ROSOLEM, R. COSMOS: The cosmic-ray soil moisture observing system. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 11, p. 4079-4099, 2012. DOI:10.5194/hess-16-4079-2012.

Biografia do autor principal



Jorge Felipe Euriques, é Engenheiro Cartógrafo e Agrimensor pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Tem experiência internacional adquirida por intercâmbio efetuado na *École Supérieure des Géomètres et Topographes* – França. Mestre em Ciências Geodésicas pela UFPR. É membro do Laboratório de Geodésia Espacial de Hidrografia (UFPR) desde 2014. Entre 2004 e 2010 atuou junto ao Setor de Cadastro Imobiliário e Geoprocessamento da Prefeitura de São Bento do Sul - SC. Atualmente é aluno de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (UFPR). Atua principalmente com pesquisas relacionadas a Geodésia por satélites, Aplicações GNSS, Refletometria GNSS e Calibração de antenas 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.