

ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO COM RECEPTOR E ANTENA GNSS DE BAIXO CUSTO: RESULTADOS PRELIMINARES

WAGNER CARRUPT MACHADO¹; VALDINEY JOSÉ DA SILVA²; FELIPE GEREMIA NIEVINSKI³; JORGE FELIPE EURIQUES⁴; LEANDRO CORTÊS CARDOSO⁵; CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER⁶

RESUMO

As ondas de rádio transmitidas por satélites GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) geralmente refletem na Terra e, assim, podem ser usadas para estimar propriedades das superfícies refletoras. Esta técnica se denomina Refletometria GNSS (GNSS-R), a qual vem recebendo atenção de pesquisadores estrangeiros e nacionais. Receptores desenvolvidos para o posicionamento GNSS preciso podem ter custo elevado, além de possuírem antenas desenvolvidas para mitigar a recepção de sinais refletidos. Neste contexto, a avaliação do desempenho de equipamentos de baixo custo para tal fim é necessária. Esta pesquisa visa apresentar os primeiros resultados da avaliação do desempenho de um receptor e antena GNSS de baixo custo na estimativa da umidade superficial do solo com GNSS-R.

Palavras-chave: GNSS-R. SNR. Fase inicial.

1 INTRODUÇÃO

A umidade do solo pode ser definida como sendo o conteúdo de água presente na região insaturada do solo. Sua distribuição não é homogênea sobre a superfície do solo nem com a variação da profundidade. Ela está relacionada a ciclos biogeoquímicos, como o da água, e influencia os fluxos de troca de energia entre a superfície física da Terra e a atmosfera, portanto é relevante no sistema climático (SENEVIRATNE et al., 2010).

A quantificação da umidade do solo permite alimentar modelos hidrológicos e meteorológicos para delimitar áreas de recarga de águas subterrâneas e áreas suscetíveis a inundações, contribuindo para a prevenção de desastres naturais. Ela também deve ser considerada na agricultura, visto estar relacionada ao metabolismo, transporte de nutrientes, geração de energia, manutenção da temperatura e pressão de turgor de plantas. Por esse motivo, sistemas de irrigação são empregados para garantir a uniformidade do teor de umidade do solo visando maximizar a produção agrícola.

¹ Universidade Federal de Uberlândia, wagnercarrupt@ufu.br

² Universidade Federal de Uberlândia, valdiney@ufu.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, felipe.nievinski@ufrgs.br

⁴ Universidade Federal do Paraná, jorge.euriques@ufpr.br

⁵ Universidade Federal de Uberlândia, leandro.cortes@ufu.br

⁶ Universidade Federal do Paraná, cpkrueger64@gmail.com



Portanto, o monitoramento da umidade do solo é necessário para a gestão e uso eficiente dos recursos hídricos e energéticos, preservando o meio ambiente (PEREIRA et al. 2006; EURIQUES et al., 2021).

Existem diversas técnicas para quantificar a umidade do solo, as quais podem ser classificadas como direta ou indireta. Na forma direta, a umidade do solo é estimada pela razão entre o peso do solo seco e o peso do solo úmido. Essa técnica, conhecida como gravimétrica ou da estufa, é indicada para calibrar as demais técnicas devido à sua precisão. A indireta relaciona a umidade do solo às suas propriedades físicas por meio de modelos matemáticos. As mais comuns exploram a permissividade do solo, a moderação de nêutrons e a medida de radiação na banda L por missões satelitais tais como *SkyLab*, *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) e *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) (SOUZA et al., 2013; ROSSATO e ANGELIS, 2013; BURGIM et al., 2018).

Atualmente, pesquisadores têm explorado a interação das ondas de rádio transmitidas por satélites GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) refletidas para estimar propriedades físicas das superfícies refletoras. Esta técnica é denominada de Refletometria GNSS (GNSS-R). Dentre as propriedades físicas que se pode estimar com esta técnica, encontra-se a umidade do solo (LARSON et al., 2010; RODRIGUEZ-ALVAREZ et al., 2011; TABIBI et al., 2015; ZHANG et al., 2017; EURIQUES et al., 2021).

Embora seja possível utilizar receptores e antenas desenvolvidos para o posicionamento geodésico no GNSS-R, tais equipamentos possuem custo elevado, além de serem projetados para evitar o rastreamento de sinais refletidos. Pesquisadores têm mostrado a eficácia da estimativa da umidade do solo com receptores GNSS de simples frequência (VEY et al., 2016; EURIQUES, 2019). O objetivo desta pesquisa é apresentar os primeiros resultados da avaliação do desempenho de um receptor e antena de baixo custo na estimativa da umidade superficial do solo com GNSS-R.

2 FUNDAMENTOS DA REFLETOMETRIA GNSS

A estimativa de propriedades físicas de superfícies com GNSS-R se baseia no pressuposto de que as ondas de rádio emitidas pelos satélites sofrem reflexões ao incidirem sobre as superfícies das imediações da antena, tais como solo, edificações, estruturas metálicas e espelhos d'água, sendo recebido de forma indireta pela antena do receptor. Ao interagirem com essas superfícies, a amplitude, a fase e a frequência das ondas de rádio GNSS sofrem alterações, ponderadas por suas características, tais como composição, rugosidade e propriedade dielétrica. Esta situação permite estimar



atributos relacionados a tais superfícies, como por exemplo a umidade do solo (LARSON et al., 2010).

Embora a técnica GNSS-R possa ser realizada por meio de todas as observáveis GNSS, visto que são afetadas pelo multicaminho, a razão sinal ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) é a mais indicada, pois não é afetada por efeitos externos como erro da órbita dos satélites, erro provocado pela atmosfera, erro de relógios e ambiguidade da fase portadora (LARSON et al., 2010). A SNR consiste na razão da potência do sinal pela potência do ruído, expressa em decibéis, sendo muito utilizada como indicador de qualidade da recepção (LARSON et al., 2010; JOSEPH, 2010).

A geometria da reflexão se altera à medida que os satélites se movimentam em suas órbitas, criando um padrão de interferência oscilante, ora construtivo e ora destrutivo, na potência registrada conforme as recepções direta e refletida entram e saem de fase (TABIBI et al., 2015). Portanto, a potência registrada é composta pelas duas potências contribuintes (a do sinal direto e a do sinal refletido) acrescidas de um termo trigonométrico ditado pela diferença de fase entre as duas (NIEVINSKI e LARSON, 2014a).

Os dados SNR podem ser acessados por meio dos arquivos de observação em formato RINEX (*Receiver Independent Exchange*) ou no formato NMEA 0183 (*National Marine Electronics Association*), por meio da mensagem \$GPGSV (MONTENBRUCK e MacLEOD, 2017).

2.1 Estimativa da umidade do solo com GNSS-R

A estimativa da umidade do solo por GNSS-R envolve a aquisição dos dados GNSS, respeitando os pressupostos da técnica; processamento e modelagem dos dados, que pode ser efetuada mediante um software refletométrico; e, finalmente, conversão das estimativas de fase resultantes em umidade do solo.

Na coleta de dados GNSS, deve-se considerar que o entorno da estação seja, predominantemente, de solo exposto ou vegetação baixa, além de ter visibilidade desobstruída entre os pontos de reflexão dos sinais no solo e a antena GNSS (NIEVINSKI e HOBIGER, 2019).

A modelagem dos dados envolve a simulação, inversão, pós-processamento e o controle de qualidade. A simulação consiste de um modelo físico direto que tem a função de prever observações SNR com base nas características do equipamento e do ambiente (NIEVINSKI e LARSON, 2014a). A modelagem inversa é composta de um modelo estatístico que visa estimar os parâmetros (amplitude, fase e frequência) a partir

das observações GNSS. Nesta etapa, parâmetros fase inicial e altura da antena recebem valores nominais e então estimam-se correções associadas a eles por meio de um ajustamento ou regressão não-linear (NIEVINSKI e LARSON, 2014b). Após a inversão, os parâmetros resultantes passam por controle de qualidade visando a eliminação de valores anômalos (*outliers*) e o refinamento dos resultados. Nesta etapa, não se trabalha mais com observações SNR, mas sim com os parâmetros obtidos pela modelagem inversa.

Por fim, emprega-se uma curva de calibração, baseada em uma regressão linear polinomial, para relacionar os parâmetros da fase estimados e valores da umidade do solo (CHEW et al., 2014; VEY et al., 2016). Vey et al., (2016) formulam a umidade volumétrica do solo (m^3/m^3) a partir da fase inicial ($\Delta\Phi$) conforme a seguinte expressão:

$$\theta_{\text{GNSS-R}} = a\Delta\Phi + b \quad (1)$$

onde $a = 65,1 (m^3/m^3)^\circ$ e $b = 0,05 m^3/m^3$.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida em 4 etapas: instalação dos equipamentos, coleta de dados, processamento dos dados e análise dos resultados.

3.1 Dados

Os dados SNR foram coletados com um receptor e antena GNSS de baixo custo desenvolvido na UFRGS, o qual se constitui de uma placa controladora arduino *Adafruit Feather 32u4 Adalogger* e um receptor GPS *Adafruit Ultimate GPS Feather Wing* com antena externa (FAGUNDES et al., 2021). Este receptor grava os dados SNR da portadora L1 dos satélites do sistema GPS (*Global Positioning System*) no formato NMEA 0183. O potencial desse dispositivo para recuperar a umidade do solo está na possibilidade de registrar o maior número de observações possível, pois sua antena não foi projetada para reduzir o rastreamento de sinais refletidos. Além disso, a SNR é gravada como um número real com uma casa decimal, o que representa precisão adequada para a sua aplicação na técnica GNSS-R.

A umidade do solo calculada com a técnica GNSS-R foi comparada à média obtida por duas sondas que exploram a refletometria no domínio do tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*), modelo SDI-12 da fabricante Acclima. Tais sondas foram posicionadas a 10 cm de profundidade e na posição horizontal, o que é adequado com a profundidade de referência das estimativas por GNSS-R (VEY et al., 2016). Os

resultados também foram comparados com dados de precipitação registrados pelo pluviômetro *Ville de Paris*, instalado na estação meteorológica localizada na área de estudo.

A área experimental está situada na unidade Araras do Campus Monte Carmelo da Universidade Federal de Uberlândia, MG (UFU-MC). A figura 1 mostra uma vista oblíqua da disposição dos sensores instalados na área do experimento.

Figura 1 – Vista oblíqua da disposição dos sensores



Fonte: os autores

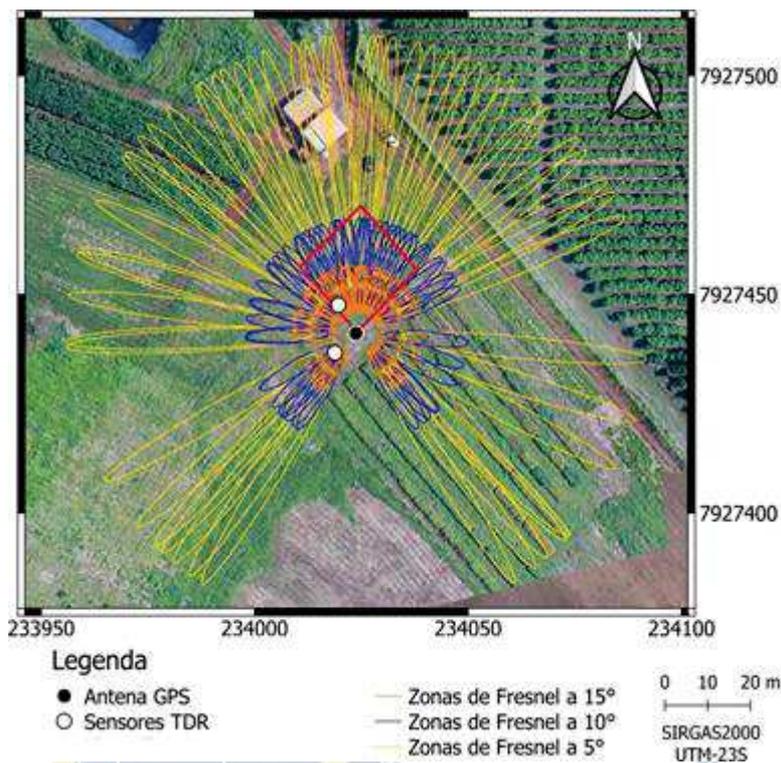
Os dados utilizados foram coletados durante o mês de setembro de 2020. Enquanto os dados de SNR do receptor GPS foram registrados com um intervalo de registro de 1 s, a umidade do solo pelas sondas TDR foi gravada com intervalo de dois minutos. Entretanto, ambos os dados foram computados para representar a média em intervalos de duas em duas horas. O volume de precipitação foi registrado diariamente às 7 h (Horário Local).

O solo da área experimental é do tipo Latossolo Vermelho, de textura argilosa, sendo composta por 54% de argila, 26% de areia e 20% de silte, conforme análise feita pela equipe do Laboratório de Ciência do Solo da UFU-MC.

A antena do receptor foi posicionada a 2,34 m de altura do solo. A partir desta informação e da posição dos satélites foi possível determinar a área de abrangência da técnica GNSS-R, aproximada por um conjunto de primeiras zonas de Fresnel. Cada primeira zona de Fresnel é formada por uma elipse definida em termos da altura da

antena GNSS, bem como do azimute e da elevação de um dado satélite (LARSON e NIEVINSKI, 2013). A Figura 2 mostra a posição dos equipamentos no campo e a representação do conjunto de primeiras zonas de Fresnel considerando os azimutes dos satélites rastreados pelo receptor a ângulos de elevação de 5°, 10° e 15°.

Figura 2 – equipamentos instalados e área de atuação da técnica GNSS-R



Fonte: os autores

3.2 Processamento dos dados

Estudos mostraram que o parâmetro mais adequado para estimar a umidade do solo a partir da técnica GNSS-R é a fase inicial, devido à alta correlação existente entre tais grandezas. A determinação da fase inicial foi feita a partir do software refletométrico desenvolvido por Nievinski e Larson (2014 a, b, c, d) e adaptado para estimativa da umidade do solo por Tabibi et al. (2015).

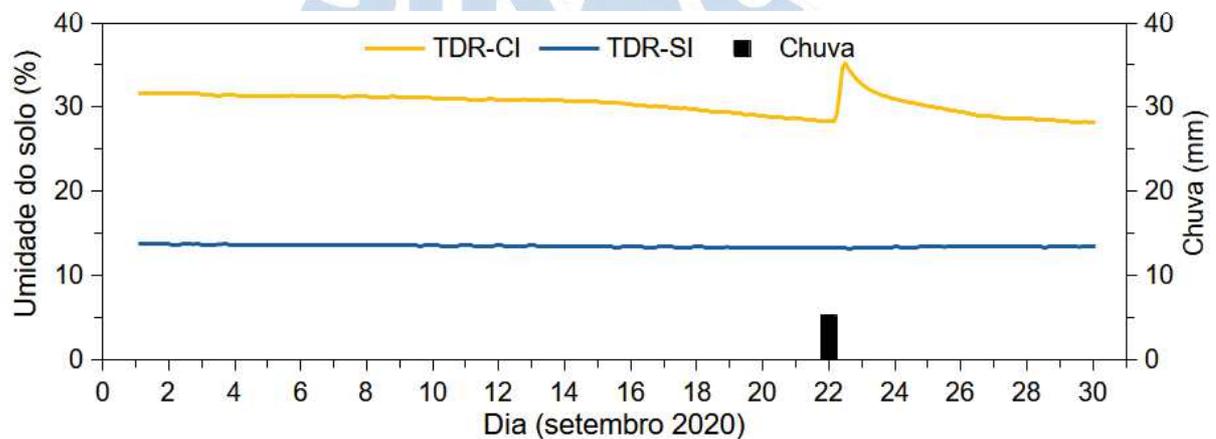
Na etapa do processo de inversão, é realizado um pré-processamento dos dados visando identificar direções onde o sinal refletido é influenciado por outros fatores além da umidade do solo, como por exemplo, a presença de objetos que possam obstruir ou refletir o sinal. Esta resposta é obtida pelo comportamento do parâmetro viés da altura da antena, onde os valores muito afastados de zero indicam possíveis direções que devem ser evitadas. Após essas análises, estabeleceu-se uma máscara de elevação

com a finalidade de serem usados apenas dados observados entre 5° a 30° e uma máscara de azimute no intervalo de 15° a 350°. Por fim, a estimativa da umidade do solo com GNSS-R foi obtida conforme a calibração proposta por Vey et al. (2016) (equação 1).

4 RESULTADOS PRELIMINARES

A Figura 3 mostra o comportamento da umidade do solo obtida com as sondas TDR e o volume de chuva medido no pluviômetro durante o período considerado.

Figura 3 - Chuva e umidade do solo na área irrigada (TDR-CI) e não irrigada (TDR-SI)



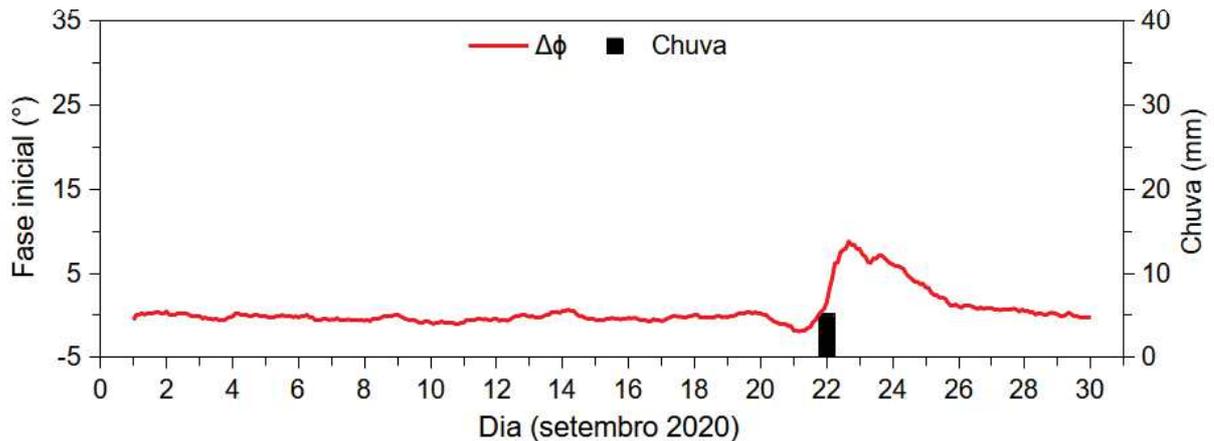
Fonte: os autores

É possível observar que ocorreu um único evento de chuva, entre os dias 21 e 22 de setembro, com apenas 5 mm. Este evento de chuva ocorreu depois de aproximadamente quatro meses de estiagem e o solo na área externa da estação meteorológica deveria estar com umidade próxima ao ponto de murcha, no qual há necessidade de maiores volumes de chuva para aumentar o teor de umidade do solo a maiores profundidades. A umidade provocada pela chuva foi detectada pela sonda TDR instalada dentro da área irrigada (TDR-CI), o qual apresentou valores acima de 28% durante todo o período. Além disso, constata-se que ocorreu uma diminuição na umidade do solo registrada por esta sonda antes da chuva, a qual ocorre de forma mais acentuada próximo ao evento de precipitação. Após a chuva, esta sonda registra o valor máximo de umidade do solo, de cerca de 36%, e, em seguida, o valor da umidade do solo começa a reduzir gradativamente até atingir valores próximos aos observados antes da chuva. Já a sonda TDR instalada fora da área irrigada (TDR-SI) registrou

umidade média de cerca de 14%, apresentando pequenas variações que devem estar ligadas à precisão do equipamento.

A figura 4 mostra o comportamento da fase inicial da SNR durante o período do experimento, bem como o registro do volume de chuva.

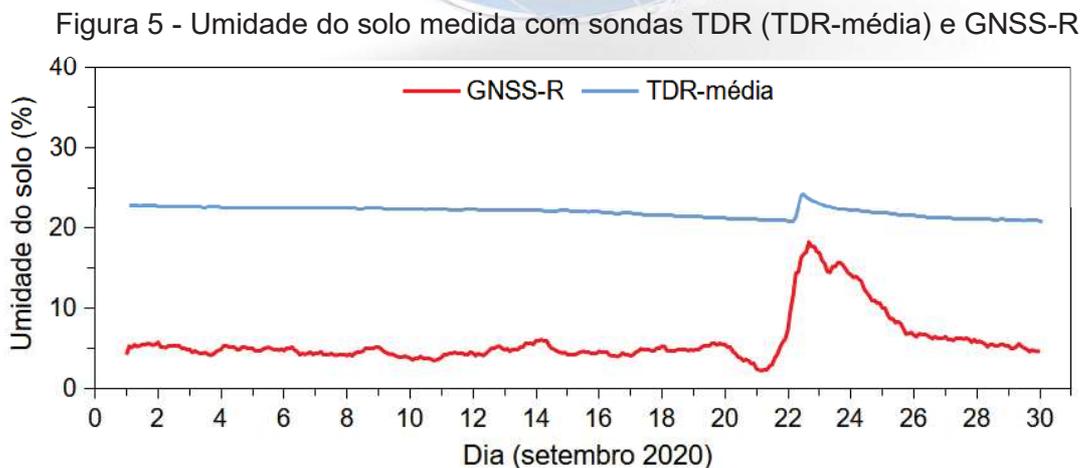
Figura 4 - Chuva e fase inicial ($\Delta\phi$).



Fonte: os autores

Destaca-se que o valor da fase inicial, neste caso, foi estimado a partir dos dados de todos os satélites rastreados, sendo possível observar comportamento similar ao da sonda TDR-CI, mostrando que a técnica GNSS-R foi sensível à ocorrência do pequeno volume de chuva registrado nesse período.

A figura 5 mostra o comportamento da umidade do solo calculada com a técnica GNSS-R usando a equação 1 (em vermelho) e a umidade do solo média das sondas TDR (em azul).



Fonte: os autores



Observa-se que, enquanto a umidade do solo calculada pela equação (1) apresenta valores médio e máximo de aproximadamente 6% e 18%, respectivamente, os valores médio e máximo da TDR-média são de cerca de 22% e 24%, respectivamente. Esta diferença pode estar relacionada ao fato das sondas TDR não terem sido calibradas com a técnica gravimétrica. Além disso, os coeficientes da equação (1) podem não estar adequados para a conversão da fase inicial em umidade para o solo, utilizando a antena GNSS envolvida nesta pesquisa. Estes coeficientes apresentados são teóricos e foram estabelecidos considerando um modelo de antena geodésica e tipo de solo específico, portanto, são valores nominais. Novos coeficientes podem ser propostos mediante uma regressão linear empregando simulações ou séries temporais de umidade do solo por GNSS-R e por sondas convencionais, como as TDR.

Ao se analisar as variações de umidade do solo obtidas por essas duas técnicas, verifica-se que, embora a estimativa com GNSS-R seja menor do que a determinada com as sondas TDR, a amplitude da primeira é maior. Assim, parte da diferença observada pode ser devido ao fato da técnica GNSS-R ser sensível à presença de vegetação e relacionar-se mais à umidade superficial do solo (CHEW et al., 2014), enquanto a TDR mede a umidade na subsuperfície.

5 CONCLUSÃO

Neste artigo apresentaram-se os resultados preliminares da pesquisa que visa avaliar o desempenho de equipamentos GPS de baixo custo na estimativa da umidade do solo no campus da UFU de Monte Carmelo.

Os resultados preliminares mostram que a sonda TDR instalada na área externa da estação meteorológica (sem irrigação) não é sensível em um cenário de baixa umidade do solo. Além disso, verificou-se que há correspondência entre o comportamento da umidade do solo medida pela sonda TDR instalada na área interna da estação meteorológica (com irrigação) e a fase inicial estimada pelo software refletométrico.

O modelo matemático para a conversão da fase inicial em umidade do solo adotado por Vey et al. (2016) não se mostrou adequado para o caso desta pesquisa. Isto pode estar relacionado com a diferença no tipo de solo e ao padrão de ganho e características geométricas da antena dos receptores GNSS.

Por fim, salienta-se que os resultados obtidos até o momento são promissores, mostrando que a técnica GNSS-R com equipamento de baixo custo é sensível a



variações na umidade superficial do solo, mesmo em um cenário partindo do solo com umidade próxima ao ponto de murcha e a ocorrência de pouco volume de chuva.

Trabalhos futuros envolvem a determinação de um modelo matemático adequado para converter a fase inicial em umidade do solo. Também se vislumbra a necessidade de se desenvolver uma análise complementar com a técnica gravimétrica, visando calibrar as sondas TDR e proporcionar melhores resultados para avaliação da GNSS-R.

REFERÊNCIAS

BURGIN, M. S., COLLIANDER, A., NJOKU, E. G., CHAN, S. K., CABOT, F., KERR, Y. H., BINDLISH, R.; JACKSON, T. J. ENTHEKABI, D.; YUEH, S. H. A Comparative Study of the SMAP Passive Soil Moisture product with existing satellite-based soil moisture products. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 55, n. 5, p. 2959-2971., 2018.

CHEW, C. C., SMALL, E. E., LARSON, K. M., ZAVOROTNY, V. U. Effects of near-surface soil moisture on GPS SRN data: development of a retrieval algorithm for soil moisture. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 53, n. 1, p. 537-543, 2014.

EURIQUES, J. F. **Determinação da umidade do solo por meio da técnica de refletometria GNSS – primeiros resultados no Brasil**. (Dissertação – Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR), 2019. 112 p.

EURIQUES, J. F.; KRUEGER, C. P.; MACHADO, W. C.; SAPUCCI, L. F.; NIEVINSKI, F. G. Soil Moisture Estimation with GNSS Reflectometry: A Conceptual Review. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 413-434, 2021.

FAGUNDES, M. A. R.; TINTI, I. M.; IESCHECK, A.; AKOS, D.; NIEVINSKI, F. G. An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: design and long-term validation towards sea-level altimetry. **GPS Solutions**, v. 25, p. 73, 2021.

JOSEPH, A. Measuring GNSS signal strength: What's the difference between SNR and C/N₀. **Inside GNSS**, novembro/dezembro, p. 20 -25, 2010.

LARSON, K.; BRAUN, J.; SMALL, ZAVOROTNY, E.; V.; GUTMANN, E.; BILICH, A. GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content. **IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens**. v. 3, n. 1, p. 91-99, 2010.

LARSON, K. M.; NIEVINSKI, F. G. GPS Snow Sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. **GPS Solutions**, v. 17, n. 1, 2013.

MONTENBRUCK, O.; MacLEOD, K. Annex A: Data formats. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Ed. Springer. 2017.

NIEVINSKI, F. G.; HOBIGER, T. **Site guidelines for multi-purpose GNSS reflectometry stations**. 2019.



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.

NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation - Part I: Formulation and simulations. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.** v. 52, n. 10, p. 6555-6563, 2014b.

NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. An open source GPS multipath simulator in Matlab/Octave. **GPS Solutions**, v. 18, n. 3, p. 473-481, 2014c.

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.

PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M.; MARTINS, J. H. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.** v. 10, n. 2, p. 306-314, 2006.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; CAMPS, A.; VALL-ILOSSERA, M.; BOSCH-LLUIS, X.; MONERRIS, A.; RAMOS-PEREZ, I.; VALENCIA, E.; MARCHAN-HERNANDEZ, J. F.; MARTINEZ-FERNANDEZ, J.; BARONCINI-TURRICCHIA, G.; PÉREZ-GUTIÉRREZ, C.; SÁNCHEZ, N. Land geophysical parameters retrieval using the interference pattern GNSS-R technique. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 49, n. 1, p. 71-84, 2011.

ROSSATO, L.; ANGELIS, C. F. Avaliação da umidade do solo em áreas densamente vegetadas sobre o Brasil, utilizando observações do sensor MIRAS/SMOS. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Anais...* São José dos Campos: INPE, 2013. Artigos, p. 9248-9255.

SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSHI, M.; JAEGER, E. R.; LEHNER, I. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-science Reviews**, v. 99, n. 4, p. 125-161, 2010.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; De MIRANDA, D. B.E; VARALLO, A.C.T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga, Botucatu**, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013.

TABIBI, S.; NIEVINSKI, F. G.; VAN DAM, T.; MONICO, J. F. G. Assessment of modernized GPS L5 SNR for ground-based multipath reflectometry applications. **Adv. Space Res.** v. 55, n. 4, p. 1104-1116, 2015

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.

ZHANG, S.; ROUSEL, N.; BONIFACE, K.; HA, M. C.; FRAPPART, F.; DARROZES, J.; BAUP, F.; CALVET J. Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s.l.], v. 21, n. 9, p. 4767-4784, 2017.