

TIDESAT – UMA STARTUP DE SENSORIAMENTO REMOTO GEODÉSICO

Manuella Anaís Rodrigues Fagundes¹

Maurício Kenji Yamawaki¹

Vitor Hugo de Almeida Júnior¹

Douglas Leipelt²

Iuri Mendonça Tinti³

Felipe Geremia-Nievinski⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto -
manuellafagundes@hotmail.com
kenji.yamawaki@gmail.com
vitorhugo.jr@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Graduação em Eng. Cartográfica -
dleipelt@hotmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Graduação em Eng. da Computação -
iuri.tinti7@gmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Geodésia e Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - felipe.nievinski@ufrgs.br

RESUMO

A TideSat utiliza satélites de navegação para medir o nível d'água em rios, lagos, represas e no oceano. Os sensores podem ser implantados longe da superfície da água, em locais protegidos das ações diretas de eventos extremos, bem como de roubo e vandalismo. Uma solução completa está sendo desenvolvida para monitorar o nível d'água com base na inovadora tecnologia de sensoriamento remoto geodésico, denominada Refletometria GNSS (GNSS-R). O sensor irá transferir dados GNSS brutos para a nuvem, onde os níveis d'água serão recuperados e disponibilizados para usuários finais e integradores parceiros. A solução contribuirá para a segurança de inúmeras comunidades costeiras e ribeirinhas expostas às mudanças climáticas e eventos climáticos extremos. Procuramos promover um acesso mais amplo aos dados sobre o nível d'água, popularizando esse tipo de medição. Como uma spinoff da universidade, tivemos uma grande vantagem no desenvolvimento de produtos. O sensor em si já foi bem validado em experimentos de campo abrangendo o período mínimo de um ano. O processamento de dados é a etapa mais crucial em nosso fluxo de trabalho, cujo desenvolvimento só foi possível devido ao capital intelectual adquirido durante anos de pesquisa.

Palavras chaves: GNSS-R, empreendedorismo, spin-off, medição do nível da água.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento do nível do mar costeiro é crítico devido às mudanças climáticas. Estas também influenciam diretamente o comportamento de outros corpos d'água como rios e represas. Infelizmente, os instrumentos de medição de nível d'água convencionais, conhecidos como marégrafos ou linígrafos, apresentam certas dificuldades para instalação e manutenção, pois eles precisam estar muito próximos da água, onde podem ser danificados devido a tempestades e enchurradas, assim como podem ficar sem contato com a água em períodos de seca.

A Refletometria GNSS (GNSS-R) é uma técnica de sensoriamento remoto geodésico comprovada cientificamente como alternativa para o monitoramento altimétrico do mar costeiro e de corpos hídricos

continentais (Geremia-Nievinski et al. 2020). Relatamos aqui o desenvolvimento da TideSat, de uma *startup* que emprega GNSS-R, denominada TideSat, *spinoff* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Como as mudanças climáticas tendem a se agravar (IPCC, 2019), espera-se que a demanda por tecnologias de monitoramento do nível d'água cresça prosseguidamente. Ainda há necessidade de observações cobrindo áreas maiores durante períodos mais longos, especialmente ao longo da costa (Cazenave e Nerem 2004). Neste contexto, há grandes oportunidades para a densificação e modernização das redes de medição de nível d'água, além de preencher as lacunas observacionais existentes que persistem tanto no tempo quanto no espaço.

Dispositivos com diferentes princípios de funcionamento têm sido usados para medir o nível d'água (Cipollini et al. 2017). Cada um tem suas próprias vantagens e desvantagens: os sensores acústicos podem ser afetados pela temperatura, os sensores de pressão precisam de correções atmosféricas e para a densidade da água, e o radar tem erros proporcionais à altura das ondas (Martín Míguez et al. 2012; Boon et al. 2012). Há ainda as réguas, que necessitam de leitura visual, um método bastante simples que ainda é utilizado em diversas localidades, porém a necessidade de pessoal é intensiva, além de estar sujeita a erros grosseiros. Todos os instrumentos convencionais para monitoramento do nível d'água necessitam de uma estrutura física adjacente para suporte à medição.

Estudos anteriores no campo teórico de GNSS-R incluem Nievinski e Larson (2014b), que descreve um modelo físico para observáveis GNSS de multicaminho. Em termos experimentais, cerca de quarenta estações GNSS existentes já foram demonstradas para aplicações altimétricas (Geremia-Nievinski et al. 2020b). O pioneiro foi Anderson (2000), seguido por duas outras demonstrações (Rodríguez-Alvarez et al. 2011a; Hongguang et al. 2012). Todas essas provas de conceito iniciais duraram menos de uma semana. Séries temporais mais longas foram apresentadas primeiro por Larson et al. (2013a), com 3-4 meses em Onsala (Suécia) e Friday Harbor (EUA), seguido por Larson et al. (2013b), com observações de 1 ano obtidas em Peterson Bay (EUA). Seus resultados mostraram que é possível medir o nível do mar usando receptores geodésicos com uma precisão de 5–10 cm para estimativas brutas (dependendo da amplitude da maré). Posteriormente, Larson et al. (2017) revisitou a estação Friday Harbor por um período muito mais longo de 10 anos; comparado a um marégrafo localizado (distância de 300 m), o estudo confirmou 12 cm e 2 cm para estimativas brutas e médias diárias, respectivamente. Sinais GPS modernizados, como L2C e L5, têm desempenho superior na produção de assinaturas de multicaminho mais limpas (Tabibi et al. 2015), embora o sinal L1 C/A legado também seja viável para altimetria GNSS-R (Larson e Small 2016).

A maioria dos estudos sobre GNSS-R para medição do nível do mar costeiro utilizou receptores e antenas comerciais de qualidade geodésica, conforme revisado por Geremia-Nievinski et al. (2020). Infelizmente, esses dispositivos são relativamente caros, o que limita o uso mais amplo em GNSS-R para monitoramento. Além disso, as antenas de receptores geodésicos são quase hemisféricas (Nievinski e Larson 2014b), o que suprime grande parte das reflexões advindas de ângulos de elevação baixos. Para GNSS-R, as antenas de baixo custo apresentam a vantagem de não suprimir o multicaminho com a mesma capacidade.

Um dos pioneiros em alternativas de hardware para GNSS-R baseado em SNR foi Rodríguez-Alvarez et al. (2011b), que batizou seu dispositivo de “SMIGOL”. Embora sido desenvolvido originalmente para monitorar a umidade do solo e outras variáveis terrestres, como vegetação, o SMIGOL também foi demonstrado para a detecção do nível de água em um reservatório (Rodríguez-Alvarez et al. 2011b) e posteriormente para o nível do mar (Alonso-Arroyo et al. 2015).

Outra alternativa de hardware de baixo custo

para GNSS-R baseado em SNR foi chamada de “FROSD”, desenvolvido por Adams et al. (2013) com base em protótipos de Chen et al. (2017). A aplicação pretendida era a medição da profundidade da neve, o que é um tipo de altimetria, então o dispositivo provavelmente seria igualmente aplicável para medição do nível d'água.

Mais recentemente, relatamos o projeto de um sistema completo de hardware e software em código aberto para um sensor GNSS-R e o demonstramos para medir o nível d'água (Fagundes et al. 2020). O sensor é capaz de rastrear os satélites da constelação GPS na frequência L1. A configuração de baixo custo abre novas escalas de mercado que estão fora do alcance dos mediadores de nível convencionais (Biagi et al. 2016). Particularmente plataformas de hardware de código aberto, como Arduino, têm recebido muita atenção para aplicativos de detecção ambiental e prototipagem (Chen et al. 2017; Rainville et al. 2019; Rodrigues e Moraes 2019).

3. METODOLOGIA

A partir das experiências exitosas em pesquisa relatadas anteriormente, almejamos oferecer comercialmente uma solução alternativa para medição do nível d'água através da reflexão de ondas de rádio transmitidas por GPS, GALILEO e outros GNSS. O sensor pode detectar o nível do mar em uma distância inclinada, tornando viável a sua implantação logo do corpo d'água.

Nossa trajetória, da pesquisa ao empreendedorismo, iniciou no laboratório com a formação da equipe técnica. Considerando o período entre os primeiros desenvolvedores do sensor até a equipe de fundadores da *startup* passou-se dois anos. Em 2018 os atuais fundadores iniciaram suas pesquisas em refletometria no Laboratório de Geodésia e posteriormente no Laboratório de Modelagem, ambos localizados no Instituto de Geociências da UFRGS. Alguns dos membros também atuam junto ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (PPSR/CEPSRM).

Em 2019 a equipe teve seu primeiro contato com o empreendedorismo, através da participação de um de seus co-fundadores como líder de equipe na Escola de Inverno promovida pela Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico da UFRGS. Em 2020, um segundo membro participou como líder do projeto cuja melhorias já haviam sido implementadas.

Em nov/ 2020, a equipe inscreveu a solução na Maratona de Empreendedorismo da UFRGS, iniciando um trabalho semanal de desenvolvimento do modelo de negócios. Nesta competição originou-se o nome “TideSat”, a partir das palavras *tide* (maré, em inglês) e *sat* (abreviação de satélite), representando o objeto a ser medido e a ferramenta a ser empregada, respectivamente.

Em paralelo à Maratona, submeteu-se o projeto para a competição *Galileo Masters*, organizada pela *Anwendungszentrum Oberpfaffenhofen* (AZO) com apoio da Comissão Europeia (EC). A TideSat, então conhecida como *Satellite Tide Gauge*, foi vencedora da categoria Desafio Universitário, cujo troféu pode ser visto na Figura 1. Ademais, a solução foi premiada com um investimento denominado *Incubation Bootcamp*, que garante um recurso financeiro para desenvolvimento do negócio.

Um dos pré-requisitos do investimento pela AZO/EU era que a startup viesse a ser incubada. Assim, buscamos pré-incubação junto ao Centro de Empreendimentos em Informática (CEI) do Instituto de Informática da UFRGS. Posteriormente, a TideSat foi aceita para incubação formal no CEI.

Mais recentemente, a TideSat é participante finalista no programa Go.GlobalX, que visa desenvolver negócios inovadores com potencial de impacto global. Uma linha do tempo pode ser vista na Figura 2.



Fig.1 - Troféu da competição Galileo Masters na categoria Desafio Universitário.



Fig. 2 - Trajetória da TideSat

4. DESENVOLVIMENTO

Todo o desenvolvimento e validação do sensor, que são parte essencial da solução proposta, podem ser encontrados em Fagundes et. al (2020). O sensor TideSat já foi validado em campo, com estações em Porto Alegre, Imbituba e Balneário Rincão. Possui também *beta testers* em outras partes do mundo, conforme mostra a Figura 3.



Fig. 3 - Localização dos sensores instalados
Anais X SAPGU (2021) – I SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL-PORTUGAL (ISBN 978-65-5973-059-9)

Idealizamos uma solução completa de medição de nível, na qual nosso dispositivo será oferecido gratuitamente quando o cliente assinar um serviço de dados. Os dados brutos de campo serão transmitidos por meio de conexão GSM (*Global System for Mobile*) e posteriormente processados na nuvem; a série temporal do nível do mar resultante poderá ser acessada de um site ou visualizada em um aplicativo móvel.

Nossa solução tem o potencial de revolucionar o monitoramento do nível do mar costeiro, pois o custo é uma fração da instrumentação de ponta, permitindo assim uma densificação massiva da rede de medição do nível d'água. Isso ajudará inúmeras comunidades ao redor do mundo, viabilizando a medição da superfície da água em locais onde atualmente não é possível, densificando a rede maregráfica onde há lacunas observacionais e garantindo a continuidade do monitoramento próximos a sensores convencionais.

Desenvolvemos inicialmente um sistema *offline* para Refletometria GNSS, conforme mostra a Figura 4. O sensor tem como principais componentes eletrônicos uma placa microcontrolada integrada com um leitor / gravador de cartão *Secure Digital* (SD), um módulo GNSS de frequência simples e uma antena patch externa. Além disso, foi projetado um sistema de fornecimento de energia solar completo, composto por um painel solar de 6 W, um carregador/regulador e uma bateria de 4400 mAh.



Fig. 4 - O funcionamento do sensor refletométrico.

Também desenvolvemos dois softwares. O primeiro é executado embutido no dispositivo Arduino e é responsável por registrar os dados GNSS brutos no cartão SD em uma taxa de amostragem e duração de arquivo especificadas pelo usuário. O segundo programa de software é executado no servidor, para o qual empregamos o ambiente MATLAB. Ele processa os dados brutos e calcula o nível da água com base em um modelo físico-estatístico. Tudo isso está atualmente operacional e validado.

Conseguimos atingir um baixo custo explorando módulos GNSS de consumo de mercado de massa que geram dados no formato NMEA mais simples, em vez do formato RINEX mais sofisticado. Mais especificamente, não precisamos de medições de fase da portadora nem de pseudodistância - apenas a relação sinal-ruído (SNR) é necessária. Observando os dados SNR, podemos identificar a oscilação causada por reflexos de ondas de rádio na superfície da água. Finalmente, uma análise espectral das observáveis de interferência de multicaminho revela variações do nível da água ao longo do tempo. Cada passagem de sobrevoos de satélite permite uma estimativa independente do nível.

A inclusão de sistemas como Glonass e Galileo em uma solução multi-GNSS melhoraria significativamente a resolução temporal da série temporal resultante.

A Fig. 5 mostra a metodologia que está sendo empregada no modelo de negócios da solução, assim como um *roadmap* dos próximos passos. Busca-se uma solução híbrida, que envolve um produto (um sensor IoT) combinado a um serviço (plataforma na nuvem), disponibilizado mediante assinatura de plano recorrente (mensal, semestral ou anual). Atualmente possuímos o sensor, e subcontratamos uma empresa parceira para desenvolver a funcionalidade de transmissão de dados. Como desafios há o processamento do dado SNR na nuvem e a visualização das séries de nível d'água através de uma interface amigável. Outro objetivo futuro é firmar parceria com empresas de modelagem para que o dado de nível seja utilizado junto a uma plataforma de alerta de desastres.

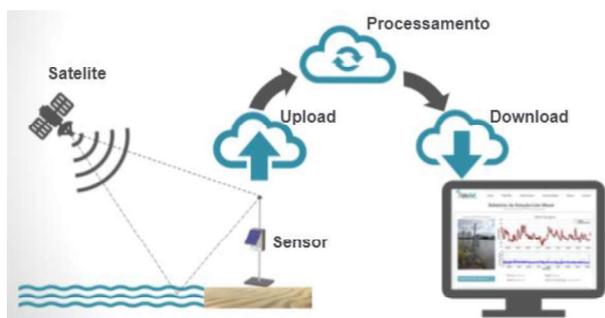


Fig. 5 - A solução da TideSat

5. RESULTADOS

Implantamos vários protótipos funcionais do sensor em campo. Eles operam ininterruptamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana por vários anos, tendo resistido a condições climáticas severas. A primeira unidade GNSS-R foi instalada no Cais Mauá, em Porto Alegre (-30,0277° S, -51,2287° W) em outubro de 2018; e a segunda está localizada no Porto de Imbituba (28,232019° S, -48,651064° W) desde junho de 2019, conforme pode ser visualizado na Figura 6.

Avaliamos o desempenho do sensor GNSS-R, localizado em Porto Alegre, por 317 dias, comparando-o a um linígrafo convencional disponível a uma distância de 10 m. As estatísticas confirmaram que o sensor pode recuperar a altura da água com uma correlação muito alta (0,989) e um erro médio quadrático ao nível do centímetro (2,9 cm).

O produto requer apenas componentes comerciais de prateleira e montagem mínima. Alinhados à estratégia de fornecer o sensor gratuitamente e cobrar apenas o serviço de assinatura, disponibilizamos as especificações do hardware e as instruções de montagem abertamente na Internet (<https://github.com/fgnievinski/mphw>).

A solução da TideSat começará com a solicitação de um cliente. O sensor será fornecido gratuitamente com um contrato de assinatura mensal, semestral ou anual. Pretendemos maximizar o número de assinantes, permitindo várias assinaturas pelo mesmo cliente. Ao contrário das tecnologias mais antigas, garantiremos o suporte necessário para manter a série temporal contínua. Ao fornecer assistência técnica ao cliente, esperamos manter cada sensor funcionando

corretamente e gerando receita. Esta operação é possível graças às competências da equipe, com amplo conhecimento em navegação por satélite e sensoriamento remoto, programação de computadores e eletrônica.



Fig. 6 - Instalações do sensor refletométrico em campo: Porto Alegre (RS) e Imbituba (SC)

6. CONCLUSÃO

Atualmente, os sensores de nível de água não são tão numerosos quanto deveriam ser. Existem imensas oportunidades para a modernização das redes de medição das marés e para preencher as lacunas de observação existentes. Nosso sensor pode ser instalado em condições que não são viáveis para medidores de nível de água tradicionais. Portanto, espera-se abrir novas escalas de mercado que estavam simplesmente fora do alcance das tecnologias convencionais.

As vantagens da nossa solução conferem-lhe o potencial de revolucionar o monitoramento. Acreditamos que seu menor custo total de propriedade – incluindo não apenas aquisição mas também instalação e manutenção –, permitirá uma massificação e popularização das redes de medição de nível d'água. Isso ajudará inúmeras comunidades ao redor do mundo e contribuirá com os esforços globais para adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

Em um futuro próximo, esperamos transformar os *beta testers* existentes em primeiros usuários e clientes reais pagantes. Pretendemos fornecer nossa solução a organizações governamentais, entidades privadas e ONGs nas regiões costeiras e ribeirinhas, e também aprimorar a solução, considerando o rastreamento de satélites GLONASS, GPS e GALILEO. Além disso, a equipe de engenharia está dedicada ao melhoramento da acurácia através da identificação de erros sistemáticos e aleatórios envolvidos no processo de medição.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à AZO/EU pela experiência com a competição *Galileo Masters* e o investimento financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO-ARROYO A, CAMPS A, PARK H, PASCUAL D, ONRUBIA R, MARTIN F (2015) Retrieval of significant wave height and mean sea surface level using the GNSS-R Interference Pattern Technique: results from a three-month field campaign. **IEEE Trans Geosci Remote Sens** 53(6):3198–3209. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2371540>.

- ADAMS J, AI KAABI H, BRILL S, EVEN R, KHAN U, MILLER M, SMITH J, WHITNEY M (2013) FROS-D: Free-Standing Receiver of Snow Depth (**Aerospace Engineering Sciences Senior Design Project**). University of Colorado Boulder, Department of Aerospace Engineering Sciences
- ANDERSON KD (2000) Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals. **J Atmospheric Ocean Technol** 17(8):1118–1127. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017%3c1118:DOWLATA%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017%3c1118:DOWLATA%3e2.0.CO;2)
- BIAGI L, GREC F, NEGRETTI M (2016) Low-cost GNSS receivers for local monitoring: experimental simulation, and analysis of displacements. **Sensors** 16(12):2140. <https://doi.org/10.3390/s16122140>
- BOON, J. D.; HEITSENRETH, R. M.; HENSLEY, W. M. Multi-sensor evaluation of microwave water level measurement error. In: OCEANS 2012, 2012, Hampton Roads, VA. **Proceedings of the 2012 OCEANS Conference**. Hampton Roads, VA: Marine Technology Society (MTS) and the Oceanic Engineering Society of IEEE (IEEE/OES), 2012. p. 1–8. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6405079/>. 2 jun. 2020.
- CAZENAVE, A.; NEREM, S. R. Present-day sea level change: Observations and causes. **Reviews of Geophysics**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. RG3001, 2004.
- CHEN Q, WON D, AKOS DM (2017) Snow depth estimation accuracy using a dual-interface GPS-IR model with experimental results. **GPS Solut** 21(1):211–223. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0517-1>
- CIPOLLINI, Paolo *et al.* Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges. **Surveys in Geophysics**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 33–57, 2017.
- ELSHAROUNY, Mohamed Ramadan Mohamed Mahrous. Planning Coastal Areas and Waterfronts for Adaptation to Climate Change in Developing Countries. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 34, p. 348–359, 2016
- FAGUNDES, M. A. R. *et al.* An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: design and long-term validation towards sea-level altimetry. **GPS Solutions**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 73, 2021.
- GEREMIA-NIEVINSKI F, HOBIGER T, HAAS R, LIU W, STRANDBERG J, TABIBI S, VERY S, WICKERT J, WILLIAMS S (2020) SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign. **J Geodesy** 94(8):70. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01387-3>
- GEREMIA-NIEVINSKI F, MAKRAKIS M, TABIBI S (2020b) Inventory of published GNSS-R stations, with focus on ocean as target and SNR as observable. **Zenodo**. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3660521>
- HONGGUANG W, SHIFENG K, QINGLIN Z (2012) A model for remote sensing sea level with GPS interferometric signals using RHCP antenna. In: **10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE—2012)**. IEEE, Xi'an, China, pp 624–626. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2012.6408848>.
- LARSON KM, RAY RD, NIEVINSKI FG, FREYMUELLER JT (2013) The accidental tide gauge: a GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska. **IEEE Geosci Remote Sens Lett** 10(5):1200–1204. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075>
- LARSON KM, LÖFGREN JS, HAAS R (2013) Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. **Adv Space Res** 51(8):1301–1310. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>
- LARSON KM, RAY RD, WILLIAMS SDP (2017) A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge. **J Atmospheric Ocean Technol** 34(2):295–307. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>
- LARSON KM, SMALL EE (2016) Estimation of snow depth using L1 GPS signal-to-noise ratio data. **IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens** 9(10):4802–4808. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2508673>
- MARTÍN MÍGUEZ, Belén; TESTUT, Laurent; WÖPPELMANN, Guy. Performance of modern tide gauges: towards mm-level accuracy. **Scientia Marina**, [s. l.], v. 76, n. S1, p. 221–228, 2012.
- NICHOLLS, Robert. Planning for the Impacts of Sea Level Rise. **Oceanography**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 144–157, 2011.
- NIEVINSKI FG, LARSON KM (2014) Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation—Part I: formulation and simulations. **IEEE Trans Geosci Remote Sens** 52:6555–6563. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297681>
- PÖRTNER, O. *et al.* **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível:<https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/technical-summary/>.
- RAINVILLE N, PALO S, LARSON KM, MATTIA M (2019) Design and preliminary testing of the volcanic ash Plume receiver network. **J Atmospheric Ocean Technol** 36(3):353–367. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-18-0177.1>
- RODRÍGUEZ ÁLVAREZ N (2011) Contributions to earth observation using GNSS-R opportunity signals. **PhD thesis**, Universitat Politècnica de Catalunya.
- RODRIGUEZ-ALVAREZ N, BOSCH-LLUIS X, CAMPS A, RAMOS-PEREZ I, VALENCIA E, PARK H, VALL-LLOSSERA M (2011) Water level monitoring using the interference pattern GNSS-R technique. 2011 **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, Vancouver, BC, Canada, pp 2334–2337. <https://doi.org/10.1109/IGARS.2011.6049677>
- RODRIGUES FS, MORAES AO (2019) ScintPi: a low-cost, easy-to-build GPS ionospheric scintillation monitor for DASI studies of space weather, education, and citizen science initiatives. **Earth Space Sci** 6(8):1547–1560. <https://doi.org/10.1029/2019EA000588>
- TABIBI S, NIEVINSKI FG, VAN DAM T, MONICO JFG (2015) Assessment of modernized GPS L5 SNR for ground-based multipath reflectometry applications. **Adv Space Res** 55:1104–1116. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.019>
- TAMISIEA, Mark E. *et al.* Sea level: measuring the bounding surfaces of the ocean. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s. l.], v. 372, n. 2025, p. 20130336, 2014.