



CAPÍTULO 9

SENSORIAMENTO REMOTO PARA A GESTÃO DO SOLO: UMA PROPOSTA PARA AMBIENTES URBANOS, AGRÍCOLAS E FLORESTAIS NO ESTADO DO MARANHÃO

Denilson da Silva Bezerra

Professor – Universidade Federal do Maranhão

Felipe Martins Sousa

Mestrando - Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto (SR) pode ser compreendido como a utilização de princípios físicos para a obtenção de informações de objetos/alvos, dessa forma, trata-se de uma tecnologia essencial para a coleta de informações sobre a superfície terrestre sem a necessidade de contato físico direto. Normalmente são utilizados sensores instalados em satélites, drones, aviões ou até mesmo em plataformas móveis, essa técnica permite a obtenção de dados que são posteriormente analisados para diversas finalidades, como monitoramento ambiental, planejamento urbano, agricultura de precisão, entre outras.



Figura 1. Esquema ilustrativo dos princípios do SR.

Os princípios físicos básicos do SR podem ser summarizados na ação física caracterizada pela interação da radiação eletromagnética (REM) com os objetos/ alvos presentes na superfície da Terra, cabendo enfatizar que a principal fonte de REM é oriunda do Sol. No momento que a REM incide sobre um alvo/objeto ocorre uma resposta física (comportamento espectral), ou seja, a REM pode ser refletida (a “luz” pode e volta), absorvida pela superfície do material ou transmitida, dependendo das propriedades do material e do comprimento de onda da radiação. Os sensores remotos acoplados às plataformas (satélites, drones e etc.) captam essa radiação refletida ou emitida, permitindo a análise das características do objeto ou área em questão. Os sensores podem ser classificados em duas categorias, os “passivos” e os “ativos” conforme, respectivamente, a descrição abaixo:

- Sensores Passivos: Captam a radiação natural refletida ou emitida pelos objetos/alvos, como a luz solar. Um exemplo clássico são as câmeras fotográficas que registram imagens visíveis.
- Sensores Ativos: Emitem sua própria radiação e medem a resposta dos objetos/alvos a essa radiação. O radar é um exemplo de sensor ativo, que utiliza ondas de rádio para obter informações sobre a superfície terrestre.

A literatura científica tem evidenciado que o SR é uma poderosa ferramenta para o estudo do solo, possibilitando a análise e monitoramento de suas características de forma eficiente e em larga escala. Por meio de sensores instalados em satélites ou drones, é possível captar informações sobre a composição, umidade, textura e uso do solo sem a necessidade de amostragens físicas extensivas (Anneli et al., 2021; Abdulraheem et al., 2023).

Essa tecnologia permite a identificação de diferentes tipos de solo e a detecção de alterações provocadas por atividades agrícolas, urbanas ou naturais. Além disso, o SR é utilizado para monitorar a erosão, compactação e degradação do solo, contribuindo para o manejo sustentável e a recuperação ambiental.

Face ao exposto nos parágrafos acima, o presente capítulo tem por objetivo apresentar uma breve descrição das principais técnicas em SR que podem ser usadas para monitorar as formas de uso e cobertura do solo no meio urbano, agrícola e florestal. De forma mais específica, este capítulo abordará três categorias de SR que podem ser utilizadas no monitoramento e estudos dos solos, a saber: SR Óptico, SR Térmico e SR Ativo: SAR e LiDAR.

2. SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO

O sensoriamento remoto óptico refere-se ao uso de sensores que medem a radiação refletida ou emitida nas faixas do visível, próximo-infravermelho e infravermelho de onda curta para caracterizar superfícies terrestres. Em solos, a assinatura espectral obtida por imagens multiespectrais e hiperespectrais revela informação sobre cor, matéria orgânica, minerais, textura aparente e, indiretamente, umidade superficial, importante destacar que tais propriedades são fundamentais para análises ambientais e de uso do solo (bem-Bem-Dor et al., 2009).

No ambiente agrícola, o SR óptico permite mapear variáveis essenciais ao manejo: estimativas espaciais de carbono orgânico do solo, salinidade, e padrões de erosão ou perda de solo quando combinadas com técnicas de aprendizado de máquina (Machine Learning/ML) e séries temporais. Essas informações suportam agricultura de precisão que pode ter efeitos positivos na otimização da adubação, irrigação e práticas de conservação, o que por sua vez, pode reduzir custos e potenciar impactos ambientais. Estudos recentes mostram ganhos importantes quando imagens hiperespectrais são integradas a modelos que calibraram medições de campo (Abdulraheem et al., 2023; Ranzhe et al., 2024).

Em formações florestais, sensores ópticos são úteis para identificar variações de solo exposto, substrato mineral e condições de umidade no dossel inferior, além de monitorar processos de degradação, compactação e perda de matéria orgânica após distúrbios (como por exemplo, focos de calor e desmatamento). Importante também mencionar que a sensibilidade espectral a minerais e a matéria orgânica ajuda a entender a regeneração do solo e a capacidade de suporte da vegetação (Ben-Dor et al., 2009).

No contexto do ambiente urbano, o sensoriamento óptico pode auxiliar no mapeamento de compactação do solo (impermeabilização), identificação de áreas verdes em relação superfícies pavimentadas e detecção de contaminantes superficiais. Essas informações especializadas são valiosas para o planejamento urbano, avaliação de risco de enchentes e projetos de recuperação de solos e espaços verdes, onde a resolução espacial e a classificação de imagens fazem diferença para decisões locais e até regionais.

Apesar das vantagens descritas acima, também há limitações que precisam ser levadas em consideração, tais como: as técnicas de SR óptico são sensíveis à cobertura vegetal, umidade superficial e atmosfera, sendo, portanto, necessário, sempre que possível, a calibração com amostras de campo, bibliotecas espetrais e correções radiométricas/geométricas (Abdulraheem et al., 2023). Em síntese, o SR óptico é uma ferramenta rápida, escalável e econômica que, quando integrada a métodos de campo e algoritmos modernos, transforma o entendimento e a gestão dos solos em ambientes agrícolas, florestais e urbanos.

Por fim, cabe mencionar que o SR óptico pode ser considerado como uma categoria “padrão”, uma vez que, faz uso da faixa visível das ondas eletromagnéticas da principal fonte de radiação da Terra (o Sol), mas existem outros grupos de SR que serão destacados no presente capítulo, que não pertencem à categoria padrão, estes são: SR espectral, SR termal e baseado em RADAR.

A Fig. 2 fornece uma visão geral e os estágios dos métodos de SR não óptico para análise de solo (análise de refletância espectral, imagens infravermelhas térmicas e sensoriamento remoto por radar); ferramentas para monitoramento de solo (por exemplo, LiDAR, hiperespectral, infravermelho visível, scanners, câmeras, etc.) com várias aplicações de SR, bem como as partes de SR usadas no monitoramento do solo, e que serão descritas nos tópicos que seguem abaixo.

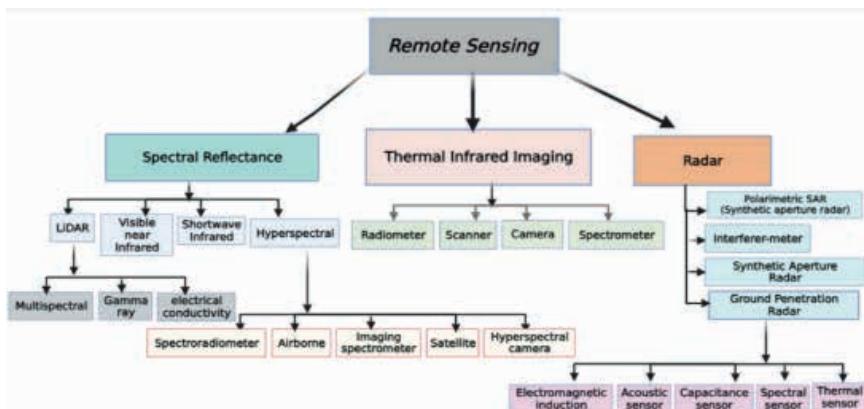


Figura 2. Alguns métodos (não ópticos) e tipos de sensoriamento remoto em medições de solo. Fonte: Abdulraheem et al. (2023)

3. SENSORIAMENTO REMOTO TÉRMICO (LST) E BALANÇO DE ENERGIA VIA SENSORES TERMAIS (INFRAVERMELHO TÉRMICO)

O SR térmico, por meio de sensores na banda do infravermelho térmico, permite estimar a Land Surface Temperature (LST), ou seja, a temperatura da superfície terrestre, que permite a compreensão do balanço de energia entre o solo e a atmosfera (NImish, Bharath and Lalitha, 2020).

No ambiente agrícola, variações na LST refletem diferenças na umidade do solo, cobertura vegetal e estresse hídrico: solos secos e expostos aquecem-se mais rapidamente, enquanto vegetação saudável reduz a LST via evapotranspiração (Heinemann et al., 2020). Ou seja, o monitoramento de localidades com baixa precipitação, como o Semiárido Brasileiro, via métodos baseados em LST ajuda a identificar áreas de déficit hídrico e otimizar práticas como irrigação e manejo do solo.

Em ambientes florestais, a vegetação mais densa tende a manter temperaturas superficiais mais baixas, por meio de processos como a evapotranspiração e maior inércia térmica, contudo em áreas sob forte influência antrópica, onde ocorre desmatamentos e/ou forte fragmentação florestal há eventos de aumento da LST, contribuindo para alterações microclimáticas e secas locais, dessa forma, o uso do SR Térmico em formações florestais pode ser usado para identificação de áreas conservadas e para o monitoramento de degradadas ou em processo de degradação (Reiners, Sobrino and Kuenzer, 2023). Também é importante mencionar, que a literatura científica indica que o uso do acompanhamento da variação da LST é um indicador eficaz para monitoramento de fenologia vegetal, como dinâmica de crescimento e também, para a identificação de eventos extremos (ex.: secas e queimadas) nas florestas.

No contexto urbano, a LST é fundamental para mapear a distribuição espaço-temporal do fenômeno da Ilha de Calor Urbana (UHI). Áreas densamente pavimentadas e/ou com solos expostos retêm e irradiam calor de maneira mais intensa que regiões vegetadas, elevando a temperatura do solo e do ar nos centros urbanos (Nimish, Bharath and Lalitha, 2020; Kaiser et al., 2022). Dessa forma, o uso do mapeamento térmico pode permitir o planejamento de intervenções como criação de parques, vegetação urbana e superfícies permeáveis para mitigar o aquecimento local (Jamali, Khaledi and Razavian, 2021; Mallick et al., 2022).

Entre os principais métodos que utilizam LST no cálculo do balanço de energia, destacam-se o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e o BAITSSS (Bastiaanssen Adaptation of the Two-Source Surface Energy Balance System). O SEBAL trata a superfície terrestre como um todo e calcula a evapotranspiração a partir do balanço entre radiação líquida, fluxo de calor no solo e fluxos de calor sensível e latente, usando LST e dados meteorológicos.

Já o BAITSSS segue a abordagem de duas fontes, separando a contribuição da vegetação e do solo exposto, o que permite análises mais precisas em áreas heterogêneas, como mosaicos agrícolas ou florestas com clareiras. Ambos os modelos são amplamente utilizados no monitoramento hídrico, no manejo agrícola, na avaliação de áreas degradadas e no estudo do microclima urbano.

Em resumo, o SR térmico e a análise da LST oferecem uma visão integrada dos fluxos energéticos nos solos, destacando a dinâmica hídrica, tipo de cobertura, estresse térmico e impactos da urbanização ou manejo florestal. Tais insights são cruciais para a gestão sustentável do solo, da água e do microclima nos diferentes ambientes (agrícola, florestal e urbano), podendo subsidiar dessa forma, ações de mitigação e adaptação frente a desafios ambientais do século XXI.

4. SENSORIAMENTO REMOTO ATIVO: RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR) E LIDAR (LIGHT DETECTION AND RANGING)

O sensoriamento remoto ativo com radar de abertura sintética (SAR) e LiDAR tornou-se central para investigar solos em diferentes escalas, pois ambos “enxergam” além das limitações do óptico (radiação solar); o SAR pela sensibilidade à estrutura dielétrica/umidade e o LiDAR pela capacidade de medir com precisão a microtopografia e a estrutura da superfície/vegetação. Em ambientes agrícolas, florestais e urbanos, essas duas categorias de sensores são complementares: o SAR descreve processos hídricos e de rugosidade do solo, enquanto o LiDAR fornece o relevo de uma forma extremamente detalhada, o que pode facilitar o entendimento de processos de fluxos de água, erosão e impermeabilização (Shukla et al., 2023).

No ambiente agrícola, o SAR (C-band do Sentinel-1, por exemplo) é amplamente usado para estimar umidade do solo superficial a partir do retroespalhamento, que responde à constante dielétrica do solo e à rugosidade. A literatura científica mais recente tem demonstrado avanços na inversão física e no uso de aprendizado de máquina para melhorar a acurácia, incluindo integração com dados meteorológicos e controle de efeitos da cobertura vegetal (modelo de nuvem d’água, decomposição e métodos híbridos). Em campos cultivados, erros aumentam com dosséis densos e variação de rugosidade entre operações de preparo; ainda assim, abordagens atuais no Sentinel-1 já produzem mapeamentos autônomos de alta resolução para áreas agrícolas expostas, e modelos de ML vêm reduzindo viés sob culturas como trigo. Essas informações orientam irrigação, manejo de estresse hídrico e conservação do solo (Mardan & Ahmadi, 2021; Roy et al., 2025; Lakra et al., 2025).

Em florestas, o SAR ajuda a detectar distúrbios (clareiras, deslizamentos, queimadas) que expõem o solo e alteram o regime hídrico, enquanto o LiDAR (aéreo ou terrestre) pode ser usado para captar a estrutura do dossel e, sobretudo, Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução que revelam canais efêmeros, cabeceiras e microdepressões que concentram escoamento e condicionam a umidade do solo. Estudos mostram que índices derivados de MDE/LiDAR, combinados a algoritmos como Extreme Gradient Boosting, mapeiam padrões de umidade de solo em paisagens florestais; outros trabalhos usam LiDAR para quantificar erosão em sulcos, volumes remobilizados. Esse mapeamento microtopográfico permite modelar a conectividade hidrológica, suscetibilidade à erosão e recarga em encostas (Anneli et al., 2021; Chen et al., 2025).

No meio urbano, o SAR é valioso porque independe da iluminação solar e atravessa nuvens, permitindo monitorar enchentes rápidas, impermeabilização e a interface solo e áreas construídas. Métodos operacionais combinam SAR multitemporal com produtos de uso e cobertura da terra para acelerar o mapeamento

de inundações urbanas, inclusive distinguindo “double-bounce¹” em áreas construídas alagadas. Em contrapartida, o LiDAR fornece superfícies de elevação detalhadas (terreno e superfície), essenciais para entender drenagem, acúmulo de água em microdepressões e planejar soluções baseadas na natureza (bacias de retenção, ruas verdes), reduzindo erosão e transporte de sedimentos originados de solos expostos de obras e taludes urbanos (Zhou et al., 2019).

Para os ambientes agrícola, urbano e de florestas, o LiDAR destaca-se quando o objetivo é medir o relevo que controla processos do solo. Revisões recentes demonstram que MDE/LiDAR (aéreo e terrestre) capturam microtopografia milimétrica a centimétrica crítica para processos de erosão, selamento e dinâmica de umidade, resultados raramente obtidos por MDE obtidos por métodos convencionais. Os dados obtidos por meio do LiDAR permitem derivar índices de terreno (curvatura, índice topográfico de umidade, fluxo específico) que, em modelos estatísticos e baseados em processos, explicam padrões de umidade, susceptibilidade à incisão e caminhos de escoamento. Em ecossistemas naturais e agrícolas, tal detalhamento pode reduzir incertezas em estimativas de perda de solo e pode melhorar o diagnóstico de áreas prioritárias para práticas conservacionistas (Shukla et al., 2023).

Já o SAR é especialmente potente para dinâmica hídrica, nos ambientes levados em consideração no presente capítulo). A literatura recente enfatiza a integração entre radar (ativo) e radiometria de micro-ondas (passiva) para suprimir ambiguidades e melhorar estimativas de umidade do solo; técnicas de decomposição polarimétrica e modelos como o Improved Water Cloud Model vêm sendo testados em diferentes culturas. Em áreas agrícolas descobertas, soluções “autônomas” com Sentinel-1 mostram desempenho promissor para mapas operacionais; sob dossel e em mosaicos heterogêneos, a assimilação de dados e ML vêm ganhando espaço. Em síntese, o SAR complementa o LiDAR ao quantificar o estado hídrico que o relevo (medido pelo LiDAR) ajuda a explicar (Mardan e Ahmadi, 2021; Ettalbi et al., 2023).

A sinergia SAR-LiDAR é, portanto, estratégica e uma boa opção para pesquisadores e técnicos interessados em aplicações práticas. Em agricultura, MDE/LiDAR refina a modelagem de fluxo de calor no solo e distribuição de água (microrelevo controla lâmina de irrigação, encharcamento e formação de crostas), enquanto séries temporais SAR capturam o pulso de umidade após chuvas ou irrigações, permitindo intervenções de manejo no tempo certo. Em florestas, LiDAR pode ser usado para mapear a estrutura do dossel e caminhos preferenciais de escoamento; o SAR responde à umidade do sub-bosque e à exposição do solo após distúrbios, apoiando a restauração e o controle de erosão.

¹ É um retroespalhamento duplo: ocorre quando a onda de radar bate primeiro em uma superfície vertical (ex.: parede de prédio, tronco de árvore) e depois reflete em uma superfície horizontal condutora ou lisa (ex.: solo úmido, pavimento, superfície inundada), retornando ao sensor com alto ganho de sinal.

Em cidades, LiDAR pode ser utilizado para fornecer a geometria para modelos hidrológicos urbanos e para o diagnóstico de hotspots de erosão/sedimentação, enquanto o SAR oferece monitoramento frequente de enchentes e da efetividade de infraestrutura verde. Assim, decisões sobre conservação do solo, drenagem, mitigação de riscos e produtividade agrícola tornam-se mais precisas e oportunas (Anneli et al., 2021; (Wang et al., 2022).

Por fim, é importante reconhecer desafios e boas oportunidades de aplicações para o SAR e LiDAR. Em SAR, a rugosidade superficial, a geometria de observação e a vegetação afetam o sinal; a calibração com medidas de campo, a escolha do modelo (físico/empírico/híbrido) e o uso de polarimétrica adequadas são decisivos. Em LiDAR, a qualidade do classificador de pontos (separação terreno/vegetação), a densidade de pulsos e o método de interpolação do DEM influenciam métricas de relevo e, portanto, conclusões pedológicas. A literatura mostra que nem sempre um LiDAR “mais denso” apresenta um melhor resultado, o ganho depende da escala do processo que se quer explicar. Em ambos os casos, a integração de múltiplas fontes (SAR, LiDAR, óptico, topografia clássica) e modelagem com ML/assimilação de dados tende a oferecer os melhores resultados para diagnosticar e gerir solos em ambientes urbanos, agrícolas e florestais (Li et al., 2020). Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa entre as metodologias SAR e LiDAR, não como um a forma de “esgotar” a discussão, mas com intuito de chamar a atenção do leitor para estas duas metodologias de aquisição de dados/informações de solos no ambiente urbano, agrícola e em florestas.

Tabela 1. Comparação entre as tecnologias SAR e LiDAR em aplicações em solos do ambiente urbano, agrícola e em formações florestais.

Aspecto	SAR (Radar de Abertura Sintética)	LiDAR (Light Detection and Ranging)
Tipo de sensoriamento	Ativo (emite sua própria radiação)	Ativo (emite pulsos de laser)
Princípio de funcionamento	Retroespalhamento de micro-ondas; sensível à constante dielétrica e rugosidade	Tempo de retorno de pulsos de laser; mede distância com alta precisão
Vantagens principais	<ul style="list-style-type: none"> - Independente de luz solar e atravessa nuvens; - Sensível à umidade do solo e estrutura superficial; - Ideal para monitoramento frequente e temporal; - Captura alterações hidrológicas e distúrbios (enchentes, queimadas, deslizamentos). 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisão na medição do relevo e microtopografia; - Captura estrutura da vegetação e do dossel; - Permite derivar índices de terreno (curvatura, fluxo específico); - Útil para planejamento de drenagem, erosão e conservação do solo.

Aspecto	SAR (Radar de Abertura Sintética)	LiDAR (Light Detection and Ranging)
Aplicações típicas	<ul style="list-style-type: none"> - Estimativa de umidade do solo superficial em agricultura; - Monitoramento de enchentes e áreas urbanas; - Detecção de distúrbios em florestas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelagem de fluxo de água, erosão e infiltração; - Mapeamento microtopográfico; - Planejamento urbano e infraestrutura verde; - Estruturação de dossel florestal.
Algumas Limitações	<ul style="list-style-type: none"> - Sensível à rugosidade do solo e cobertura vegetal densa; - Interpretação depende de modelos físicos ou de aprendizado de máquina; - Geometria de observação pode gerar ambiguidades; - Necessita calibração com dados de campo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo relativamente alto para aquisição aérea ou terrestre; - Processamento intenso de dados; - Densidade de pontos nem sempre aumenta precisão útil; - Separação terreno/vegetação depende de classificadores adequados.
Complementaridade	SAR quantifica o estado hídrico que o LiDAR ajuda a interpretar pelo relevo.	LiDAR fornece relevo e microtopografia que explicam padrões de umidade e escoamento captados pelo SAR.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sensoriamento remoto, em suas diferentes modalidades, constitui um conjunto de ferramentas indispensáveis para o estudo e gestão dos solos nos ambientes urbano, agrícola e florestal. O sensoriamento óptico oferece alta resolução espacial e espectral, permitindo identificar propriedades visíveis da superfície, como cor, matéria orgânica aparente, salinidade e padrões de uso e cobertura. Sua principal fragilidade está na dependência de iluminação solar e na suscetibilidade a nuvens e cobertura vegetal densa, o que limita a observação contínua.

O sensoriamento térmico (LST e balanço de energia) complementa o óptico ao fornecer informações sobre temperatura superficial e fluxos de calor, essenciais para estimar evapotranspiração, estresse hídrico e variações microclimáticas. No entanto, sua resolução espacial muitas vezes é inferior à dos sensores ópticos e requer correções atmosféricas precisas, além de integração com dados de campo para interpretação confiável.

Já o sensoriamento ativo com SAR e LiDAR amplia as possibilidades ao operar independentemente da luz solar e da cobertura de nuvens. O SAR é sensível à umidade do solo, rugosidade e estrutura da vegetação, mas apresenta complexidade de interpretação, sendo afetado por geometria de visada e interferências da vegetação. O LiDAR destaca-se pela capacidade de gerar modelos digitais de terreno e superfície de altíssima resolução, revelando a microtopografia que controla processos erosivos e hídricos; entretanto, seus custos operacionais e volume de dados são elevados.

A integração dessas tecnologias, apoiada por modelos físicos e algoritmos de aprendizado de máquina, potencializa a análise, superando limitações individuais e oferecendo uma visão multidimensional dos solos. Assim, a sinergia entre óptico, térmico, SAR e LiDAR consolida-se como abordagem robusta e adaptável, capaz de apoiar decisões estratégicas para manejo sustentável, mitigação de riscos e conservação em múltiplos contextos ambientais.

REFERÊNCIAS

Abdulraheem, M.I.; Zhang, W.; Li, S.; Moshayedi, A.J.; Farooque, A.A.; Hu, J. Avanço do Sensoriamento Remoto para Medições e Aplicações do Solo: Uma Revisão Abrangente. *Sustentabilidade* 2023, 15, 15444. <https://doi.org/10.3390/su152115444>

Anela Mkhwenkwana, Trylee Nyasha Matongera, Ciara Blaauw, Onisimo Mutanga. A critical review on the applications of Sentinel satellite datasets for soil moisture assessment in crop production, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, V. 141, 2025, 104647, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104647>.

Anneli M. Ågren, Johannes Larson, Siddhartho Shekhar Paul, Hjalmar Laudon, William Lidberg, Use of multiple LiDAR-derived digital terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape, *Geoderma*, V. 404, 2021, 115280, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115280>.

Chen, X.; Louw, A.S.; Yunus, A.P.; Alsulamy, S.; Umarhadi, D.A.; Bhuiyan, M.A.H.; Avtar, R. Rill Erosion and Drainage Development in Post-Landslide Settings Using UAV-LiDAR Data. *Soil Syst.* 2025, 9, 42. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020042>

Ben-Dor, E.; Chabirillat, S.; Dematté, J.A.M.; Taylor, G.R.; Hill, J.; Whiting, M.L.; Somme, S. Using Imaging Spectroscopy to study soil properties, *Remote Sensing of Environment*. V. 113, Supplement 1, 2009, 38-55, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.019>.

Ettalbi, M.; Baghdadi, N.; Garambois, P.-A.; Bazzi, H.; Ferreira, E.; Zribi, M. Soil Moisture Retrieval in Bare Agricultural Areas Using Sentinel-1 Images. *Remote Sens.* 2023, 15, 3502. <https://doi.org/10.3390/rs15143502>

Nimish, G.; Bharath, H.A.; Lalitha, A. Exploring temperature indices by deriving relationship between land surface temperature and urban landscape, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, V. 18, 2020, 100299, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100299>.

Heinemann, S.; Siegmann, B.; Thonfeld, F.; Muro, J.; Jedmowski, C.; Kemna, A.; Kraska, T.; Muller, O.; Schultz, J.; Udelhoven, T.; et al. Land Surface Temperature Retrieval for Agricultural Areas Using a Novel UAV Platform Equipped with a Thermal Infrared and Multispectral Sensor. *Remote Sens.* 2020, *12*, 1075. <https://doi.org/10.3390/rs12071075>

Jamali, F. S., Khaledi, S., & Razavian, M. T. (2021). Seasonal impact of urban parks on land surface temperature (LST) in semi-arid city of Tehran. *International Journal of Urban Sustainable Development*, *13*(2), 248–264. <https://doi.org/10.1080/19463138.2021.1872083>

Kaiser, E.A.; Rolim, S.B.A.; Grondona, A.E.B.; Hackmann, C.L.; de Marsillac Linn, R.; Käfer, P.S.; da Rocha, N.S.; Diaz, L.R. Spatiotemporal Influences of LULC Changes on Land Surface Temperature in Rapid Urbanization Area by Using Landsat-TM and TIRS Images. *Atmosphere* 2022, *13*, 460. <https://doi.org/10.3390/atmos13030460>

Lakra D, Pipil S, Srivastava PK, Singh SK, Gupta M and Prasad R (2025) Soil moisture retrieval over agricultural region through machine learning and sentinel 1 observations. *Front. Remote Sens.* *5*:1513620. doi: 10.3389/frsen.2024.1513620

Li, Mark A. Nearing, Mary H. Nichols, Viktor O. Polyakov, D. Phillip Guertin, Michelle L. Cavanaugh. The effects of DEM interpolation on quantifying soil surface roughness using terrestrial LiDAR, *Soil and Tillage Research*, V. 198, 2020, 104520, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104520>.

Mallick J, Alsubih M, Ahmed M, Almesfer MK and Kahla NB (2022). Assessing the Spatiotemporal Heterogeneity of Terrestrial Temperature as a Proxy to Microclimate and Its Relationship With Urban Hydro-Biophysical Parameters. *Front. Ecol. Evol.* *10*:878375. doi: 10.3389/fevo.2022.878375

Mardan, M.; Ahmadi, S. (2021). Soil moisture retrieval over agricultural fields through integration of synthetic aperture radar and optical images. *GIScience & Remote Sensing*, *58*(8), 1276–1299. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1974276>

Ranzhe, J.; Yuanyuan, S.; Xin, Z.; Nan L.; Xingming, Z.; Bingze, L.; Lei, Z.; Xiaokai, L.; Haiye, Y. Estimation of soil organic carbon by combining hyperspectral and radar remote sensing to reduce coupling effects of soil surface moisture and roughness, *Geoderma*, V. 444, 2024, 116874, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116874>.

Reiners, P.; Sobrino, J.; Kuenzer, C. Satellite-Derived Land Surface Temperature Dynamics in the Context of Global Change. A Review. *Remote Sens.* 2023, *15*, 1857. <https://doi.org/10.3390/rs15071857>

Roy, P.D.; Dey, S.; Bhogapurapu, N.; Chakraborty, S. Retrieval of Surface Soil Moisture at Field Scale Using Sentinel-1 SAR Data. *Sensors* 2025, *25*, 3065. <https://doi.org/10.3390/s25103065>

Shukla, T.; Tang, W.; Trettin, C.C.; Chen, G.; Chen, S.; Allan, C. Quantification of Microtopography in Natural Ecosystems Using Close-Range Remote Sensing. *Remote Sens.* 2023, *15*, 2387. <https://doi.org/10.3390/rs15092387>

Wang Z, Zhang C and Atkinson PM (2022) Combining SAR images with land cover products for rapid urban flood mapping. *Front. Environ. Sci.* 10:973192. doi: 10.3389/fenvs.2022.973192

Zhou, H., Ye, H., Wei, X., Zhang, Z., Wang, F., Qi, Y., et al. (2019). Comparative study on water extraction methods based on sentinel-1/2: A case study of small water body in Sri Lanka. *J. Univ. Chin. Acad. Sci.* 36 (6), 795–802.