

**USO DA GEOESTATÍSTICA NA AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DO SOLO:
ESTADO DA ARTE****USE OF GEOSTATISTICS IN THE ASSESSMENT OF SOIL QUALITY: STATE OF
THE ART****USO DE LA GEOESTADÍSTICA EN LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL
SUELO: ESTADO DEL ARTE**

Pedro Luan Ferreira da Silva¹
Miguel Aparecido Risson Coppo²
Antônio Marcos Azevedo Batista³
Jorge Wilian de Souza dos Santos⁴

Resumo: O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo da arte, abrangendo o período de 15 anos sobre o uso da geoestatística na avaliação da qualidade física do solo e verificar possíveis lacunas na literatura sobre esse tema. O estudo foi estruturado em três etapas: definição do tema, extração de informações e análise dos resultados. A busca foi realizada nas plataformas WoSCC e Portal de Periódicos CAPES, abrangendo publicações de 2010 a 2025. Utilizaram-se termos em inglês para ampliar o alcance em periódicos de alto impacto, com foco em artigos científicos. Os dados extraídos incluíram métricas como número de publicações, autores, citações e relação com os ODS da ONU. As análises foram organizadas em planilhas Excel, utilizando ferramentas estatísticas e geoestatísticas. A análise bibliográfica identificou 93 artigos científicos entre 2010 e 2025 sobre geoestatística, variabilidade espacial e qualidade física do solo, com destaque para o Brasil, responsável por 41,93% das publicações. A média anual foi de 4,3 estudos no período de 2015 a 2025, com pico em 2022. As ciências agrárias concentraram 71,42% dos trabalhos, destacando-se a ciência do solo. Os principais periódicos foram nacionais, como a *RBCS* e *Engenharia Agrícola*, e internacionais como *Catena* e *Geoderma*. A maioria dos estudos está alinhada aos ODS da ONU, especialmente o ODS-2 (fome zero e agricultura sustentável). A geoestatística tem se consolidado como ferramenta essencial na avaliação da qualidade física do solo, com destaque para o protagonismo brasileiro nas publicações. Sua aplicação contribui para o manejo sustentável e a otimização dos recursos naturais. Ainda assim, é necessária maior capacitação técnica para ampliar seu uso de forma crítica e eficaz.

Palavras-chave: Geoestatística. Variabilidade espacial. Propriedades físicas do solo.

Abstract: The objective of this study was to conduct a state-of-the-art review covering a 15-year period on the application of geostatistics in the assessment of soil physical quality, and to identify potential gaps in the literature on this topic. The study

¹ Universidade Estadual de Maringá. E-mail: pedroluanferreira@gmail.com

² Universidade Estadual de Maringá. E-mail: miguelcoppo@gmail.com

³ Universidade Estadual de Maringá. E-mail: aazevedobatista@gmail.com

⁴ Universidade Estadual de Maringá. E-mail: jorge_willian_123@hotmail.com

was structured into three stages: topic definition, data extraction, and results analysis. The literature search was performed using the WoSCC and CAPES Periodicals Portal databases, encompassing publications from 2010 to 2025. English-language search terms were employed to broaden the scope across high-impact journals, with a focus on peer-reviewed scientific articles. Extracted data included metrics such as number of publications, authorship, citation counts, and alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). Data analysis was organised using Excel spreadsheets, incorporating both statistical and geostatistical tools. The bibliometric analysis identified 93 scientific articles published between 2010 and 2025 addressing geostatistics, spatial variability, and soil physical quality, with Brazil accounting for 41.93% of the total output. The annual average was 4.3 studies between 2015 and 2025, with a peak in 2022. Agricultural sciences comprised 71.42% of the publications, with a strong emphasis on soil science. The leading journals included national outlets such as *Revista Brasileira de Ciência do Solo* and *Engenharia Agrícola*, as well as international journals such as *Catena* and *Geoderma*. Most studies were aligned with the United Nations SDGs, particularly SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture). Geostatistics has become firmly established as a key tool in the evaluation of soil physical quality, with notable leadership from Brazilian research. Its application supports sustainable land management and the optimisation of natural resources. Nevertheless, enhanced technical training remains necessary to expand its critical and effective use.

Key words: Geostatistics. Spatial variability. Soil physical Properties.

Resumen: El objetivo de este estudio fue realizar un análisis del estado del arte, abarcando un período de 15 años, sobre el uso de la geoestadística en la evaluación de la calidad física del suelo, así como identificar posibles vacíos en la literatura científica sobre esta temática. El estudio se estructuró en tres etapas: definición del tema, extracción de información y análisis de resultados. La búsqueda se llevó a cabo en las plataformas WoSCC y el Portal de Periódicos CAPES, considerando publicaciones entre 2010 y 2025. Se emplearon términos en inglés con el fin de ampliar el alcance en revistas de alto impacto, con énfasis en artículos científicos. Los datos extraídos incluyeron métricas como número de publicaciones, autores, citas y su vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Los análisis se organizaron en hojas de cálculo Excel, utilizando herramientas estadísticas y geoestadísticas. El análisis bibliográfico identificó 93 artículos científicos entre 2010 y 2025 relacionados con geoestadística, variabilidad espacial y calidad física del suelo, con destaque para Brasil, responsable del 41,93% de las publicaciones. El promedio anual fue de 4,3 estudios en el período de 2015 a 2025, con un pico en 2022. Las ciencias agrarias concentraron el 71,42% de los trabajos, destacándose la ciencia del suelo. Las principales revistas fueron nacionales, como la RBCS y *Engenharia Agrícola*, e internacionales como *Catena* y *Geoderma*. La mayoría de los estudios está alineada con los ODS de la ONU, especialmente el ODS 2 (Hambre Cero y Agricultura Sostenible). La geoestadística se ha consolidado como una herramienta esencial en la evaluación de la calidad física del suelo, con énfasis en el protagonismo brasileño en la producción científica. Su aplicación contribuye al manejo sostenible y a la optimización de los recursos naturales. No obstante, se requiere una mayor capacitación técnica para ampliar su uso de manera crítica y eficaz.

Palabras clave: Geoestadística. Variabilidad espacial. Propiedades físicas del suelo.

1 INTRODUÇÃO

A adoção de mecanismos de preparo intenso de solos agrícolas tem comprometido a qualidade em nível mundial. Estudos sobre a qualidade do solo cresceram exponencialmente na última década, com muitos grupos governamentais e não governamentais empenhados em desenvolver protocolos de avaliação (Karlen et al., 2019). Nesses protocolos tem-se adotado um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo como matéria orgânica, textura, capacidade de retenção de água e concentração de nutrientes, que são essenciais na avaliação de eficiência dos sistemas produtivos (Silveira & Kohmann, 2020), inclusive na correção de deficiências nutricionais nas plantas em várias partes do mundo (Behera et al., 2025).

As pesquisas têm focado em atributos que retratam o comportamento da água no do solo, a exemplo da curva de retenção de água no solo, sendo possível determinar a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente, a água disponível e a condutividade hidráulica saturada (Andrade et al., 2013), o índice de estabilidade de agregados (Doran & Parkin, 1994; Beutler et al., 2001), o índice S (Dexter, 2004), o potencial matricial e a umidade do solo no ponto de inflexão (Dexter et al., 2008), a distribuição de poros do solo por tamanho (Bouma, 1991), o intervalo hídrico do solo (Tormena et al., 1998), e aeração do solo (Reynolds et al., 2007).

Reunir todos esses atributos em um indicador global não é fácil. Estudos buscaram agregar todos os atributos do solo através de um único indicador de saúde do solo conhecido como *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) (Cherubin et al., 2016). O SMAF é um método quantitativo de avaliação da qualidade do solo e envolve a detecção da resposta do solo às decisões de manejo atuais ou recentes (Andrews et al., 2004). O SMAF usa um processo de três etapas para avaliar a qualidade física do solo (i) seleção do indicador físico, químico e biológico; (ii) interpretação do indicador através de curvas de pontuação não lineares; (iii) integração em um índice geral. O SMAF torna-se, portanto, um indicador de fundamental importância para a avaliação de sustentabilidade dos sistemas agrícolas atuais por meio da simplificação de inúmeros indicadores em um único parâmetro.

Dessa forma, associar indicadores de qualidade do solo, com técnicas de análise espacial, como a geoestatística, poderia simplificar os custos de produção, focando em manejar o solo nas zonas específicas conforme suas necessidades. Contudo, verifica-se que os estudos com variabilidade espacial de indicadores de qualidade do solo são escassos. O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo da arte, abrangendo o período de 15 anos sobre o uso da geoestatística na avaliação da qualidade física do solo e verificar possíveis lacunas na literatura sobre o tema.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O tipo de pesquisa adotado foi estado da arte e as etapas foram estruturadas da seguinte forma: i) identificação do tema e seleção da questão de pesquisa; ii) definição das informações a serem extraídas e iii) categorização, interpretação e discussão dos resultados. A busca foi realizada através das plataformas *Web of Science Core Collection* ([WoSCC], 2025) e o Portal de Periódicos Capes (2025), abrangendo o período de 1 de janeiro de 2010 a 1 de janeiro de 2025, 15 anos. Esse

período foi selecionado, visto que para o tipo de abordagem adotada, estado da arte, não há necessidade de fazer um cronograma histórico sobre o assunto abordado, mas sim compreender as pesquisas e atualizações em torno do tema (Câmara et al., 2019; Teixeira, 2023). Em relação as plataformas adotadas na pesquisa, a WoSCC apresenta dados bibliográficos completos, incluindo citações, periódicos, palavras-chave e outros recursos que podem ser utilizados em análises bibliométricas (Silva et al., 2025).

Utilizou-se a ferramenta de busca avançada do WoSCC, com os seguintes termos booleanos: TS= (soil physical quality AND geostatistics AND spatial variability). Optou-se por usar palavras-chave na língua inglesa para permitir um maior alcance de busca em periódicos de elevado fator de impacto, publicados em editoras como Elsevier, Wiley, Taylor and Francis, Nature, Sage e Springer-Nature. A base de pesquisa WoSCC é uma plataforma reconhecida pela curadoria de periódicos de elevado impacto e por atender padrões e indicadores de qualidade editorial reconhecidos mundialmente (Zhang et al., 2024). Na opção “*Document Type*” deu-se prioridade aos trabalhos publicados em revistas científicas, excluindo-se resumos, livros, capítulos de livros e circulares publicadas em eventos científicos. Utilizou-se termos de busca na língua inglesa de forma a evitar ambiguidades e duplicidade de artigos pesquisados.

O resultado de busca dos estudos foi analisado através das ferramentas disponíveis no WoSCC como área de publicação, número de publicações por ano, tipos de documentos, perfis de pesquisa (principais autores), áreas com maior número de citações, número de trabalhos inseridos nos objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), principais periódicos e principais países ou regiões onde os estudos foram publicados.

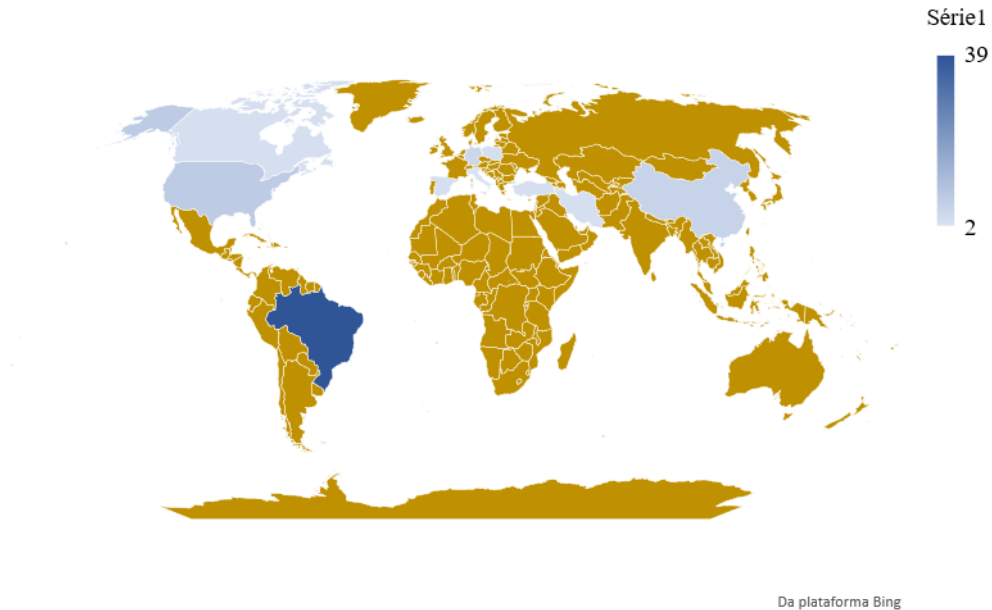
Os dados foram organizados em planilha Excel para a confecção dos gráficos e figuras quando necessário. Optou-se pelo uso do *Excel*, pois o mesmo apresenta uma linguagem gráfica básica, que exigem comandos simples e facilidade de armazenamento em hardware, além de permitir análises estatísticas descritiva e geoestatística utilizando as ferramentas: Análise de dados e Vesper (Oliveira et al., 2015). Para o período avaliado, de 2010 a 2025 foram detectados 102 trabalhos, contudo, ao utilizar o *Document Type*: “*Article*” selecionou-se 93 estudos.

3 RESULTADOS

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA MUNDIAL NOS ÚLTIMOS 15 ANOS

O Brasil é referência em publicações com geoestatística, variabilidade espacial e qualidade física do solo, conforme apresentado na Figura 1. Os países com estudos utilizando as palavras-chave, foco do estudo estão na cor azul, em amarelo são os países do mundo sem ocorrência de estudos no período de 2010 a 2025.

Figura 1 - Distribuição dos estudos sobre geoestatística, variabilidade espacial e qualidade física do solo no período de janeiro de 2010 a janeiro de 2025

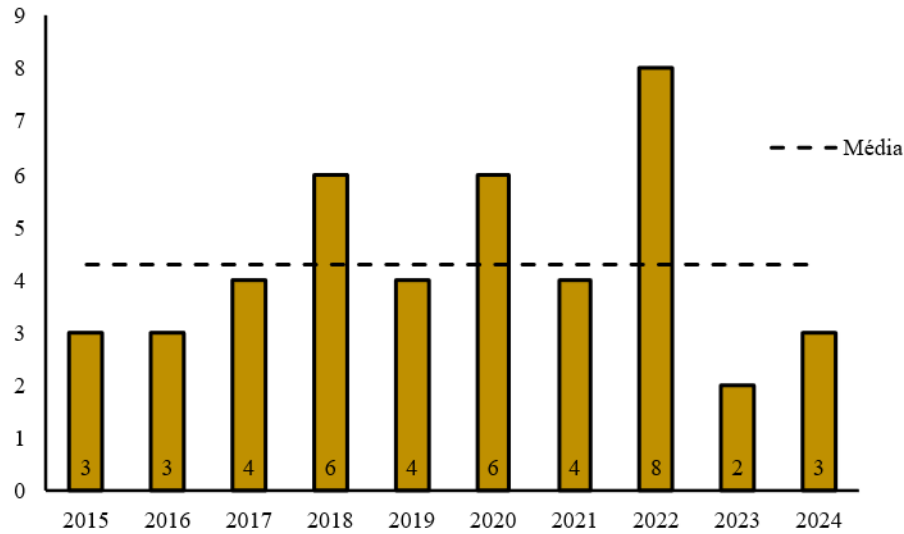


Fonte: *Web of Science Core Collection* (2025)

No Brasil, foram publicados 39 trabalhos nos últimos 15 anos (39 de 93; 41,93%), seguido por Estados Unidos (8 de 93; 8,60%), China (6 de 93; 6,45%), Alemanha (5 de 93; 5,37%), Irã, Turquia, Polônia, Espanha e Canadá com três estudos cada (3,22%), e a Itália com dois estudos (2,15%). Nota-se, portanto que o Brasil é pioneiro em publicações correlacionando geoestatística e qualidade física do solo, representando quase 50% dos estudos publicados nos últimos 15 anos. Na América do Sul, apenas o Brasil foi citado no período avaliado (2010-2025), contrastando com a América do Norte (2 países), Europa com 4 países e Ásia com 3 países citados, totalizando 10 países.

No período de 2015 a 2025, houve uma média de 4,3 estudos publicados por ano, com destaque para o ano de 2022 com oito estudos (Figura 2). Houve uma redução no número de publicação de estudos entre 2023 e 2024, um padrão que foi observado entre 2015 e 2017 com média de 3,0 artigos. Destaca-se que os dados apresentados na Figura 2 compreende o período de 10 anos e não 15 anos como na Figura 1. Essa ação foi realizada para facilitar a apresentação dos dados, totalizando a publicação de 43 estudos entre 2015 e 2024, ou seja, representa 46,23% dos 93 estudos analisados.

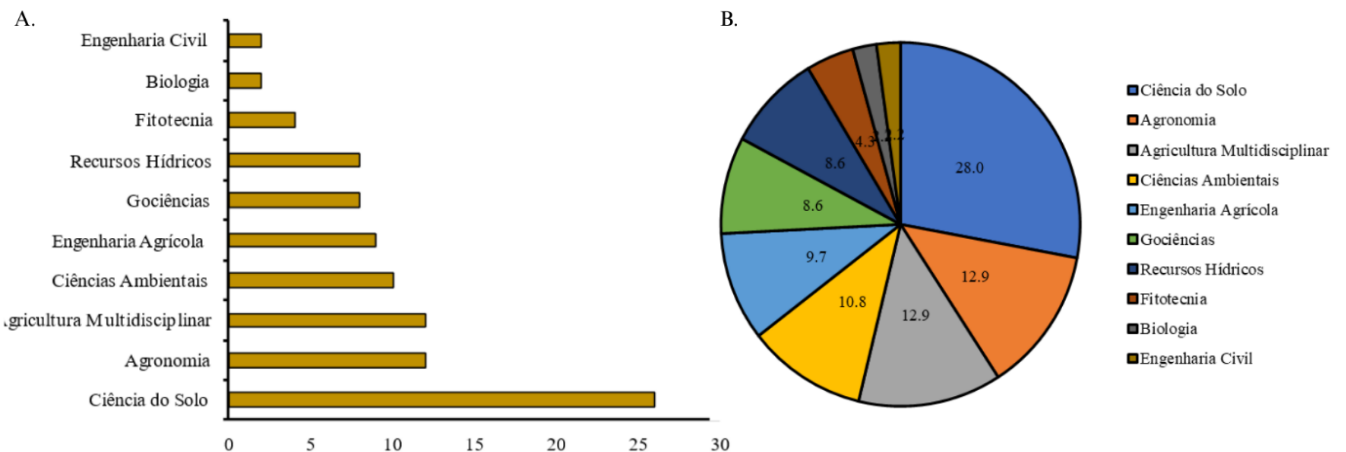
Figura 2 - Distribuição do número de publicações sobre geoestatística, variabilidade espacial e qualidade física do solo nos últimos dez anos (2015-2025)



Fonte: *Web of Science Core Collection* (2025)

O maior número de publicações para o período avaliado está inserido nas ciências agrárias, com destaque para a ciência do solo (26 de 93 estudos), agronomia com (12 de 93 estudos) e agricultura multidisciplinar com (12 de 93 estudos) (Figura 3A). Ao comparar a outras grandes áreas como biologia, ciências ambientais e engenharia, a maior parte dos estudos com geoestatística e qualidade física do solo é realizado nas ciências agrárias, somando 71,42% dos estudos entre os anos de 2010 a 2025 (Figura 3B). Recursos hídricos, geociências e engenharia agrícola apresentam resultados satisfatórios com 11,42; 11,42 e 12,85% dos estudos para o período avaliado, respectivamente. Os menores percentuais são observados para as áreas de fitotecnia (5,71%), biologia (2,85%) e engenharia civil (2,82%). Os menores percentuais indicam que essas áreas realizam pouco ou nenhum estudo com avaliação da qualidade física do solo, sendo um assunto pouco explorado ou que não faz parte das linhas de pesquisa em fitotecnia, biologia e engenharia civil.

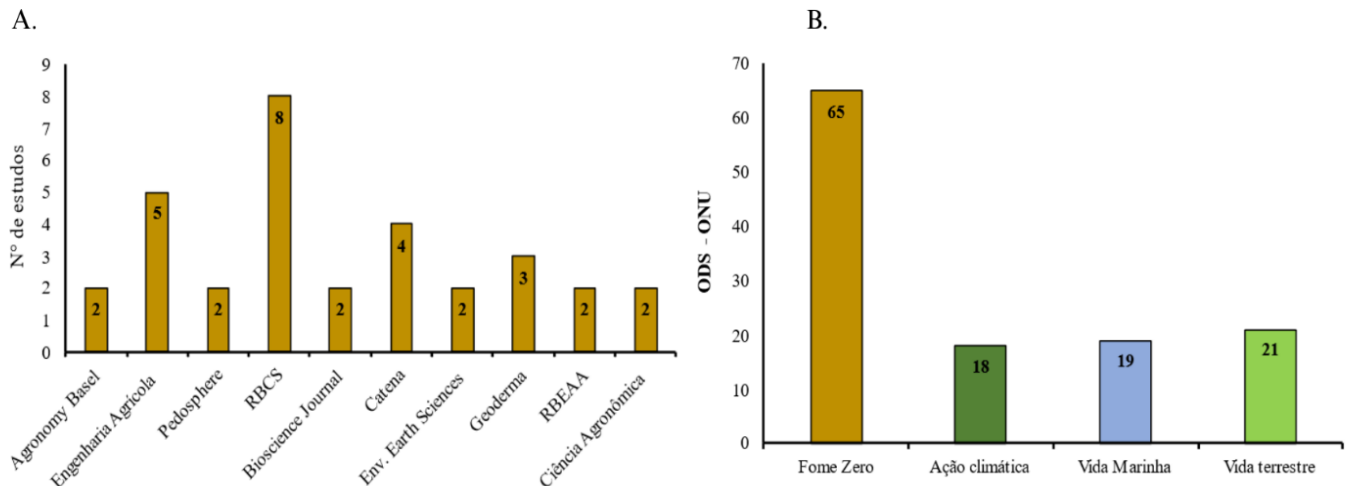
Figura 3 - Distribuição de publicações com os termos geoestatística, qualidade física do solo e variabilidade espacial, por área (A) e em percentual (B) nos últimos 15 anos (2015-2025)



Fonte: *Web of Science Core Collection* (2025).

Os periódicos brasileiros se destacam na publicação de artigos científicos com geoestatística e qualidade física do solo, destacando-se a Revista Brasileira de Ciência do Solo (RBCS) com oito estudos, Engenharia Agrícola com cinco estudos, seguidas por Bioscience Journal, Ciência Agronômica e Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (RBEAA) com dois estudos cada (Figura 4A). Em relação aos periódicos internacionais, dá-se destaque para a Catena com quatro estudos e a Geoderma com 3 estudos, as demais apresentaram dois estudos cada, conforme apresentado na Figura 2. Destaca-se que se priorizou a apresentação dos dez periódicos de maior destaque no período avaliado, somando 32 artigos (Figura 4A), os demais artigos foram publicados em outros periódicos, completando dessa forma os 93 estudos.

Figura 4 - Distribuição de publicações por periódico (A) e inserção nos objetivos do desenvolvimento sustentável (B) com os termos geoestatística, qualidade física do solo e variabilidade espacial nos últimos 15 anos (2015-2025)



Fonte: *Web of Science Core Collection* (2025)

Em relação à inserção aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), verifica-se que dos 93 estudos analisados 65 se enquadram no ODS-2 (fome zero e agricultura sustentável), 21 estudos alinhados ao ODS-15 (vida terrestre), 14 estudos ao ODS-14 (vida na água) e 18 estudos ao ODS-13 (ação contra a mudança global do clima). Destaca-se que um ou mais estudos dos 93 estudos analisados compartilham os mesmos ODS ou ODS diferentes, a exemplo de fome zero e mudança do clima por meio da agricultura regenerativa e agricultura de baixo carbono, por isso o somatório dos valores médios apresentados na Figura 4B ultrapassaria os 93 estudos levantados.

4. DISCUSSÃO

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA MUNDIAL NOS ÚLTIMOS 15 ANOS

O Brasil é referência mundial em estudos sobre geoestatística e qualidade

física do solo (Figura 1), neste hall destaca-se Siqueira et al. (2010) com 84 citações na *Web of Science* (Tabela 1), ao estudar as relações entre uso e forma do relevo na predição da variabilidade de atributos físico e na produtividade de laranja em Latossolo distrófico. Os autores constataram que o relevo côncavo apresenta maior aptidão para o movimento de água no perfil do solo e favorece os atributos de produtividade dos frutos, por outro lado, o relevo linear tende a favorecer a formação de macroagregados do solo (> 4,00 mm) e rendimento da cultura.

A compreensão da análise de resposta da cultura ao relevo por meio da geoestatística contribui para a delimitação de zonas de manejo, além de direcionar a implantação de pomares nas áreas de melhor aptidão para a cultura. No manejo da cultura, os mapas de distribuição espacial gerados por meio da geoestatística podem ser usados como estratégia para o direcionamento específico da correção de deficiência nutricional de macro e micronutrientes (Behera et al., 2025), alinhado à redução de custos de produção. A geoestatística pode ser utilizada como ferramenta de avaliação do estado de degradação do solo, a exemplo de Marchetti et al. (2012) em solos na Itália central, utilizando a matéria orgânica do solo como indicador chave. O trabalho é um dos mais citados no período avaliado de 15 anos, acumulando 101 citações de 2010 a 2025 (Tabela 1). Eles constataram que de 250 pontos avaliados por meio de krigagem e interpolação espacial, 87% apresentaram baixo teor de matéria orgânica do solo relacionado à textura, indicando degradação da estrutura do solo.

Tabela 1 - Estudos com maior número de citações para o período de 15 anos, de 2010 a 2025 com os termos geoestatística, qualidade física do solo e variabilidade espacial

Autoria	Título do estudo publicado	Citações
Usowicz & Lipiec (2017)	Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil	126
Marchetti et al. (2012)	Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy	101
Siqueira et al. (2010)	The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes	84
Fu et al. (2011)	Using Moran's I and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus-application plots	80
Steffens & Buddenbaum (2013)	Laboratory imaging spectroscopy of a stagnic Luvisol profile - High resolution soil characterisation, classification and mapping of elemental concentrations	78

Fonte: *Web of Science Core Collection* (2025)

O estudo com maior número de citações (126), avaliou a variabilidade espacial de atributos do solo e rendimento de cereais em solos arenosos (Usowicz & Lipiec, 2017) (Tabela 1). Os estudos dele constatou que existe um padrão de espacialidade bem definido entre atributos do solo como água disponível, carbono orgânico do solo e capacidade de troca catiônica, sendo imprescindível para o manejo sustentável do solo, principalmente diante da escassez de recursos terrestres e suprimentos em escala global (Usowicz & Lipiec, 2017). É importante destacar que apesar da RBCS apresentar o maior número de publicações em estudos sobre geoestatística (Figura 4A), os mais citados foram publicados em revistas internacionais (Tabela 1), destacando-se dois na *Geoderma*, um na *Pedosphere*, *STR* e *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, respectivamente.

Nota-se que os estudos divulgados em revistas internacionais apresentam maior visibilidade e maior probabilidade de reprodução e obtenção de citações e co-

citações. O aumento do impacto dos estudos com geoestatística e atributos físicos do solo se deve ao fato da inovação tecnológica que vem ocorrendo no campo. Nos anos 90 a geoestatística já era utilizada como uma ferramenta prática na ciência do solo (Goovaerts, 1999) e hoje tem sido utilizada na gestão e planejamento de fazendas e na orientação de práticas de manejo apropriadas como cultivo mínimo, aplicação variável de fertilizantes, medidas hortiflorestais e mapas interpolados de variáveis do solo (Bangroo et al., 2021).

O aumento do número de publicações com geoestatística por grandes produtores de alimentos como Brasil, China e Estados Unidos (Figura 1), mais precisamente na área de agricultura (Figura 3B), demonstra a importância dessa ferramenta na busca de sistemas de produção sustentáveis, eficientes e ao mesmo tempo com redução de custos. Rodrigues et al. (2020) destacam o papel fundamental da geoestatística na revolução 4.0 da agricultura, principalmente por meio dos mapas de variabilidade espacial de solos, na amostragem de solo, no manejo de plantas daninhas, na análise multivariada de dados, em análise exploratórias e modelagem espacial, em mapas de zona de manejo e de características do solo.

A utilização da geoestatística mostrou-se como uma ferramenta economicamente viável e socialmente aceitável em estudos de mapeamento para a remediação de solos em áreas urbanas (Milillo et al., 2012). Amostragem de solo, uso de satélite e GPS, sensores de alta tecnologia, análise sofisticada das relações entre eles, uso de tratores e semeadores conectados a dados de quantidade de sementes, fertilizantes e pesticidas usam a geoestatística como ferramenta para prever valores entre pontos amostrais ou de aplicação com alta precisão (Oliver, 2013). Em período de mudanças climáticas acentuadas, a geoestatística tem surgido como ferramenta de redução da fome e produção sustentável (ODS-2) e ação contra mudança global do clima (ODS-13), como apresentado na Figura 4B.

De um total de 93 estudos, 65 se enquadraram em práticas de agricultura sustentável e 18 em ações contra a mudança global do clima (Figura 4B), destacando-se o uso da geoestatística no mapeamento do teor e estoque de carbono orgânico do solo em solos da Dinamarca de 0 a 100 cm de profundidade (Adhikari et al., 2014). Os autores constataram que fatores como precipitação, uso da terra, tipo de solo, umidade, elevação, índice de umidade e de planura de fundo de vale influenciam consideravelmente a distribuição de COS, resultado este obtido através do mapeamento digital do solo. A geoestatística também se mostrou útil no mapeamento de zonas de manejo específico para solos sob agricultura sustentável em ambientes áridos do Egito (Yousif et al., 2024).

No quesito ação ambiental, Sanad et al. (2025) constataram, por meio da análise geoestatística, pontos críticos especiais de contaminação do solo com metais pesados em áreas de aterro sanitário e de agricultura intensiva, servindo como suporte para medidas de remediação e gestão sustentável de solos agrícolas. Por outro lado, o uso da técnica foi essencial para o estudo de distribuição espacial e avaliação de risco de arsênio e nitrato em águas subterrâneas do Curdistão, no Irã (Solgi & Jalili, 2021), além de indicar que 23% de algumas classes de solos agrícolas na Nigéria apresentavam índice de contaminação relativa acumulada > 75% (Kianguebene-Koussingounina et al., 2023). Além de facilitar o planejamento agrícola (Zihad et al., 2023) e avaliar as relações existente entre plantas daninhas e as propriedades do solo (Dehsorkhi et al., 2025), a geoestatística tem mostrado grande potencial nos estudos relacionados às questões ambientais, principalmente

em questões relacionadas à contaminação de solos e recursos hídrico, armazenamento de carbono, eficiência no uso da água e produção sustentável.

4.2 GEOESTATÍSTICA NOS ESTUDOS SOBRE INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

A elevada variabilidade dos solos dificulta a determinação de critérios eficientes para o manejo de diferentes culturas agrícolas. Dessa forma, os meios que facilitam à compreensão da magnitude da variabilidade tornam-se essenciais para estabelecer práticas de manejo mais adequadas, que promovam o aumento da produtividade agrícola e da otimização de recursos. A utilização de ferramentas geoestatísticas para mapeamento de indicadores de qualidade do solo podem ampliar a compreensão da variabilidade espacial das propriedades físicas. Sağlam et al. (2015) demonstraram essa abordagem na análise da variabilidade espacial horizontal e vertical da qualidade do solo em sistemas de cultivos de arroz, utilizando o método da análise de componentes principais (PCA) para identificar e dimensionar as múltiplas variáveis estudadas, além da krigagem ordinária para a modelagem espacial e geração de mapas.

Abordagens geoestatísticas permitiram identificar a influência dos manejos orgânico e agroflorestal sobre a qualidade do solo. Silva (2019) observou diferenças na qualidade física do solo entre esses sistemas, especialmente quanto à densidade do solo, densidade de partículas e porosidade, destacando a necessidade de práticas de preparo que promovam a homogeneização da estrutura do solo. Em comparações com sistemas de cultivo convencional e de plantio direto, a densidade do solo tende a apresentar diferentes correlações espaciais com outras propriedades físicas do solo (Schaffrath et al., 2008). O mapeamento geoestatístico amplia essa visualização para a identificação de pontos críticos de resistência do solo à penetração e de umidade em diferentes sistemas de cultivo, possibilitando a definição de estratégias que possam reduzir custo manejo e operação (Silva et al., 2023).

Dentre as diversas propriedades indicativas da qualidade física do solo, inúmeros trabalhos que utilizaram a construção de semivariogramas demonstraram que o modelo esférico tende a apresentar melhor desempenho na estimativa da distribuição espacial, seguido pelo modelo exponencial (Gomes et al., 2007; Souza et al., 2010; Vitória et al., 2012). O uso da geoestatística não se limita apenas ao estabelecimento de zonas de manejo para o aumento da produtividade agrícola em agricultura de precisão, mas também pode desempenhar grande importância na preservação da qualidade do solo e na gestão sustentável dos recursos hídricos (Masoud et al., 2018). Por sua vez, Schaffrath et al. (2015) identificaram correlação espacial entre atributos físicos do solo e a ocorrência de plantas daninhas em sistemas de plantio direto e preparo convencional. O plantio direto favoreceu maior diversidade de espécies, enquanto o preparo convencional resultou em maior biomassa. Os sistemas de manejo influenciam significativamente a estrutura espacial dessas variáveis.

O leque de aplicações da geoestatística pode ser ainda mais amplo, abrangendo análises que contribuem para a compreensão integrada entre propriedades do solo e respostas da vegetação, com implicações diretas para o manejo sustentável. No entanto, alguns programas geoestatísticos ajustam automaticamente um semivariograma, independentemente da quantidade de dados disponíveis, sem considerar se há pontos suficientes para representar

adequadamente a continuidade espacial. Tampouco indicam ao usuário se, de fato, existe continuidade espacial nas variáveis de estudo, cabendo a este uma interpretação crítica do gráfico gerado. Uma das grandes lacunas dentro do campo da geoestatística, principalmente na ciência agrônômica, está relacionada ao conhecimento deficitário de seus conceitos fundamentais, evidenciando a necessidade de ampliar a capacitação e a difusão da fundamentação geoestatística. Dessa forma, seu uso poderá ser muito mais eficiente e aproveitado por profissionais e pesquisadores da área.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta revisão sistemática revelaram o protagonismo do Brasil na produção científica envolvendo geoestatística, variabilidade espacial e qualidade física do solo, com destaque para o elevado número de publicações e a predominância de periódicos nacionais entre os mais representativos. A maior parte dos estudos concentra-se nas ciências agrárias, especialmente na ciência do solo, refletindo a consolidação dessa temática como eixo estratégico para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis. A análise temporal demonstrou tendência de crescimento no número de publicações entre 2010 e 2025, com picos em anos recentes, o que sugere um fortalecimento da relevância do tema diante das demandas globais por práticas agrícolas resilientes e alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS-2 (fome zero e agricultura sustentável) e o ODS-13 (ação contra a mudança do clima).

Além disso, constatou-se que a geoestatística vem sendo amplamente empregada como ferramenta de suporte à tomada de decisão no manejo do solo e da água, no monitoramento ambiental e na delimitação de zonas de manejo agrícola, contribuindo significativamente para a otimização de recursos naturais e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Apesar do avanço, ainda existem lacunas no domínio conceitual da geoestatística por parte de muitos profissionais da área, o que limita seu potencial de aplicação. Portanto, é fundamental investir na capacitação técnica e na disseminação do conhecimento básico e aplicado em geoestatística, promovendo sua incorporação crítica e eficaz nas pesquisas científicas e práticas agrícolas. O fortalecimento dessa abordagem, aliado ao uso de tecnologias emergentes, tende a expandir suas aplicações e impactos positivos nos diversos sistemas de produção e conservação dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS

- Adhikari, K., Hartemink, A. E., Minasny, B., Bou Kheir, R., Greve, M. B., & Greve, M. H. (2014). Digital Mapping of Soil Organic Carbon Contents and Stocks in Denmark. *PLoS ONE*, 9(8), e105519.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105519>
- Andrade, R. S., Stone, L. F., & Godoy, S. G. (2013). Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(9), 932–937.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000900004>

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Bangroo, S. A., Sofi, J. A., Bhat, M. I., Mir, S. A., Mubarak, T., & Bashir, O. (2021). Quantifying spatial variability of soil properties in apple orchards of Kashmir, India, using geospatial techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 2047. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08457-6>
- Behera, S. K., Shukla, A. K., Kumar, R., Mishra, R., Shukla, V., Yadav, H., & Datta, S. P. (2025). Geostatistics-based understanding of temporal changes in spatial distribution of soil fertility parameters in an intensively cultivated area of North India. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02388-x>
- Beutler, A. N., Silva, M. L. N., Curi, N., Ferreira, M. M., Cruz, J. C., & Pereira Filho, I. A. (2001). Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25(1), 167–177. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100018>
- Bouma, J. (1991). Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, 46(1), 1–37. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60577-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60577-5)
- Câmara, F. A., Fernandes, J. P. M., Mooreira, C. S., & Telles, M. A. D. (2019). O estado da arte como metodologia utilizada para projeto de pesquisa dos egressos de instituições de acolhimento. *Caderno Humanidades em Perspectivas*, 6(3), 133-144.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. R., Cerri, C. E. P., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE*, 11(3), e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Dehsorkhi, A. N., Ghanbari, S. A., Makarian, H., & Asgharipour, M. R. (2025). Spatial relationship of weeds with soil properties in wheat field using geostatistical methods. *Crop Protection*, 189(1): 107055. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.107055>
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality. Part I. Theory, effects, density and organic matter and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3–4), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Dexter, A. R., Czyż, E. A., Richard, G., & Reszkowska, A. (2008). A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143(3–4), 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.010>
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Org.), SSSA Special

- Publications (1^o ed., V. 35, p. 1–21). Wiley.
<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- Fu, W., Zhao, K., Zhang, C., & Tunney, H. (2011). Using Moran's I and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus-application plots. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(5), 785–798. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000422>
- Gomes, N. M., Silva, A. M. D., Mello, C. R. D., Faria, M. A. D., & Oliveira, P. M. D. (2007). Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(1), 435-443. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300003>
- Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89(1-2), 1-45. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0)
- Karlen, D. L., Veum, K. S., Sudduth, K. A., Obrycki, J. F., & Nunes, M. R. (2019). Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research*, 195(1), 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>
- Kianguebene-Koussingounina, C. E., Olajide-Kayode, J. O., Oyediran, I. A., Kazapoe, R. W., Amuah, E. E. Y., Naziru, B., Umaru, A. O., & Addai, M. O. (2023). Geostatistical assessment of soils in Ibadan, Southwest Nigeria: Focus on agricultural lands. *Environmental and Sustainability Indicators*, 19(1), 100287. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100287>
- Marchetti, A., Piccini, C., Francaviglia, R., & Mabit, L. (2012). Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy. *Pedosphere*, 22(2), 230–242. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60010-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60010-1)
- Masoud, A. A., El-Horiny, M. M., Atwia, M. G., Gemail, K. S., & Koike, K. (2018). Assessment of groundwater and soil quality degradation using multivariate and geostatistical analyses, Dakhla Oasis, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 142, 64–81. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.009>
- Milillo, T. M., Sinha, G., & Gardella JR., J. A. (2012). Use of geostatistics for remediation planning to transcend urban political boundaries. *Environmental Pollution*, 170(1):52-62. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.06.006>
- Oliveira, R. P., Grego, C. R., & Brandão, Z. N. (2015). *Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper*. Embrapa.
- Oliver, M. A. (2013). Precision agriculture and geostatistics: How to manage agriculture more exactly. *Significance*, 10(2), 17-22. DOI:10.1111/j.1740-9713.2013.00646.x
- Portal de Periódicos. CAPES. (2025). *Portal de Periódicos da CAPES*. Recuperado

15 de maio de 2026, de <https://www.periodicos.capes.gov.br/>

- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of soil indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4): 252-263.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Rodrigues, M. S., Castrignanò, A., Belmonte, A., Silva, K. A. D., & Lessa, B. F. D. T. (2020). Geostatistics and its potential in Agriculture 4.0. *Revista Ciência Agronômica*, 51(5). <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200095>
- Sağlam, M., Dengiz, O., & Saygın, F. (2015). Assessment of horizontal and vertical variabilities of soil quality using multivariate statistics and geostatistical methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(13), 1677–1697.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1045596>
- Sanad, H., Moussadek, R., Mouhir, L., Lhaj, M. O., Zahidi, K., Dakak, H., Manhou, K., & Zouahri, A. (2025). Ecological and human health hazards evaluation of toxic metal contamination in agricultural lands using multi-index and geostatistical techniques across the Mnasra area of Morocco's Gharb Plain Region. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18(1). 100724.
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100724>
- Schaffrath, V. R., Gonçalves, A. C. A., Sousa, A. J., & Tormena, C. A. (2015). Spatial correlation between physical properties of soil and weeds in two management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(1), 279-288.
<https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150568>
- Schaffrath, V. R., Tormena, C. A., Fidalski, J., & Gonçalves, A. C. A. (2008). Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(4), 1369-1377. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400001>
- Silva, A. L., Mariano, D. C., Ebling, Â. A., Oliveira Neto, C. F., Viégas, I. J. M., & Okumura, R. S. (2023). Geoestatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 16(1), 1–16.
<https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n1e9417>
- Silva, C. J. da. (2019). *Variabilidade espacial de indicadores de qualidade do solo em uma área sob cultivo orgânico* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro]. RIMA- Repositório de Múltiplos Acervos da UFRRJ. <https://rima.ufrj.br/jspui/handle/20.500.14407/13293>
- Silva, L. F. V. da., Pedron, F. A., Santos, J. C. B. dos., Pinto, A. A., & Azevedo, A. C. de. (2025). A scientometric review of research on saprolite in Brazil from 1990 to 2022. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 29(1), e280446.
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n1e280446>
- Silveira, M. L., & Kohmann, M. M. (2020). Maintaining soil fertility and health for

- sustainable pastures. In M. Rouquette Jr., V. Olson-Corriher, & G. E. Aiken (Eds.), *Management strategies for sustainable cattle production in southern pastures* (pp. 35–58). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814474-9.00003-7>
- Siqueira, D. S., Marques Júnior, J., & Pereira, G. T. (2010). The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma*, 155(1–2), 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.024>
- Solgi, E., & Jalili, M. R. (2021). Zoning and human health risk assessment of arsenic and nitrate contamination in groundwater of agricultural areas of the twenty-two village with geostatistics (Case study: Chahardoli Plain of Qorveh, Kurdistan Province, Iran). *Agricultural Water Management*, 255(2), 107023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107023>
- Souza, Z. M. D., Marques Júnior, J., & Pereira, G. T. (2010). Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, 40(1), 48-56. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000243>
- Steffens, M., & Buddenbaum, H. (2013). Laboratory imaging spectroscopy of a stagnic Luvisol profile—High resolution soil characterisation, classification and mapping of elemental concentrations. *Geoderma*, 195–196, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.011>
- Teixeira, P. M. M. (2023). Estados da arte: aparando arestas na compreensão dessa modalidade de pesquisa. *Ciência & Educação*, 29(1), e23034. <https://doi.org/10.1590/1516-731320230034>
- Tormena, C. A., Silva, A. P., & Libardi, P. L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(4), 573–581. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>
- Usovicz, B., & Lipiec, J. (2017). Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil. *Soil and Tillage Research*, 174(1): 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.015>
- Vitória, E. L. D., Fernandes, H. C., Teixeira, M. M., Cecon, P. R., & Lacerda, E. D. G. (2012). Correlação linear e espacial entre produtividade de *Brachiaria brizantha*, densidade do solo e porosidade total em função do sistema de manejo do solo. *Engenharia Agrícola*, 32(5), 909–919. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000500010>
- Web of Science Core Collection*. (2025). Clarivate Analytics. Available at <https://www.webofscience.com>
- Yousif, I. A. H., Sayed, A. S. A., Abdelsamie, E. A., Ahmed, A. A. R. S., Saeed, M., Mohamed, E. S., Rebouh, N. Y., & Shokr, M. S. (2024). Efficiency of geostatistical approach for mapping and modeling soil site-specific management

zones for sustainable agriculture management in drylands. *Agronomy*, 14(11), 2681. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112681>

Zhang, B., Jia, Y., Fan, H., Guo, C., Fu, J., Li, S., Li, M., Liu, B., & Ma, R. (2024). Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degradation & Development*, 35(10), 3256–3273. <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>

Zihad, M. N., Khan, R., Hasan, A. H., Siddique, M. A. B., Bodrud-Doza, M., & Islam, A. R. M. T. (2023). Natural and anthropogenic contributions to the elemental compositions and subsequent ecological consequences of a transboundary river's sediments. *Environmental Research*, 234(1): 116509. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116509>