

MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS COM DADOS HERDADOS: UMA ABORDAGEM FUNDAMENTADA NA TEORIA GERAL DOS SISTEMAS

João Guilherme Machado Barbosa¹

Danilo Cardoso Ferreira²

RESUMO

A carência de informações pedológicas detalhadas em vastos territórios, como o brasileiro, impõe desafios significativos ao planejamento e gestão do uso da terra. O Mapeamento Digital de Solos (MDS), que utiliza covariáveis ambientais e dados herdados (informações pré-existentes), surge como uma alternativa metodológica viável. Contudo, sua aplicação carece de uma fundamentação epistemológica robusta. O objetivo central deste trabalho é demonstrar como a Teoria Geral dos Sistemas (TGS), de Ludwig von Bertalanffy, oferece a base epistemológica e conceitual necessária para abordar, de forma crítica e integrada, o mapeamento digital de solos utilizando dados herdados. A metodologia consistiu em uma revisão bibliográfica teórico-conceitual, estruturada para estabelecer as conexões entre os textos fundadores da abordagem sistêmica, sua apropriação na Geografia Física (pela Teoria do Geossistema) e a literatura técnica do MDS (como o modelo SCORPAN). Como resultados, demonstra-se que a TGS não só justifica a abordagem integrada solo-paisagem (inerente à fórmula de Jenny), mas oferece o arcabouço fundamental para a integração de dados herdados, permitindo reinterpretar a incerteza não como um erro, mas como uma propriedade intrínseca do sistema de conhecimento. Conclui-se que o MDS, quando fundamentado sistemicamente, transcende a aplicação puramente técnica e se consolida como uma práxis geográfica essencial para o ordenamento territorial consciente.

Palavras-chave: Mapeamento Digital de Solos; Teoria Geral dos Sistemas; Geossistema; Dados Herdados; Epistemologia da Geografia.

ABSTRACT

The scarcity of detailed pedological information in vast territories, such as Brazil, poses significant challenges to land use planning and management. Digital Soil Mapping (DSM), which utilizes environmental covariates and legacy data (pre-existing information), emerges as a viable methodological alternative. However, its application often lacks a robust epistemological foundation. This paper's central objective is to demonstrate how Ludwig von Bertalanffy's General Systems Theory (GST) provides the necessary epistemological and conceptual basis to critically and integrally approach digital soil mapping using legacy data. The methodology consisted of a theoretical-conceptual bibliographic review, structured to establish the connections between the founding texts of the systems approach, its appropriation in Physical Geography (through Geosystem Theory), and the technical literature on DSM (such as the SCORPAN model). As results, it is shown that GST not only justifies the integrated soil-landscape approach (inherent in Jenny's formula) but also offers the fundamental framework for integrating legacy data, allowing uncertainty to be reinterpreted not as an error, but as an intrinsic property of the knowledge system. It is concluded that DSM, when systemically grounded, transcends purely technical application and is consolidated as an essential geographical praxis for conscious territorial planning.

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – danilo.cardoso@edu.mt.gov.br

Keywords: Digital Soil Mapping; General Systems Theory; Geosystem; Legacy Data; Epistemology of Geography.

INTRODUÇÃO

Os solos, concebidos como corpos naturais independentes resultantes da interação entre clima, relevo, organismos, material de origem e tempo (Jenny, 1941), demandam compreensão aprofundada e cartografia precisa para o planejamento e uso adequado da terra (Hudson, 1992; Silva, 2016). No entanto, o mapeamento pedológico, especialmente em vastas extensões territoriais como a brasileira, enfrenta desafios significativos, incluindo limites transicionais na paisagem e a escassez de levantamentos detalhados, frequentemente limitada por questões orçamentárias e de pessoal qualificado (IBGE, 2015; Giasson; Inda-Junior; Nascimento, 2006).

Essa carência de informação pedológica detalhada impacta diretamente a capacidade de resposta a desafios complexos, desde a formulação de políticas públicas, estratégias de desenvolvimento equilibrado com o ambiente até a aplicação de táticas de modelagem agrícola sustentável e a localização de equipamentos urbanos e industriais. Frequentemente, o conhecimento disponível advém de mapas em pequena escala, constituindo um legado de "dados herdados" valiosos, porém insuficientes para as demandas contemporâneas por informação espacial detalhada (Santos et al., 2013).

Para lidar com essa complexidade inerente às ciências do solo e superar os desafios do mapeamento convencional, é fundamental adotar um referencial teórico robusto. A visão sistêmica, estruturada por Ludwig von Bertalanffy através da Teoria Geral dos Sistemas (TGS), oferece este alicerce conceitual. A TGS permite que o solo seja compreendido como um sistema aberto e dinâmico na paisagem (Nakashima et al., 2017; Soil Survey Staff, 2017), uma perspectiva que, na verdade, já é inerente a sua compreensão conceitual e presente na fórmula de Jenny (1941), que expressa o solo como função de fatores interagentes.

Nesse contexto, o Mapeamento Digital de Solos (MDS) surge como uma abordagem metodológica que operacionaliza a visão sistêmica, utilizando modelos quantitativos e covariáveis ambientais para inferir a distribuição espacial de propriedades e classes de solo (Lagacherie e Mcbratney, 2006). O MDS, fundamentado em modelos como o SCORPAN (Mcbratney et al., 2003), alinha-se à TGS ao modelar as complexas relações solo-paisagem, potencializado pelos avanços em Sensoriamento Remoto, SIG e capacidade computacional (Vicente e Perez Filho, 2003; Kempenet al., 2012).

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.carpes@edu.mt.gov.br

A consolidação de um arcabouço teórico robusto é fundamental para o avanço de qualquer disciplina científica. No campo da pedologia e, mais especificamente, do Mapeamento Digital de Solos (MDS), a adoção de um paradigma sistêmico representa uma mudança fundamental, que vai além de uma escolha metodológica para se tornar uma necessidade epistemológica. Argumenta-se aqui que a concepção do solo como um sistema aberto e dinâmico, em oposição a um corpo estático definido por fatores fixos, é um pré-requisito para mapeá-lo de forma eficaz, especialmente ao lidar com a heterogeneidade intrínseca dos dados herdados.

Esta investigação busca demonstrar como a concepção sistêmica oferece a base epistemológica e conceitual necessária para abordar de forma crítica e integrada, o mapeamento digital de solos utilizando dados herdados (informações pré-existentes). Espera-se com esta revisão, evidenciar a robustez da abordagem sistêmica para a interpretação e modelagem da informação pedológica espacial, contribuindo para uma compreensão geográfica mais aprofundada.

METODOLOGIA

A construção deste referencial teórico-conceitual foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica, com o intuito de estabelecer as conexões epistemológicas entre a Teoria Geral dos Sistemas (TGS) e o Mapeamento Digital de Solos (MDS). A pesquisa foi estruturada em três eixos articulados: I) o resgate dos textos fundadores da abordagem sistêmica; II) a análise da apropriação e do debate crítico dessa abordagem no pensamento geográfico brasileiro, bem como em trabalhos contemporâneos que discutem os paradigmas da Geografia Física; e III) o levantamento da literatura técnica sobre o MDS que operacionaliza, explícita ou implicitamente, a visão sistêmica.

Para a operacionalização desta revisão, foram consultadas as principais bases de dados científicas, como o Portal de Periódicos da CAPES, Scielo, Google Scholar (Google Acadêmico) e Web of Science, visando garantir a abrangência nacional e internacional dos trabalhos. A estratégia de busca combinou termos em português e inglês, alinhados aos três eixos da pesquisa, incluindo: "Teoria Geral dos Sistemas" (Eixo I); "Geossistemas", "Epistemologia da Geografia Física", "Jean Tricart" e "Georges Bertrand" (Eixo II); e "Mapeamento Digital de Solos", "Digital Soil Mapping", "Relação Solo-Paisagem", "Dados

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cantoso@edu.mt.gov.br

Herdados" (Legacy Data) e "SCORPAN" (Eixo III). Como suporte na triagem, síntese e identificação de conexões temáticas na literatura, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial especializadas em pesquisa acadêmica (*Elicit* e *Scispace*).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Da Teoria Geral dos Sistemas a Teoria do Geossistema

A ciência do século XX testemunhou uma profunda reorientação em seu pensamento, marcada pela transição de um paradigma atomístico e reducionista para uma perspectiva holística e contextual, formalizada na Teoria Geral dos Sistemas (TGS) (Uhlmann, 2002). O paradigma cartesiano clássico, que acreditava ser possível compreender o todo a partir do estudo isolado de suas partes, mostrou-se insuficiente para lidar com a crescente complexidade dos problemas tecnológicos, sociais e biológicos. A ciência moderna passou a não mais isolar os fenômenos em contextos restritos, mas a abrir-se para o exame das interações e a investigar setores cada vez maiores da natureza.

O biólogo Ludwig von Bertalanffy emergiu como a figura central na sistematização dessa nova abordagem em 1930, postulando que a compreensão de fenômenos complexos, como os organismos vivos, exigia o estudo das interações e das relações entre os componentes, e não apenas dos componentes em si (Bertalanffy, 1973). Conforme Uhlmann (2002), essa nova concepção inverte a lógica tradicional: em vez de explicar o todo a partir das partes, o pensamento sistêmico busca explicar as partes em função do todo ao qual pertencem. Essa mudança não representa uma preferência filosófica, mas uma resposta necessária à complexidade dos sistemas que emergiram na tecnologia, na sociedade e na própria ciência, desde a área de negócios ao planejamento urbano e ambiental.

Essa visão holística, que entende o todo como mais do que a soma das partes, foi o alicerce que abriu espaço para uma interpretação mais complexa dos sistemas naturais e suas interações. A transição dos princípios abstratos da TGS para sua aplicação concreta na ciência geográfica é operacionalizada através do conceito de geossistema. O paradigma do geossistema, introduzido por Viktor Sochava na URSS nos anos 1960, marcou uma renovação crucial na ciência da paisagem soviética.

Baseada na Teoria Geral dos Sistemas, essa abordagem superou os modelos estáticos e deterministas que a precederam, como o de Solntsev, fornecendo uma visão dinâmica, interativa

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cavallero@edu.mt.gov.br

e globalizante das paisagens (Frolova, 2019). Este conceito foi desenvolvido especificamente para fornecer uma ferramenta de análise integrada da interface sociedade-natureza, oferecendo uma perspectiva mais adequada para a Geografia do que outros conceitos. Uma análise aprofundada das suas origens e das diferentes escolas de pensamento revela um arcabouço teórico rico e multifacetado.

O conceito de Geossistema foi cunhado para preencher uma lacuna deixada pelo conceito de Ecossistema, proposto por Arthur Tansley (1935), que considerou a relação dos organismos vivos com seu entorno (Rodriguez; da Silva, 2018). Enquanto o ecossistema, oriundo da Ecologia, foca primariamente na dinâmica biológica e nos fluxos de energia através da comunidade de organismos vivos, o geossistema foi concebido como um conceito eminentemente espacial e geográfico (Oliveira; Neto, 2020; Rodriguez; Silva; Cavalcanti, 2022).

Segundo Rodriguez; da Silva (2018, p. 91), “a interpretação sistêmica do conceito de paisagem ou espaço natural, é um salto cognitivo”, introduzido por Viktor Borisovich Sochava em 1961, o conceito de Geossistema é produto da interpretação sistêmica de entidades que foram estudadas, classificadas e sistematizadas ao longo de 50 anos por geógrafos alemães, russos e soviéticos. O desenvolvimento desta escola foi fortemente impulsionado pelas necessidades práticas da antiga União Soviética de realizar inventários de recursos e planejamento territorial em vastas áreas. Isso resultou em uma forte ênfase na coleta de dados empíricos de longo prazo, através de uma rede de estações de pesquisa permanentes, e no desenvolvimento de modelos quantitativos para entender os "regimes naturais" (Rodriguez; da Silva, 2018; Cavalcanti et al., 2024).

Sochava definiu explicitamente os geossistemas como sistemas abertos onde os componentes individuais da natureza estão em conexão sistêmica uns com os outros e, como uma totalidade definida, interagem com a esfera cósmica e com a sociedade humana (Frolova, 2019). Sua abordagem introduziu o tempo e a dinâmica na pesquisa da paisagem, oferecendo ferramentas operacionais aprimoradas para a avaliação, classificação e planejamento espacial, apesar de a prática soviética inicial ter historicamente relegado a dimensão humana ao segundo plano em favor de uma análise tecnocrática de paisagens naturais. Essa fundação teórica e metodológica provou ser útil para estudos territoriais e ambientais integrativos em diversos contextos globais, sendo adaptada na Europa e na América Latina.

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cavalcanti@edu.mt.gov.br

No Ocidente, foi o geógrafo francês Jean Tricart quem primeiro operacionalizou de forma sistemática a visão da TGS, utilizando o conceito para analisar a paisagem como uma interação dinâmica entre sistemas naturais e transformações antrópicas. Na análise de Barros e Soares (2024, p. 210), Tricart é apresentado como aquele que “introduziu uma renovação metodológica ao considerar que o estudo da paisagem deve partir da relação entre os sistemas naturais e suas transformações antrópicas, mediadas por processos multiescalares e interativos”.

Segundo Tricart (1977) “a análise da paisagem deve se fazer pela consideração simultânea dos seus elementos constitutivos e de suas inter-relações funcionais” (Tricart, 1977, p. 87). Essa apropriação também é discutida por Santos (2023), que contextualizam o papel de Tricart como articulador entre os pensadores russos (como Sotchava e Vernadsky) e os métodos aplicados no Ocidente. Para os autores, “Tricart inaugura uma nova racionalidade científica na Geografia, ao conciliar a tradição francesa com os aportes sistêmicos russos e com a exigência de práticas integradoras do espaço geográfico” (Santos, 2023 p. 208).

A contribuição seminal que forneceu uma metodologia prática e amplamente adotada veio de Georges Bertrand em meados do século XX. Bertrand propôs uma taxonomia hierárquica e têmporo-espacial para a análise da paisagem, criando um sistema de unidades aninhadas que permitiu uma abordagem cartográfica e taxonômica. Essa hierarquia é composta por: (I) Geótopo: A menor unidade homogênea, o complexo biótopo-biocenose (por exemplo, uma faceta específica de uma encosta). (II) Geofácies: Uma unidade fisionomicamente homogênea que representa uma fase específica na evolução do geossistema (por exemplo, uma mancha de vegetação particular naquela faceta). (III) Geossistema: A unidade central da análise, definida como uma combinação dinâmica de potencial ecológico, exploração biológica e ação antrópica, unificada por um "sistema de evolução" comum em uma escala de alguns a centenas de quilômetros quadrados. (IV) Unidades Superiores: Região natural, domínio e zona, que representam escalas de análise progressivamente mais amplas (Bertrand, 1968; Reis Junior, 2007; Barros; Soares, 2024).

Posteriormente, Bertrand, em colaboração com geógrafos soviéticos, evoluiu seu pensamento para o modelo tripolar GTP (Geossistema-Território-Paisagem). O autor tratou o geossistema como um nível hierárquico com uma escala operacional ideal para o planejamento territorial, e sua conexão com a escola soviética é confirmada pela colaboração direta com N. Beroutchachvili na publicação "*Le géosystème ou 'système territorial naturel'*" em 1978.

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cavallero@edu.mt.gov.br

Contudo, Bertrand e Claude Bertrand reconheceram que, apesar de o geossistema permitir a análise do funcionamento biofísico de um espaço geográfico "com seu grau de antropização", ele deve ser combinado com outros arcabouços para abordar os complexos aspectos socioculturais e históricos (Frolova, 2019).

O modelo GTP refinou a abordagem ao enquadrar explicitamente o Geossistema como a fonte natural (o substrato biofísico), o Território como o recurso socioeconômico (o espaço apropriado e gerenciado pela sociedade) e a Paisagem como a identidade cultural (o espaço percebido e simbolizado) (Barros; Soares, 2024; Bertrand, 1968; Cavalcanti, 2013).

O conceito de Geossistema trata a matriz abiótica — composto por relevo, geologia, clima, hidrologia e solo — e a ação humana não como um pano de fundo, mas como componentes integrais e coiguais do sistema (Cavalcanti, 2013). Essa distinção é fundamental para a ciência do solo, pois o solo é, por natureza, um corpo de interface, um produto complexo de interações bióticas, abióticas e, frequentemente, antrópicas, tornando o geossistema um enquadramento analítico mais completo e apropriado.

O conceito de geossistema, embora fundamental para a síntese teórica da Geografia Física, é relativamente novo na literatura brasileira. A entrada do termo no país ocorreu inicialmente em 1972, por meio da tradução do texto "*Paisagem e Geografia Física Global*" de Georges Bertrand. Inicialmente, essa proposta se referia a unidades naturais de uma ordem de área específica (entre 100 a 10.000 km²), uma definição diferente da concepção original de Sochava que não limitava a escala espacial. Apenas posteriormente, o Brasil teve acesso a alguns escritos originais de Viktor Sochava, sendo estes publicados no país entre 1977 e 1978 (Cavalcanti et al., 2024).

A partir da influência francesa sobre a geografia brasileira, sobretudo através dos textos de Bertrand e Tricart, os primeiros geógrafos brasileiros incorporaram em suas metodologias a análise integrada da paisagem, a partir da concepção geossistêmica, podendo ser encontradas nas obras de Ab'Sáber, Jurandyr Ross, Antônio Christofolletti, Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, Francisco Mendonça e Marcos José Nogueira de Souza (Barros; Soares, 2024).

Mais recentemente, a partir da Teoria do Geossistema, desenvolveu-se no Brasil a Geoecologia de Paisagens, derivada de Sochava, que foi introduzida por José Manuel Mateo Rodríguez e disseminada por Edson Vicente da Silva (Cacau), e consolidada por trabalhos

nacionais de destaque como os de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro (2001) e Helmut Troppmair (2000), salienta Cavalcanti et al. (2024).

No Brasil, paralelamente, o geógrafo Antonio Christofolletti teve papel decisivo na introdução e adaptação da abordagem sistêmica ao contexto geográfico nacional. Em sua obra *Geomorfologia* (1974), ainda que não assuma formalmente a TGS, já antecipa o princípio sistêmico ao afirmar que “os elementos não se comportam de forma isolada, mas como componentes de totalidades em constante transformação” (Christofolletti, 1974, p. 11). Este pensamento se desenvolve mais profundamente em “As Perspectivas dos Estudos Geográficos (1985)”, quando afirma que “a compreensão integrada dos processos físicos e humanos exige o abandono de modelos fragmentários, abrindo espaço para uma análise sistêmica do espaço geográfico” (Christofolletti, 1985, p. 43).

A maturidade de sua proposta aparece em *Modelagem de Sistemas Ambientais* (1999), onde define os sistemas ambientais como estruturas abertas, com fluxos constantes de energia, matéria e informação, destacando que “a modelagem, mais que representação, é uma forma de pensar e organizar a complexidade dos ambientes naturais” (Christofolletti, 1999, p. 21). Sua obra tornou-se referência para geógrafos físicos que buscaram articular dados, processos e estruturas de forma integrada, especialmente nos estudos sobre relevo, solos, erosão e uso da terra.

Antonio Carlos Vitte, ao analisar a epistemologia da Geografia Física, sublinha que a introdução da TGS não se deu sem resistência. Muitos geógrafos brasileiros associaram o modelo sistêmico a um pensamento mecanicista, em desacordo com os compromissos críticos da Geografia. No entanto, Vitte (2007, p. 115) argumenta que “a leitura feita por Christofolletti é uma apropriação crítica, voltada à reorganização epistemológica da Geografia Física no Brasil, com base na complexidade e na interdisciplinaridade”.

Dessa forma, observa-se que a Teoria Geral dos Sistemas, ao ser progressivamente assimilada pela Geografia Física, deixou de ser apenas um instrumental teórico-metodológico para consolidar-se como um marco de reestruturação epistemológica do campo. Essa assimilação permitiu a superação de abordagens fragmentárias, favorecendo uma compreensão mais profunda e relacional dos fenômenos naturais e suas dinâmicas.

A centralidade do conceito de sistema trouxe novas possibilidades para a leitura da paisagem, não apenas como cenário, mas como processo em constante transformação,

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cavalcanti@edu.mt.gov.br

resultante de múltiplas interações entre fatores físicos, biológicos e sociais. Essa virada metodológica, além de renovar os modos de investigação, reposicionou a Geografia Física em um contexto científico mais crítico, dialógico e interdisciplinar. Com isso, abrem-se caminhos para discutir, no próximo tópico, como essa base epistemológica influencia diretamente a produção de métodos e práticas na análise e modelagem dos sistemas ambientais.

Todavia, a abordagem sistêmica foi por vezes criticada por resultar em um método naturalista, às margens das ciências sociais, tratando o humano mais como antrópico do que social. O presente trabalho responde a essa crítica ao utilizar dados herdados, pois trata o conhecimento pedológico pré-existente como um produto social e histórico, integrando a dimensão humana na própria construção do modelo.

Mapeamento Digital de Solos: A operacionalização da abordagem sistêmica

Aplicando a compreensão de sistemas, o solo deixa de ser visto apenas como um corpo estático a ser classificado. Ele é compreendido como um sistema aberto, dinâmico e complexo, central nas interações da paisagem (Nakashima et al., 2017). O solo recebe inputs (energia solar, água, matéria orgânica, sedimentos) do sistema paisagístico e gera outputs (gases, nutrientes, água, material erodido), enquanto processos internos (intemperismo, humificação, translocação) transformam matéria e energia, criando os horizontes diagnósticos (Soil Survey Staff, 2017).

A fórmula de Jenny (1941), $S = f(cl, o, r, p, t)$, que fundamenta a pedologia, é inerentemente sistêmica, ao expressar o solo como função de fatores interagentes. Os fatores de formação do solo (clima, organismos, relevo, material parental, tempo) não são apenas variáveis independentes, mas componentes interconectados de um sistema maior – a paisagem – operando em diferentes escalas hierárquicas (Nakashima et al., 2017). A distribuição espacial dos solos, portanto, é uma propriedade emergente desse sistema paisagístico integrado.

O Mapeamento Digital de Solos (MDS), definido por Lagacherie e McBratney (2006) como a criação de sistemas de informação espaciais sobre solos baseados em observações e variáveis ambientais, surge como uma resposta aos desafios do mapeamento convencional e se alinha as bases conceituais da TGS. O MDS operacionaliza a visão sistêmica ao utilizar modelos quantitativos para inferir a distribuição espacial de classes e propriedades do solo. A relação solo-paisagem é a base para o MDS, que pode ser expresso através do modelo

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cunha@edu.mt.gov.br

SCORPAN, proposto por McBratney et al. (2003), que estende a fórmula de Jenny ao incorporar explicitamente o conhecimento prévio do solo (S) e a posição espacial (n) como fatores preditivos. O MDS pode ser visto como um sistema de modelagem (SILVA CHAGAS et al., 2017):

- **Inputs:** Dados de observação de solos (muitas vezes, dados herdados de levantamentos convencionais ou pontos esparsos), covariáveis ambientais representando os fatores de formação (derivadas de sensoriamento remoto, modelos digitais de elevação, dados climáticos), conhecimento pedológico.
- **Processos:** Pré-processamento e harmonização de dados, extração de métricas das covariáveis, treinamento de modelos estatísticos ou de aprendizado de máquina - árvores de decisão, redes neurais – predição espacial em ambiente SIG.
- **Outputs:** Mapas digitais de classes ou propriedades do solo, mapas de incerteza associada às predições.
- **Feedback:** Validação dos mapas com dados independentes, retroalimentando o processo para refinar modelos ou seleção de inputs.

O avanço tecnológico em sensoriamento remoto, SIG e capacidade computacional tornou essa abordagem quantitativa e sistêmica viável, permitindo modelar as complexas relações solo-paisagem de forma mais eficiente do que os métodos convencionais (Vicente e Perez Filho, 2003; Kempen et al., 2012).

Integrando dados herdados sob a perspectiva da Teoria Geral dos Sistemas

A aplicação do MDS frequentemente depende de dados herdados, especialmente em regiões com histórico de mapeamento convencional, carente de novos levantamentos detalhados (Kempen et al., 2012). A TGS oferece um quadro conceitual fundamental para lidar com esses dados pois compreende a heterogeneidade dos dados herdados, como um registro histórico de diferentes observações do sistema solo-paisagem ao longo do tempo. Além disso, a TGS busca uma visão holística, ao invés de descartar dados antigos, o desafio é analisar a origem e confiabilidade dos dados e integrá-los a uma análise multiescalar. Modelos de MDS podem ser estruturados para incorporar informações de diferentes níveis hierárquicos da paisagem, considerando a dimensão espacial e temporal (Bertalanffy, 1973; Vale, 2012; Lopes et al., 2015).

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cavallero@edu.mt.gov.br

A conceitualização da incerteza é uma das principais contribuições da TGS ao lidar com dados herdados. A TGS postula que a complexidade inerente aos sistemas abertos e a incompletude de nossas observações (especialmente dados históricos e esparsos) levam a uma incerteza irreduzível (Nakashima et al., 2017). No MDS com dados herdados, a incerteza não é apenas um erro estatístico do modelo, mas uma propriedade fundamental do sistema de conhecimento que estamos construindo. Portanto, mapear e analisar a distribuição espacial da incerteza torna-se tão importante quanto mapear as propriedades do solo em si, pois informa sobre a confiabilidade das previsões e onde o conhecimento sobre o sistema solo-paisagem é mais frágil. (Bertalanffy, 1973; Christoforetti, 1999; Vale, 2012).

CONCLUSÃO

A Teoria Geral dos Sistemas pode subsidiar conceitualmente pesquisas em Mapeamento Digital de Solos dentro da Geografia, especialmente quando se lida com a realidade dos dados herdados. Ao resgatar a visão holística e relacional, ela permite transcender a aplicação puramente técnica de algoritmos e dados, inserindo o MDS numa compreensão mais profunda do solo como um sistema aberto, dinâmico e integrado à paisagem. A TGS, e sua apropriação geográfica através da Teoria do Geossistema, pode justificar teoricamente a abordagem integrada solo-paisagem, fundamentada no modelo SCORPAN e habilitada pelo MDS.

Para tal, é necessário estruturar a metodologia de forma sistêmica, considerando inputs (incluindo a natureza histórica e heterogênea dos dados herdados), processos de modelagem e outputs (mapas de propriedades e de incerteza). Desenvolver e aplicar métodos críticos para a integração de dados herdados, reconhecendo-os não como meros pontos de observação, mas como um produto social e histórico, e tratando suas limitações e potencialidades sob uma ótica sistêmica. Fundamentalmente, é preciso interpretar os resultados não apenas como mapas, mas como representações espaciais das interações complexas dentro de um sistema. Nesta visão, a avaliação explícita da confiabilidade (incerteza) deixa de ser um mero controle de erro estatístico e passa a ser uma propriedade fundamental do sistema de conhecimento que está sendo modelado.

Em suma, a TGS oferece subsídios conceituais para que o Mapeamento Digital de Solos com dados herdados contribua significativamente para o avanço do conhecimento geográfico, auxiliando na superação dos desafios de mapeamento em vastos territórios como o Brasil. Essa

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT

1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br

2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – daniilo.cantoso@edu.mt.gov.br

abordagem promove uma gestão territorial mais consciente, baseada na compreensão sistêmica dos solos como um recurso natural e não renovável. Em última análise, ao fundamentar uma técnica em uma teoria robusta, este trabalho reforça o papel de uma Geografia Física que, superando a dicotomia histórica, operacionaliza a análise integrada e atua em função das demandas sociais, contribuindo com soluções concretas para os complexos problemas da relação sociedade-natureza.

REFERÊNCIAS

BARROS, Luana; SOARES, Larícia. Caminhos metodológicos para a Geografia Física: um olhar sobre as obras de Jean Tricart e Georges Bertrand: **Revista Pantaneira**, v. 23, p. 207–221, 28 out. 2024.

BERTALANFFY, L. von. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1973.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. Tradução: Olga Cruz. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, [S. l.], v. 8, p. 249-272, 2004. DOI: 10.5380/raega.v8i0.3389. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/3389>. Acesso em: 5 jun. 2025.

BERTRAND, Georges. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. **Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, v. 39, n. 3, p. 249–272, 1968.

CAVALCANTI, Lucas Costa De Souza. **Da Descrição de Áreas à Teoria dos Geossistemas: Uma Abordagem Epistemológica sobre Sínteses Naturalistas**. Tese—Recife: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2013.

CAVALCANTI, Lucas *et al.* Oito lições sobre geossistemas. **Revista da ANPEGE**, v. 20, n. 42, p. 1–31, 12 set. 2024.

CHRISTOFOLETTI, A. As perspectivas dos estudos geográficos. In: CHRISTOFOLETTI, A. **Perspectivas da Geografia**. 2. ed. São Paulo: DIFEL, 1985.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Blucher, 1974.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Blucher, 1999.

FROLOVA, Marina. From the Russian/Soviet landscape concept to the geosystem approach to integrative environmental studies in an international context. **Landscape Ecology**, v. 34, n. 7, p. 1485–1502, jul. 2019.

GIASSON, E.; INDA JUNIOR, A. V.; NASCIMENTO, P. C. do. Estimativa do benefício econômico potencial de dois levantamentos de solos no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 478–486, mar./abr. 2006.

Resultado de projeto de pesquisa, vinculado ao programa de Doutorado do PPGGeo-Unemat/MT
1- Doutorando em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Mato Grosso – barbosa.joao@unemat.br
2- Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas, Professor da educação básica – SEDUC/MT – danielo.cantoso@edu.mt.gov.br

HUDSON, B. D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 836–841, 1992.

IBGE. **Manuais técnicos em Geociências: Manual Técnico de Pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology**. New York: McGraw-Hill, 1941.

KEMPEN, Bas. et al. Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 6, p. 2097–2115, 2012.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. **Developments in Soil Science**, v. 31, p. 3–22, 2006.

LOPES, L. G. N.; SILVA, A. G.; GOULART, A. C. O. A teoria geral do sistema e suas aplicações nas ciências naturais. **Natureza On Line**, Espírito Santo, v. 13, p. 1–5, 2015.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1, p. 3–52, 2003.

NAKASHIMA, M. R.; ALVES, G. B.; BARREIROS, A. M.; QUEIROZ NETO, J. P. Dos solos à paisagem: uma discussão teórico-metodológica. **Revista da ANPEGE**, v. 13, p. 30–52, 2017.

NEVES, C. E.; MACHADO, G.; HIRATA, C. A.; STIPP, N. A. F. A importância dos geossistemas na pesquisa geográfica: uma análise a partir da correlação com o ecossistema. **Sociedade & Natureza**, v. 26, p. 271–285, 2014.

OLIVEIRA, Cristina Silva; NETO, Roberto Marques. GÊNESE DA TEORIA DOS GEOSSISTEMAS: UMA DISCUSSÃO COMPARATIVA DAS ESCOLAS RUSSO-SOVIÉTICA E FRANCESA. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 47, n. 1, p. 06, 29 abr. 2020.

REIS JUNIOR, Dante Flávio da Costa. HISTÓRIA DE UM PENSAMENTO GEOGRÁFICO: GEORGES BERTRAND. v. 32, n. 2, p. 363–390, 2007.

RODRÍGUEZ, José Manuel Mateo; DA SILVA, Edson Vicente. **Planejamento e gestão ambiental: subsídios da geocologia das paisagens e da teoria geossistêmica**. Edições UFC, 2018.

RODRIGUEZ, José Manuel Mateo; SILVA, Edson Vicente da; CAVALCANTI, Agostinho de Paula Brito. **Geocologia das paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental**. 6. ed. Fortaleza, CE: Imprensa Universitária - Universidade Federal do Ceará, 2022.

SANTOS, H. G. dos et al. Distribuição espacial dos níveis de levantamento de solos no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais** [...]. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

SANTOS, H. G. dos et al. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 1995.

SANTOS, Kesia Rodrigues Dos. A teoria sistêmica e a geografia: um olhar para os precursores de Jean Tricart. **Anais do XV ENANPEGE...** Campina Grande: Realize Editora, 2023. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/94467>>. Acesso em: 03/11/2025.

SILVA, S. H. G. **Digital soil mapping**: evaluation of sampling systems for soil surveys and refinement of soil maps at lower cost using legacy data. 2016. Tese (Doutorado em Ciência dos Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Survey Manual**. Washington, D.C.: USDA, 2017. (Handbook Nº 19).

TRICART, J. **O homem e a terra**: princípios de Geografia Física. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1977.

UHLMANN, Günter Wilhelm. **Teoria Geral dos Sistemas: do atomismo ao sistemismo (Uma abordagem sintética das principais vertentes contemporâneas desta Proto-Teoria)**. São Paulo: Centro Interdisciplinar de Semiótica da Cultura e da Mídia, 2002. 84p.

VALE, C. C. Teoria Geral do Sistema: histórico e correlações com a Geografia e o estudo da paisagem. **Entre-Lugar**, v. 6, p. 85–108, 2012.

VICENTE, L. E.; PEREZ FILHO, A. Abordagem sistêmica e Geografia. **Geografia**, Rio Claro, v. 28, n. 3, p. 323–344, 2003.

VITTE, A. C. Epistemologia da Geografia Física: entre a tradição e a complexidade. **Geosp – Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 22, p. 103–123, 2007.