

Um Sistema Especialista para Identificação de Horizontes Diagnósticos de Solo

Edson L. de Almeida², João Pedro Lorangeira¹,
Marcos Bacis Ceddia¹, Ana Carolina de S. Ferreira¹,
Mayara Omai², Lucas da S. Oliveira²,
Jorge Soares², Diego Brandão²

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ – Brasil

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
Rio de Janeiro – RJ – Brasil

ceddia@ufrrj.br, diego.brandao@cefet-rj.br

Abstract. *The identification of diagnostic horizons is fundamental for soil classification. This work presents an expert system for the automatic identification of these horizons based on the rules of the Brazilian Soil Classification System (SiBCS). The system formalizes classification rules using morphological and chemical soil attributes, such as thickness, color, structure, texture, and organic carbon content. Its architecture integrates a knowledge base and an inference engine to analyze soil profiles and generate diagnoses consistent with the SiBCS criteria. A functional evaluation was conducted using 18 tests based on soil profiles described in the pedological literature. The results indicate that, in the evaluated scenarios, the system correctly reproduces the expected classifications.*

Resumo. *A identificação de horizontes diagnósticos é fundamental para a classificação pedológica. Este trabalho apresenta um sistema especialista para identificação automática desses horizontes com base nas regras do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). O sistema formaliza regras de classificação com base em atributos morfológicos e químicos do solo, como espessura, cor, estrutura, textura e teor de carbono orgânico. Sua arquitetura integra uma base de conhecimento e um motor de inferência para analisar perfis de solo e gerar diagnósticos conforme o SiBCS. A avaliação funcional foi realizada com 18 testes, com base em perfis descritos na literatura pedológica. Os resultados indicam que, nos cenários avaliados, o sistema reproduz corretamente as classificações esperadas.*

1. Introdução

O solo desempenha papel fundamental na manutenção dos ecossistemas, na produção agrícola e na regulação de ciclos biogeoquímicos. A preservação e o manejo sustentável desse recurso estão diretamente relacionados a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas [Nations 2017].

Uma forma central de compreender o solo é por meio de sua classificação sistêmica. Apesar do conceito de solo assumir significados distintos em diferentes áreas

do conhecimento [Lepsch 2011], sua classificação organiza o conhecimento pedológico e orienta o uso adequado das terras. No Brasil, esse processo é realizado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) [Gonçalves dos Santos et al. 2018], que utiliza a presença ou ausência de horizontes diagnósticos no perfil do solo como elemento central da classificação. Esses horizontes são identificados a partir da análise de atributos morfológicos observados em campo, como cor, textura, estrutura e consistência, complementados por análises laboratoriais. A identificação desses horizontes constitui uma etapa crítica da classificação pedológica. Entretanto, a aplicação das regras do SiBCS pode ser complexa, pois envolve a interpretação de múltiplos atributos obtidos em campo e em laboratório. Em muitos casos, o pedólogo realiza uma identificação preliminar em campo que posteriormente precisa ser confirmada por análises adicionais.

Nos últimos anos, abordagens computacionais têm sido utilizadas para apoiar a análise e a classificação de solos [Vaz et al. 2025]. Técnicas de inteligência artificial, mineração de dados e sistemas baseados em regras têm sido exploradas para apoiar especialistas na aplicação consistente de sistemas de classificação. Entre essas abordagens, os sistemas especialistas se destacam por sua capacidade de representar explicitamente o conhecimento dos especialistas por meio de regras de inferência.

Diante desse contexto, este trabalho investiga a seguinte questão de pesquisa: *é possível representar formalmente as regras utilizadas na identificação de horizontes diagnósticos do SiBCS em um sistema especialista capaz de apoiar a classificação automática desses horizontes a partir de atributos morfológicos observados em perfis de solo?*

Apesar dos avanços recentes em pedologia digital, grande parte das abordagens computacionais tem se concentrado na classificação taxonômica completa de solos ou na predição de propriedades do solo por meio de métodos estatísticos e de aprendizado de máquina. No entanto, há relativamente poucos estudos voltados à formalização computacional das regras empregadas na identificação de horizontes diagnósticos, etapa fundamental do processo de classificação pedológica.

Neste contexto, este trabalho apresenta um sistema especialista para a identificação automática de horizontes diagnósticos com base nas regras do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). A proposta formaliza computacionalmente essas regras em uma base de conhecimento estruturada e implementa um motor de inferência capaz de reproduzir parte do processo de decisão adotado por especialistas na análise de perfis de solo. O sistema foi avaliado por meio de um conjunto de testes com base em perfis descritos na literatura pedológica.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica. A Seção 3 discute trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve a metodologia proposta. A Seção 5 apresenta os resultados experimentais. Por fim, a Seção 6 apresenta considerações finais e propõe trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção apresenta os conceitos que fundamentam o desenvolvimento do sistema especialista proposto neste trabalho, abordando o perfil de solo, a classificação pedológica no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e a representação do conhecimento em sistemas especialistas.

2.1. Perfis de solo e classificação no SiBCS

Um perfil de solo corresponde a uma seção vertical do solo que expõe uma sequência de camadas aproximadamente paralelas à superfície terrestre, denominadas horizontes. Esses horizontes são formados ao longo do tempo por processos pedogenéticos, como intemperismo (processo de desagregação e decomposição das rochas na superfície terrestre), lixiviação (processo de retirada dos nutrientes do solo pela ação da água) e acúmulo de matéria orgânica [Lepsch 2011]. A análise dos perfis permite compreender a organização interna do solo e constitui a base para sua classificação.

Na descrição pedológica, distinguem-se horizontes morfológicos e diagnósticos. Os horizontes morfológicos são identificados em campo com base em atributos observáveis, como cor, textura, estrutura, consistência e espessura. Já os horizontes diagnósticos são definidos com base em critérios estabelecidos em sistemas taxonômicos de classificação e podem exigir análises laboratoriais para confirmar as propriedades físicas e químicas do solo. No Brasil, a classificação de solos é realizada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) [Gonçalves dos Santos et al. 2018], que organiza os solos em diferentes níveis taxonômicos. Nesse sistema, a presença ou ausência de determinados horizontes diagnósticos constitui um dos principais critérios para a definição das classes de solo. A identificação desses horizontes depende da avaliação conjunta de múltiplos atributos observados no perfil do solo, o que torna o processo de classificação relativamente complexo e sujeito à experiência do especialista.



Figura 1. Aspecto de um perfil de solo e verificação tátil de seus horizontes.
Fonte: [Lepsch 2011]

2.2. Sistemas especialistas e representação do conhecimento

O avanço das tecnologias digitais tem impulsionado o desenvolvimento de abordagens computacionais para apoiar a análise e a classificação de solos. Entre essas abordagens, destacam-se os métodos de aprendizado de máquina, a mineração de dados e os sistemas baseados em regras. No contexto da pedologia digital, tais ferramentas são utilizadas para apoiar atividades como o mapeamento digital de solos, a predição de propriedades do solo e a classificação automática de perfis pedológicos. Dentre essas abordagens, os sistemas especialistas se destacam por sua capacidade de representar explicitamente o

conhecimento de especialistas humanos. Sistemas especialistas são sistemas computacionais projetados para reproduzir o processo de tomada de decisão em domínios específicos. Em geral, são compostos por três componentes principais: a interface com o usuário, a base de conhecimento e o motor de inferência.

No contexto da classificação de solos, o conhecimento do pedólogo pode ser formalizado por meio de regras que relacionam atributos observados nos horizontes do perfil à identificação de horizontes diagnósticos. Uma forma comum de representar esse conhecimento é por meio de regras de inferência expressas em lógica formal. No domínio da classificação de horizontes do solo, pode-se definir o conjunto de horizontes morfológicos considerados pelo sistema especialista como:

$$D_{\text{morfológico}} = \{O, A, E, B, C, R\} \quad (1)$$

onde cada elemento representa um tipo de horizonte identificado em um perfil de solo. A partir desse conjunto podem ser definidos predicados que descrevem propriedades relevantes dos horizontes, como espessura, teor de carbono e posição no perfil.

Com base nesses predicados, é possível formalizar as regras diagnósticas utilizadas na classificação dos horizontes. Por exemplo, uma regra simplificada para identificação de um horizonte hístico pode ser expressa como:

$$\text{superficial}(x) \wedge [(\text{espessura}(x, 20) \wedge \text{carbono}(x, 80)) \vee (\text{espessura}(x, 10) \wedge \text{carbono}(x, 80) \wedge \text{contato}(x))] \\ \rightarrow \text{histico}(x)$$

Como as regras do SiBCS são bem definidas e documentadas, podem ser formalizadas como um conjunto de regras lógicas que compõem a base de conhecimento de um sistema especialista, permitindo automatizar parte do processo de identificação de horizontes diagnósticos.

3. Trabalhos Relacionados

Diversas abordagens computacionais têm sido propostas para apoiar a classificação de solos e a identificação de horizontes diagnósticos. Entre elas, destacam-se sistemas especialistas baseados em regras, métodos de raciocínio baseados em casos, técnicas estatísticas e abordagens baseadas em dados espectrais. Em geral, essas abordagens buscam automatizar parte da interpretação dos atributos morfológicos, físicos e químicos empregados nos sistemas taxonômicos de classificação de solos.

Sistemas especialistas baseados em regras constituem uma das abordagens mais tradicionais para representar o conhecimento pedológico. Um dos primeiros protótipos de sistema especialista para classificação de solos segundo a *Soil Taxonomy* utilizava árvores de decisão e regras heurísticas derivadas da literatura pedológica [Galbraith and Bryant 1998, Galbraith et al. 1998]. No contexto brasileiro, o sistema *SmartSolos Expert*, apresentado por Vaz et al. [Vaz et al. 2025], implementa as regras do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) e permite classificar perfis em múltiplos níveis taxonômicos, demonstrando que as chaves taxonômicas podem ser representadas computacionalmente por meio de regras organizadas hierarquicamente.

Outras abordagens computacionais também têm sido exploradas. Qiu e Li [Qiu and Li 2014] propuseram um sistema baseado em *case-based reasoning* (CBR) para identificar horizontes diagnósticos por meio da comparação com perfis previamente classificados. Já métodos baseados em dados espectrais têm sido utilizados para auxiliar na caracterização do solo. Rizzo et al. [Rizzo et al. 2014] investigaram o uso da espectroscopia Vis-NIR para classificação numérica de perfis de solo, enquanto Marques et al. [Marques et al. 2019] exploraram o uso de informações espectrais qualitativas na classificação pedológica. De forma semelhante, algumas pesquisas usam índices espectroscópicos para diferenciar horizontes do solo [Souza et al. 2020], e outras usam morfometria digital para classificação automática de solos [Nagy et al. 2016].

Apesar desses avanços, abordagens baseadas exclusivamente em métodos estatísticos ou espectrais podem apresentar limitações na distinção entre classes de solos com propriedades mineralógicas semelhantes, uma vez que diferenças taxonômicas frequentemente dependem de critérios estruturais e pedogenéticos estabelecidos nas chaves de classificação. Nesse contexto, sistemas especialistas baseados em regras continuam sendo particularmente adequados para representar sistemas taxonômicos como o SiBCS, cuja lógica de classificação segue uma estrutura hierárquica e determinística.

Observa-se, ainda, que a maioria dos sistemas existentes busca automatizar a classificação taxonômica completa dos solos. Em comparação, há menos estudos focados especificamente na formalização computacional das regras utilizadas na identificação de horizontes diagnósticos, etapa fundamental no processo de classificação pedológica. Assim, diferentemente de sistemas voltados à classificação taxonômica completa de perfis de solo, este trabalho concentra-se na etapa específica de identificação de horizontes diagnósticos. A proposta deve ser entendida como um módulo inicial e complementar a sistemas mais abrangentes de classificação pedológica, ao formalizar explicitamente parte das regras diagnósticas do SiBCS e permitir sua verificação computacional.

4. Metodologia

O sistema especialista proposto foi desenvolvido com base na formalização das regras de inferência apresentadas na Seção 2. Essas regras foram implementadas em Python, constituindo a base de conhecimento responsável pela identificação automática de horizontes diagnósticos a partir dos atributos observados em perfis de solo.

As regras implementadas foram derivadas dos critérios diagnósticos descritos no SiBCS, enquanto os perfis utilizados na avaliação foram empregados como casos de verificação funcional do sistema. Dessa forma, a avaliação busca verificar a conformidade da implementação com os critérios formais do SiBCS, e não estimar a capacidade de generalização estatística do sistema em condições reais de campo.

Nesta versão, o sistema implementa regras para a identificação de 17 classes de horizontes diagnósticos, distribuídas em três grupos: seis horizontes superficiais, cinco horizontes subsuperficiais e seis horizontes ou camadas de ocorrência geral no perfil. O conjunto contemplado inclui: A chernozêmico, A proeminente, A húmico, A moderado, A fraco, A antrópico, B plânico, B nítico, B latossólico, alvíco, B incipiente, plíntico, glei, concrecionário, vértico, cálcico e sulfúrico.

A modelagem computacional do domínio foi estruturada de forma orientada a objetos, permitindo a representação explícita dos principais elementos do processo de

classificação pedológica. Nesse contexto, os horizontes morfológicos definidos no conjunto apresentado na Eq. 1 foram representados como classes no sistema, assim como os atributos diagnósticos utilizados na caracterização desses horizontes.

O sistema é composto por três componentes principais: interface de entrada de dados, base de conhecimento e motor de inferência. A interface permite ao usuário fornecer os atributos observados no perfil de solo, incluindo propriedades morfológicas e químicas relevantes. Essas informações são então processadas pelo motor de inferência, que aplica as regras da base de conhecimento para determinar a classificação dos horizontes diagnósticos.

O processo de inferência baseia-se na avaliação das condições estabelecidas pelas regras de classificação, conforme apresentado na Figura 2. Para cada horizonte analisado, os valores dos atributos diagnósticos fornecidos pelo usuário são comparados aos critérios estabelecidos nas regras derivadas do SiBCS. Quando as condições de uma regra são satisfeitas, o sistema infere a classe correspondente do horizonte diagnóstico.

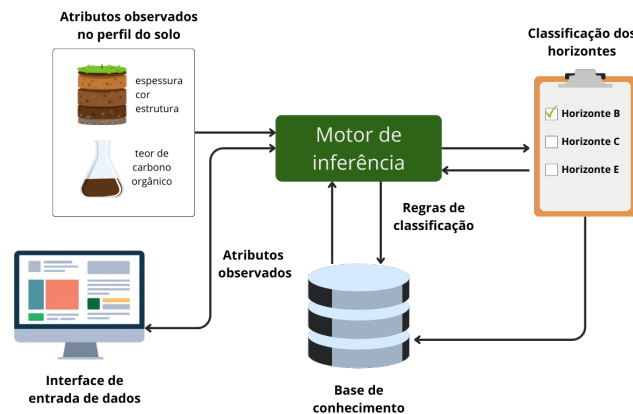


Figura 2. Proposta metodológica. Fonte: Autores

A estrutura das classes responsáveis por representar os horizontes morfológicos é apresentada na Figura 3. Esse modelo define os elementos fundamentais associados a cada horizonte, incluindo propriedades relacionadas à caracterização desse horizonte no perfil de solo.

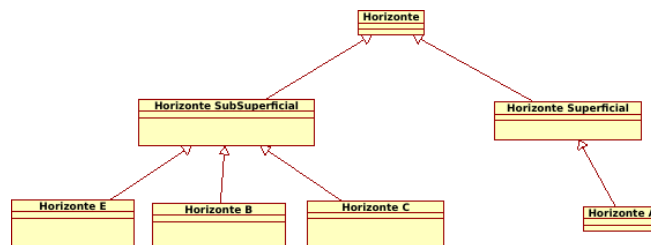


Figura 3. Estrutura das classes que representam os horizontes. Fonte: Autores

Os atributos diagnósticos utilizados no processo de classificação foram modelados por meio de classes específicas, construídas a partir de enumerações que representam valores discretos e qualitativos associados às propriedades do solo. Essa estrutura permite padronizar a representação dos atributos e facilitar sua utilização no processo de inferência. A organização dessas classes é apresentada na Figura 4.

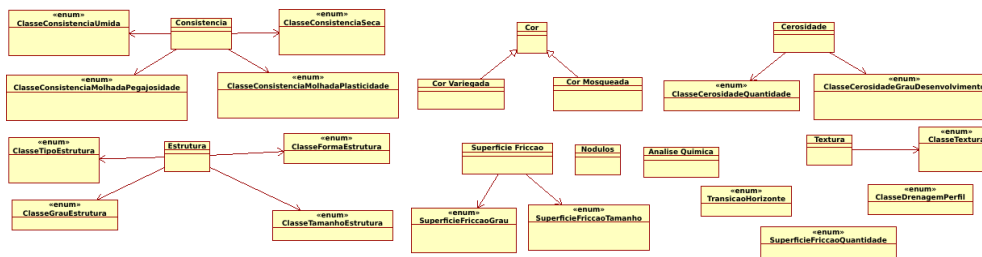


Figura 4. Representação em classes dos atributos diagnósticos. Fonte: Autores

A relação entre horizontes e atributos diagnósticos é estabelecida por meio de um modelo de composição, no qual cada horizonte é descrito por um conjunto de atributos que caracterizam suas propriedades morfológicas e químicas. Esse relacionamento permite que o motor de inferência utilize as informações associadas a cada horizonte para avaliar as regras da base de conhecimento e determinar a classificação diagnóstica. A estrutura desse relacionamento é ilustrada na Figura 5.



Figura 5. Representação de classes para a composição entre horizontes e atributos diagnósticos. Fonte: Autores

A partir dessa modelagem, o sistema especialista é capaz de receber os atributos de um horizonte observados no perfil de solo, aplicar as regras de inferência derivadas do SiBCS e retornar automaticamente a classificação do horizonte diagnóstica.

5. Resultados

O sistema especialista desenvolvido foi avaliado por meio da aplicação das regras de inferência a perfis de solo descritos segundo os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). O objetivo da avaliação foi verificar a conformidade funcional entre as regras implementadas e as classificações diagnósticas esperadas, e não demonstrar significância estatística ou generalização ampla do sistema.

Para essa avaliação, foram elaborados dezoito testes principais de classificação, organizados em três grupos: (i) horizontes diagnósticos superficiais, (ii) horizontes diagnósticos subsuperficiais e (iii) horizontes ou camadas que podem ocorrer em diferentes posições no perfil do solo, denominados aqui horizontes gerais. Este último grupo inclui, por exemplo, horizontes e camadas glei, cálcico, concrecionário e vértico, cuja ocorrência não está restrita à superfície ou subsuperfície do perfil.

Os perfis utilizados nos testes foram obtidos ou adaptados com base em descrições pedológicas da literatura e em relatórios de reuniões de correlação e classificação de solos (RCCs). Entre as fontes utilizadas destacam-se os estudos de [Marques et al. 2014] e [Junior et al. 2019], bem como guias de campo das RCCs

de Rondônia [EMBRAPA 2019], Maranhão [EMBRAPA 2020] e Goiás e Tocantins [EMBRAPA 2023]. Esses perfis forneceram os atributos necessários para simular diferentes cenários de classificação diagnóstica.

Os casos avaliados correspondem a perfis com descrições suficientemente completas para aplicação das regras diagnósticas. Assim, esta avaliação não contempla, de forma sistemática, situações com atributos ambíguos, ausentes ou conflitantes, comuns em condições reais de campo, as quais deverão ser exploradas em trabalhos futuros.

Foram fornecidos ao sistema atributos morfológicos, físicos e químicos observados em diferentes horizontes de um perfil de solo, incluindo espessura, cor, atributos de estrutura, teor de carbono orgânico, saturação por bases, teor de fósforo extraível, composição granulométrica e classe textural. Embora o sistema represente um conjunto mais amplo de atributos, cada regra de inferência utiliza apenas o subconjunto necessário para avaliar os critérios diagnósticos definidos no SiBCS em cada horizonte. Com base nessas informações, o motor de inferência aplicou automaticamente as regras implementadas para determinar a classificação diagnóstica de cada horizonte.

A Tabela 1 apresenta um exemplo de aplicação do sistema a horizontes superficiais de um perfil de solo, cujos atributos foram obtidos em campo e confirmados por análises laboratoriais.

Tabela 1. Atributos utilizados para a identificação de horizonte húmico

Atributo	Horizonte A1	Horizonte A2	Horizonte A3
Espessura	31 cm	22 cm	15 cm
Cor	7,5YR/2.5/1	7,5YR/2.5/1	7,5YR/2.5/1
Tipo Estrutura	AgregadoSimples	AgregadoSimples	AgregadoSimples
Forma Estrutura	Granular	BlocosSubangulares	BlocosSubangulares
Tamanho Estrutura	Muito Pequena Pequena	Média	Muito Pequena
Grau Estrutura	Moderada a Forte	Moderada	Forte
Teor Carbono	20.6 g.kg ⁻¹	10.6 g.kg ⁻¹	8.4 g.kg ⁻¹
Saturacao Bases	30 %	9 %	3 %
Fosforo Extratível	0 mg.kg ⁻¹	0 mg.kg ⁻¹	0 mg.kg ⁻¹
Teor Argila	200 g.kg ⁻¹	230 g.kg ⁻¹	250 g.kg ⁻¹
Teor Silte	100 g.kg ⁻¹	70 g.kg ⁻¹	50 g.kg ⁻¹
Teor Areia Total	700 g.kg ⁻¹	700 g.kg ⁻¹	700 g.kg ⁻¹
Classe Textura	Argila	Argila	Argila

Com base nesses atributos, o sistema especialista classificou corretamente o horizonte superficial como horizonte A húmico, conforme os critérios estabelecidos pelo SiBCS. Esse resultado demonstra que as regras implementadas na base de conhecimento são capazes de reproduzir adequadamente as condições diagnósticas adotadas pelo pedólogo no processo de classificação.

De forma geral, os testes realizados indicam que, nos casos avaliados, a formalização computacional das regras do SiBCS permitiu executar de forma consistente o processo de inferência necessário à identificação dos horizontes diagnósticos considerados.

Para sintetizar os resultados da avaliação funcional, a Tabela 2 apresenta a distribuição dos testes realizados e o número de classificações corretas do sistema es-

pecialista em cada grupo de horizontes diagnósticos avaliados.

Tabela 2. Resumo dos testes funcionais

Grupo	Testes	Corretas
Superficiais	6	6
Subsuperficiais	6	6
Gerais	6	6
Total	18	18

Em todos os 18 testes realizados, o sistema retornou a classificação diagnóstica esperada. Esse resultado indica que, nos cenários avaliados, as regras implementadas foram aplicadas de forma coerente com os critérios do SiBCS. No entanto, devido ao número limitado de casos e à natureza funcional da avaliação, os resultados não devem ser interpretados como evidência de generalização estatística. Ainda assim, a abordagem baseada em regras mantém explícitas as condições utilizadas no processo de decisão, permitindo rastrear quais critérios diagnósticos levaram à identificação de cada horizonte.

6. Considerações Finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema especialista capaz de representar computacionalmente parte do conhecimento pedológico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), permitindo a identificação automática de horizontes diagnósticos a partir de atributos morfológicos observados em perfis de solo. Diferentemente de outras abordagens voltadas à classificação taxonômica completa dos solos, a proposta concentra-se especificamente na etapa de identificação de horizontes diagnósticos, elemento fundamental no processo de classificação pedológica.

Os resultados indicam que a formalização das regras do SiBCS em uma base de conhecimento estruturada permite reproduzir, de forma consistente, parte do raciocínio do pedólogo na identificação desses horizontes. Dessa forma, o sistema desenvolvido pode atuar como ferramenta de apoio em levantamentos pedológicos, além de contribuir para a sistematização do processo de classificação e para a formação de estudantes e profissionais da área.

Como limitação, destaca-se que o sistema baseia-se em um subconjunto fixo de regras derivadas do SiBCS, contemplando 17 classes de horizontes diagnósticos, e foi avaliado por meio de um número limitado de testes funcionais, compostos majoritariamente por casos bem definidos da literatura. Dessa forma, os resultados ainda não permitem afirmar generalização para condições reais de campo, especialmente em situações com atributos ambíguos, ausentes ou conflitantes. Como trabalho futuro, propõe-se ampliar a cobertura das regras implementadas, incluir casos-limite na avaliação, disponibilizar os casos de teste e integrar abordagens baseadas em dados, como técnicas de aprendizado de máquina, ao sistema especialista.

Agradecimentos

Os autores agradecem às seguintes agências brasileiras: FAPERJ, CAPES e CNPq. DB agradece à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro concedido por meio dos auxílios E-26/210.798/2024 e E-26/204.262/2025.

Referências

- EMBRAPA (2019). *Guia de Campo da XII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Rondônia*. EMBRAPA, Brasília, DF.
- EMBRAPA (2020). *Guia de Campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão*. EMBRAPA, Brasília, DF.
- EMBRAPA (2023). *Guia de Campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins*. EMBRAPA, Brasília, DF.
- Galbraith, J. and Bryant, R. (1998). A functional analysis of soil taxonomy in relation to expert system techniques. In *Artificial Intelligence Applications in Natural Resource Management*. American Society of Agronomy.
- Galbraith, J. M. et al. (1998). An expert system for soil taxonomy. *Soil Science*, 163(9):748–758.
- Gonçalves dos Santos, H. et al. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Embrapa, 5 edition.
- Junior, C. R. P., Pereira, M. G., Neto, E. C. S., Fontana, A., Santos, O. A. Q., and Souza, R. S. (2019). Caracterização dos solos e limitação de uso em uma topossequência na baixada litorânea fluminense, rj. In *Características do Solo e sua Interação com as Plantas*, chapter 3.
- Lepsch, I. F. (2011). *19 Lições de Pedologia*. Oficina de Textos.
- Marques, F. A., Souza, R. A. S., Souza, J. E. S., Lima, J. F. W. F., and Junior, V. S. S. (2014). Caracterização de vertissolos da ilha de fernando de noronha, pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38:1051–1065.
- Marques, K. P. P. et al. (2019). How qualitative spectral information can improve soil profile classification? *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 27(1):13–23.
- Nagy, J. et al. (2016). Digital soil morphometrics brings revolution to soil classification. In Gervasi, O. et al., editors, *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2016*, volume 9789 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 302–317. Springer.
- Nations, U. (2017). Digital library. <https://digitallibrary.un.org/record/1291226?v=pdf>. Acessado: 27-02-2025.
- Qiu, L. and Li, A. (2014). Automated keys of soil diagnostic horizons based on case-based reasoning. In *2014 Third International Conference on Agro-Geoinformatics*, Beijing, China. IEEE.
- Rizzo, R. et al. (2014). Using numerical classification of profiles based on vis-nir spectra to distinguish soils from the piracicaba region, brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(2):353–363.
- Souza, A. B. et al. (2020). Ratio of clay spectroscopic indices and its approach on soil morphometry. *Geoderma*, 358:113963.
- Vaz, G. J. et al. (2025). Smartsolos expert: An expert system for brazilian soil classification. *Smart Agricultural Technology*, 10:100735.