

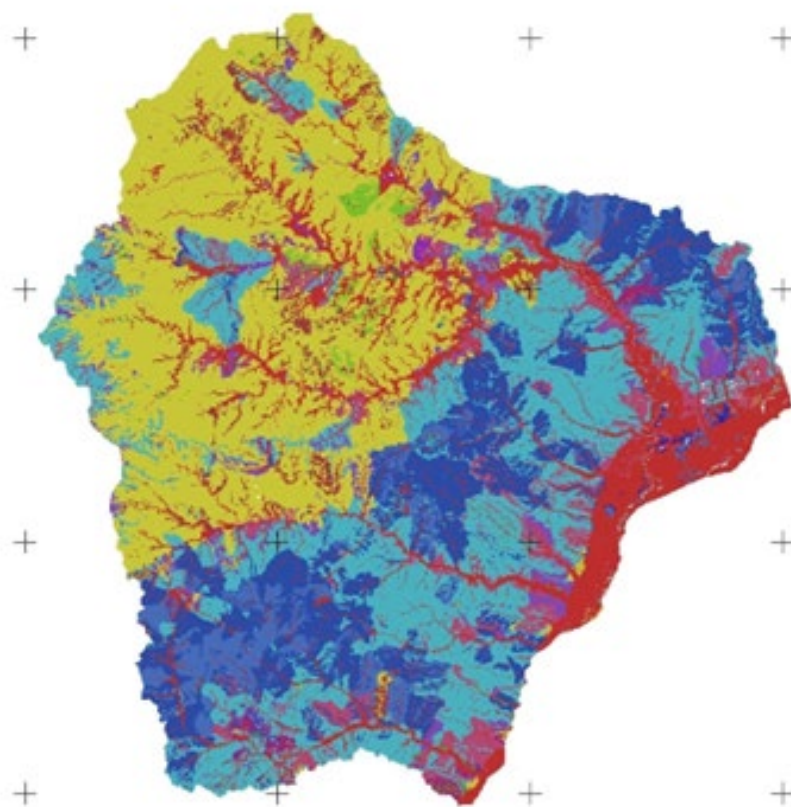
Rio de Janeiro, RJ / Julho, 2026

Mapeamento digital de solos (MDS) das bacias hidrográficas contribuintes da UHE Itaipu no estado do Mato Grosso do Sul

Procedimentos metodológicos

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

2 FOME ZERO
E AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura e Pecuária***

ISSN 1517-2627 / e-ISSN 2966-2443

Documentos 254

Julho, 2026

Mapeamento digital de solos (MDS) das bacias hidrográficas contribuintes da UHE Itaipu no estado do Mato Grosso do Sul Procedimentos metodológicos

*Silvio Barge Bhering
Waldir de Carvalho Junior
Cesar da Silva Chagas
Luis Carlos Hernani
Nilson Rendeiro Pereira
José Ronaldo Macedo
Gustavo de Mattos Vasques
Ricardo de Oliveira Dart
Wenceslau Geraldes Teixeira
Naelmo de Souza Oliveira
Letícia Guimarães Pimentel
Adnan Marzulo Maia Martins
João Pedro das Neves Cardoso Pedreira*

***Embrapa Solos
Rio de Janeiro, RJ
2026***

Embrapa Solos	Edição executiva
Embrapa Solos	<i>Marcos Antônio Nakayama</i>
Rua Jardim Botânico, 1024.	Revisão de texto
Jardim Botânico	<i>Marcos Antônio Nakayama</i>
Rio de Janeiro, RJ	Normalização bibliográfica
22460-000	<i>Luciana Sampaio de Araujo</i>
www.embrapa.br/solos	Projeto gráfico
www.embrapa.br/fale-conosco/	<i>Leandro Sousa Fazio</i>
Comitê Local de Publicações	Diagramação
Presidente	<i>Alexandre Abrantes Cotta de Mello</i>
<i>Cláudia Pozzi Jantalia</i>	
Secretário-executivo	
<i>Marcos Antônio Nakayama</i>	
Membros	
<i>Bernadete da Conceição Carvalho Gomes Pedreira,</i>	
<i>David Vilas Boas de Campos, Evaldo de Paiva Lima,</i>	
<i>Helga Restum Hissa, José Francisco Lumberas,</i>	
<i>Joyce Maria Guimarães Monteiro, Lucia Raquel</i>	
<i>Queiroz Pereira da Luz, Mauricio Rizzato Coelho e</i>	
<i>Wenceslau Geraldes Teixeira</i>	Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Mapeamento digital de solos (MDS) das bacias hidrográficas contribuintes da UHE Itaipu no estado do Mato Grosso do Sul : procedimentos metodológicos / Silvio Barge Bhering ... [et al.]. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2026.
PDF (31 p.) : il. color. — (Documentos / Embrapa Solos, e-ISSN 2966-2443 ; 254)

1. Mapa. 2. Solo. 3. Pedologia. 4. Bacia Hidrográfica. I. Bhering, Silvio Barge. II. Carvalho Junior, Waldir de. III. Chagas, Cesar da Silva. IV. Hernani, Luis Carlos. V. Pereira, Nilson Rendeiro. VI. Macedo, José Ronaldo de. VII. Vasques, Gustavo de Mattos. VIII. Dart, Ricardo de Oliveira. IX. Teixeira, Wenceslau Geraldes. X. Oliveira, Naelmo de Souza. XI. Pimentel, Letícia Guimarães. XII. Martins, Adinan Marzulo Maia. XIII. Pedreira, João Pedro das Neves Cardoso. XIV. Embrapa Solos. XV. Série.

CDD (23. ed.) 631.4

Luciana Sampaio de Araujo (CRB-7/5165)

© 2026 Embrapa

Autores

Silvio Barge Bhering

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geografia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Waldir de Carvalho Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Cesar da Silva Chagas

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Luis Carlos Hernani

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Nilson Rendeiro Pereira

Engenheiro-agrônomo, mestre em Geografia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

José Ronaldo de Macedo

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Gustavo de Mattos Vasques

Engenheiro florestal, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Ricardo de Oliveira Dart

Geógrafo, mestre em Geografia, analista da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Wenceslau Geraldes Teixeira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geoecologia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Naelmo de Souza Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, bolsista (Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento — Itaipu) na Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Letícia Guimarães Pimentel

Engenheira ambiental, mestre em Engenharia Ambiental, bolsista (Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento — Itaipu) na Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Adinan Marzulo Maia Martins

Bacharel em Ciências Matemáticas e da Terra, mestre em Geografia, bolsista (Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento — Itaipu) na Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

João Pedro das Neves Cardoso Pedreira

Bacharel em Ciências Matemáticas e da Terra, bolsista (Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento — Itaipu) na Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Apresentação

O Projeto Ação Integrada de Solos e Água (AISA), desenvolvido pela Embrapa em parceria com a Itaipu Binacional, representa um esforço conjunto para ampliar o conhecimento sobre os recursos naturais da área de contribuição da Usina Hidrelétrica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul. A iniciativa teve como propósito gerar uma base de informações espaciais consistente sobre os solos e seus atributos físico-hídricos, capaz de subsidiar estudos hidrológicos, apoiar a gestão ambiental e contribuir para o planejamento sustentável do território.

Esta publicação reúne e documenta os procedimentos metodológicos empregados durante a execução do projeto, desde o planejamento amostral e os levantamentos de campo até o processamento das informações, a integração de bases de dados ambientais e a aplicação de técnicas de mapeamento digital de solos. Ao sistematizar essas etapas, a obra disponibiliza um referencial técnico que favorece a reprodução, o aperfeiçoamento e a aplicação dessa abordagem em outras regiões e projetos com objetivos semelhantes.

A combinação entre conhecimento pedológico, geotecnologias, sensoriamento remoto e métodos de aprendizado de máquina permitiu produzir informações espaciais de elevada qualidade, ampliando a capacidade de compreender a distribuição dos solos e de seus atributos em escala regional. Esses produtos fortalecem estudos voltados à modelagem hidrológica, à conservação do solo e da água, ao planejamento do uso da terra e ao desenvolvimento de sistemas produtivos mais sustentáveis.

Além de consolidar uma metodologia inovadora para levantamentos de solos em grandes áreas, esta publicação evidencia o papel da pesquisa científica na geração de soluções para desafios relacionados à gestão dos recursos naturais. Os resultados obtidos reforçam a missão da Embrapa de produzir conhecimento e inovação para uma agricultura sustentável, ao mesmo tempo em que demonstram a relevância da parceria com a Itaipu Binacional na construção de ferramentas que promovem benefícios ambientais, sociais e econômicos para a região e oferecem subsídios para futuras iniciativas em outras bacias hidrográficas brasileiras.

Daniel Vidal Pérez

Chefe-Geral da Embrapa Solos

Sumário

Introdução	9
Objetivo	9
Área de interesse deste estudo	9
Localização e caracterização do meio físico	9
Procedimento metodológicos	14
Covariáveis ambientais e dados legados de solos	15
Coleta de dados	15
Estudos dos solos	18
Processamento e mapeamento digital de solos	18
Produtos do mapeamento digital de solos	20
Conclusão	28
Referências	29

Introdução

O conhecimento dos solos e de atributos físico-hídricos é fundamental para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas terrestres e para o manejo adequado dos recursos naturais. Propriedades como textura, estrutura, densidade e condutividade hidráulica influenciam diretamente a infiltração, o armazenamento e o movimento da água no perfil do solo. Essas informações são essenciais para alimentar modelos hidrológicos utilizados na gestão de bacias hidrográficas, permitindo simular fluxos de água, prever disponibilidade hídrica e subsidiar estratégias de uso racional dos recursos. Além disso, o conhecimento dos solos e sua distribuição espacial na paisagem é indispensável para o controle de processos erosivos, pois possibilita identificar áreas mais suscetíveis à perda de solo e à degradação. Neste estudo, o objetivo principal foi a produção de uma base de dados de variáveis ambientais para melhorar o nível de conhecimento dos solos e seus atributos por meio da utilização das técnicas e procedimentos de Mapeamento Digital de Solos (MDS) na área de contribuição hídrica, no estado do Mato Grosso do Sul, para a Hidroelétrica de Itaipu.

Nesse contexto, os estudos dos solos contribuem não apenas para a proteção ambiental, mas também para a promoção de práticas agrícolas sustentáveis, favorecendo a conservação da água, a manutenção da produtividade e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Este trabalho atende ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2 — Fome Zero e Agricultura Sustentável, estipulado pelas Nações Unidas (ONU), mais especificamente à meta 2.4, que pretende, até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos, por meio de políticas de pesquisa, de assistência técnica e extensão rural, entre outras, visando implementar práticas agrícolas resilientes que aumentem a produção e a produtividade e, ao mesmo tempo, ajudem a proteger, recuperar e conservar os serviços ecossistêmicos, fortalecendo a capacidade de adaptação às mudanças do clima, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, melhorando progressivamente a qualidade da terra, do solo, da água e do ar.

Objetivo

O Projeto AISA — Ação Integrada de Solos e Água (726), desenvolvido pela Embrapa Solos em parceria com a Itaipu Binacional, teve por objetivo

principal a produção de bases de dados de variáveis ambientais para melhorar o nível de conhecimento dos solos da área de contribuição hídrica da Hidroelétrica de Itaipu, no estado do Mato Grosso do Sul, com vistas a aprimorar processos de modelagem hidrológica realizados pela Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos em atividades relacionadas à operação da Usina, por meio do mapeamento digital de solos e de atributos físico-hídricos, bem como de práticas agrícolas sustentáveis, favorecendo a conservação da água, a manutenção da produtividade e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Área de interesse deste estudo

Localização e caracterização do meio físico

A área de contribuição da Hidroelétrica de Itaipu, no estado de Mato Grosso do Sul, abrange uma área territorial de aproximadamente 65.000 km² (Figura 1), incorporando 37 municípios nas bacias hidrográficas dos rios Iguatemi, Ivinhema e Amambai, com altitude variando entre pouco mais de 200 m nas proximidades do rio Paraná e mais de 730 m nas serras no limite oeste da área.

As informações descritas a seguir fazem parte do conjunto de covariáveis ambientais categóricas, empregadas para melhor compreensão da área de estudos, assim como para constituírem variáveis auxiliares nas etapas de delineamento amostral e modelagem preditiva, visto que o mapeamento digital de solos depende diretamente da compreensão do meio físico, uma vez que os padrões espaciais dos solos refletem a ação integrada dos fatores de formação e sua relação com a paisagem. Nesse contexto, informações sobre relevo, material de origem, clima e drenagem são fundamentais para a seleção de covariáveis ambientais e para a construção de modelos preditivos capazes de representar adequadamente a variabilidade espacial dos solos, conferindo maior consistência pedológica aos mapas produzidos (McBratney et al., 2003).

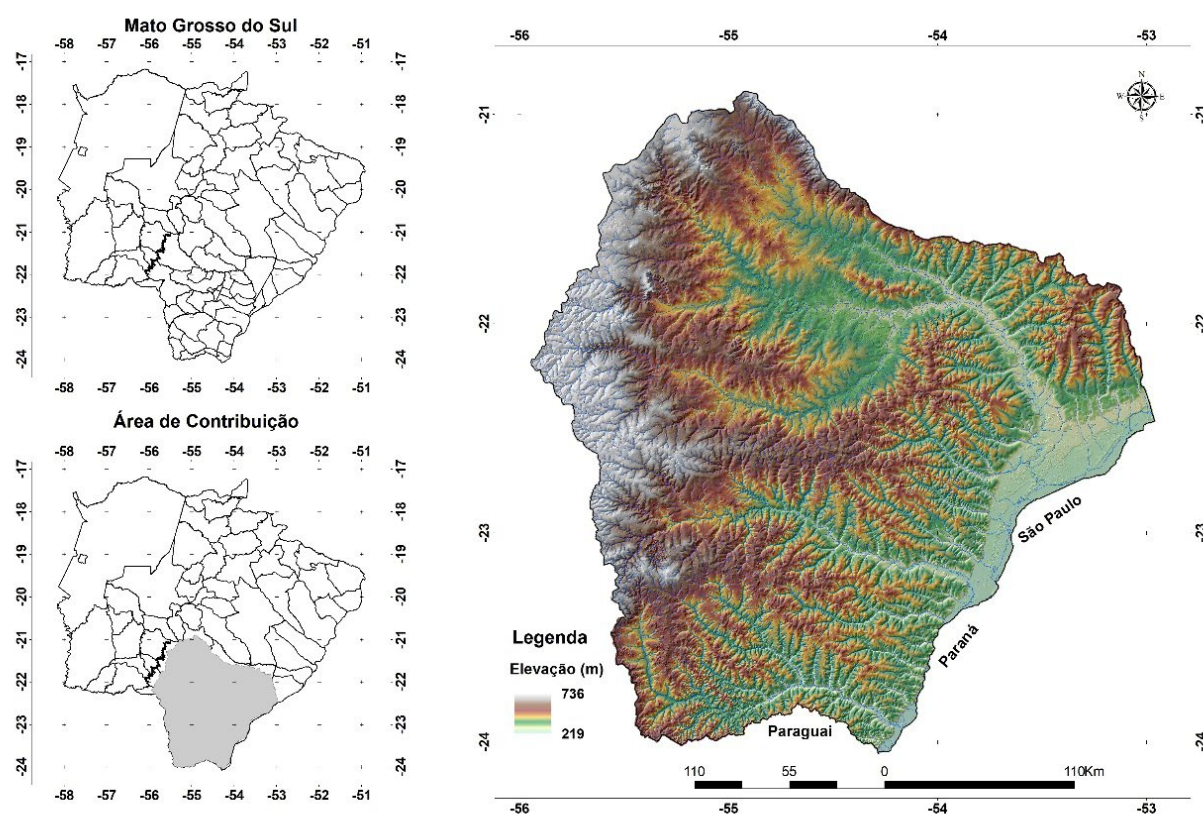


Figura 1. (A) Localização da área de estudo no estado do Mato Grosso do Sul; (B) Modelo de elevação de terreno da área de estudo.

Características climáticas

O estado de Mato Grosso do Sul se encontra em uma área de transição climática, sujeita à atuação de diversas massas de ar, implicando contrastes térmicos acentuados. De acordo com Alvares et al. (2013), a área de contribuição da Hidroelétrica de Itaipu no estado apresenta, segundo a classificação climática de Köppen, os seguintes tipos: Am, Aw e Cfa (Figura 2).

O tipo climático Am, definido como clima tropical de monção, é uma transição entre os tipos climáticos Af e Aw, caracterizando-se por apresentar temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18 °C com uma estação seca de pequena duração que é compensada pelos totais elevados de precipitação. Esse tipo climático está presente na porção norte da área de estudo (Figura 2).

O tipo climático Aw (clima tropical de savana), por sua vez, caracteriza-se como clima tropical com inverno seco. Apresenta estação chuvosa de novembro a abril e nítida estação seca de maio a outubro (julho é o mês mais seco), com totais pluviométricos médios mensais inferiores a 60 mm. A temperatura média do ar do mês mais frio é superior a 18 °C, e

a temperatura média anual é de 23,1 °C. As precipitações pluviométricas são superiores a 750 mm anuais, podendo atingir até 1.800 mm. A deficiência hídrica anual é de aproximadamente 110 mm, e o excedente hídrico, em termos médios, fica em torno de 530 mm, considerando a capacidade de água disponível (CAD) igual a 100 mm. O período de deficiência hídrica estende-se entre os meses de junho a setembro. Esse tipo climático é encontrado na porção leste da área de estudo, na divisa com o estado de São Paulo (Figura 2).

Finalmente, o tipo climático Cfa, dominante na área de contribuição para a Hidroelétrica de Itaipu no estado, caracteriza-se como um clima temperado subtropical de verão quente. As temperaturas são superiores a 22 °C no verão, com mais de 30 mm de chuva no mês mais seco. Esse tipo de clima predomina em toda a porção centro-sul da área de contribuição, desde a fronteira leste com o estado do Paraná até as fronteiras com o Paraguai.

Geologia

A geologia, no contexto deste estudo, foi abordada exclusivamente como material de origem dos

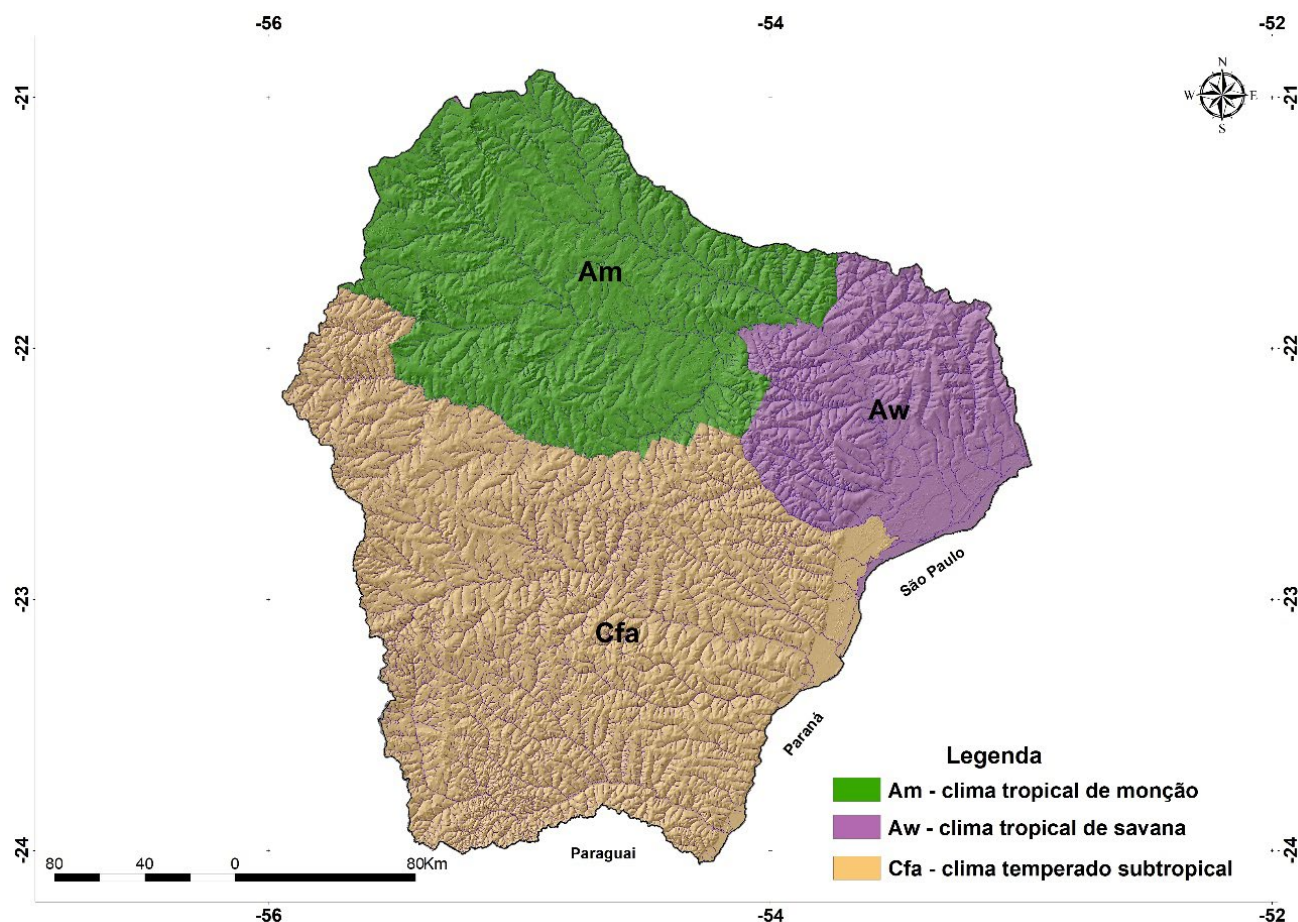


Figura 2. Tipos climáticos da área de contribuição da usina hidroelétrica de Itaipu no estado do Mato Grosso do Sul, segundo a classificação de Köppen.

Fonte: Alvares et al. (2013).

solos, como um dos principais fatores de formação, no intuito de explicar a ocorrência dos diferentes tipos encontrados durante os trabalhos de campo. Por essa razão, na Figura 3 é apresentado o mapa das litologias dominantes no estado. De acordo com Lacerda Filho et al. (2006), estão presentes os Arenitos do Grupo Caiuá; os Basaltos do Grupo São Bento da Formação Serra Geral, que se distribuem por uma ampla área na região centro-sul do estado; e os sedimentos aluvionares nas margens do Rio Paraná (Figura 3). Essa litologia é constituída basicamente por derrames de basalto toleítico, ricos em minerais ferromagnesianos e pobres em quartzo, de coloração creme-amarronzada, cinza-escuro e esverdeada, de textura predominantemente afanítica, amigdalóide no topo e raramente vitrofírica. Apresenta-se densamente fendilhado em várias direções, como pode ser facilmente observado em taludes de corte de estradas. É verificada também a presença de intertrapes areníticos, finos a muito finos, com estratificações cruzadas de pequeno porte.

As principais classes de solos associadas a esta litologia são: Latossolos Vermelhos Distróficos

ou Eutróficos, de textura argilosa ou muito argilosa; Latossolos Vermelhos Distróficos ou Eutróficos, também de textura argilosa ou muito argilosa; e Nitossolos Vermelhos Distróficos ou Eutróficos e Distróficos ou Eutróficos, todos de textura argilosa ou argilosa/muito argilosa. Em menores proporções, foram identificados Neossolos Litólicos, de textura média ou argilosa; e Chernossolos Argilúvicos, de textura média/argilosa, argilosa ou muito argilosa. Em áreas com a presença de intertrapes areníticos foram identificados, principalmente, Latossolos Vermelhos Distróficos ou Eutróficos, de textura média (argissólicos ou típicos).

Os Grupos Caiuá (Formação Caiuá) apresentam litologia predominantemente arenítica de origem eólica e possuem granulometria fina a média. Associadas a esses arenitos, foram identificadas as seguintes classes de solo: Neossolos Quartzarênicos Órticos; Latossolos Vermelhos Distróficos, de textura média (psamíticos); e, em menores proporções, Argissolos Vermelhos Distróficos, de textura arenosa/média ou média.

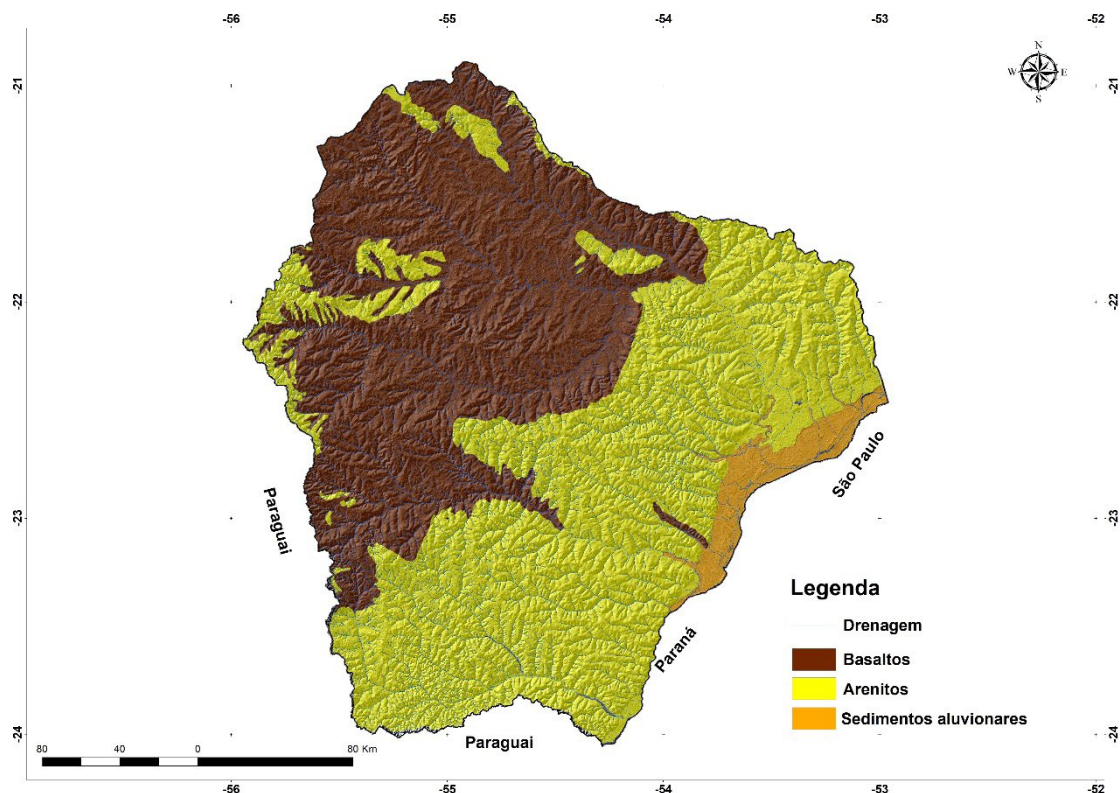


Figura 3. Litologia da área de contribuição da usina hidrelétrica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

Fonte: Mato Grosso do Sul (1989).

Geomorfologia

De acordo com o *Macrozoneamento geoambiental do estado de Mato Grosso do Sul* (Mato Grosso do Sul, 1989), o estado foi subdividido em regiões, agrupadas de acordo com as formas de relevo, litologias e clima predominantes (Figura 4). Em um segundo momento, essas foram subdivididas, conforme o relevo, a densidade de drenagem, os solos, a vegetação primária e o escoamento superficial (geossistemas), constituindo um dos elementos-chave no delineamento amostral e, por conseguinte, nos mapeamentos realizados. Sendo assim, foi realizada uma adaptação utilizando-se dados do SRTM, com 30 m de resolução, bem como dados coletados no campo por ocasião dos trabalhos de descrição e coleta de solos, uma das etapas do levantamento de solos. Finalmente, essas informações, com ênfase na geomorfologia, foram utilizadas para descrever, de maneira sucinta, a correlação entre as características do relevo e os solos identificados em cada uma dessas regiões.

Planalto basáltico

Esta região apresenta-se rampeada, delineando um plano inclinado com orientação NNO-SSE,

onde as altimetrias variam entre 250 e 800 m. As menores altitudes estão presentes nas calhas dos rios Vacaria, Dourados e Brilhante, e as maiores, em sua borda ocidental. Apresenta um conjunto de relevo caracterizado por modelados planos e de dissecação com formas de topos tabulares e convexas amplas, onde as declividades variam de 0 a 8% (média de 2,76%), o que lhe confere um grau de homogeneidade muito grande, que somente é interrompido pelas calhas aluviais. É constituída exclusivamente por rochas basálticas da Formação Serra Geral e, localmente, por arenitos intertrapeanos. A densidade de drenagem nesta área varia de baixa, nos topos tabulares, a alta, nos topos convexas, com aprofundamento fraco a muito fraco. Por essas razões, apresenta também uma grande homogeneidade de classes de solos, com predomínio de Latossolos Vermelhos Distroférricos, Eutroférricos, Distróficos ou Eutróficos de textura argilosa ou muito argilosa; e Nitossolos Vermelhos Distroférricos, Eutroférricos, Distróficos ou Eutróficos, todos de textura argilosa ou argilosa/muito argilosa.

Planaltos rampeados

Localizada na porção centro-oriental do estado, esta região se caracteriza pela marcante

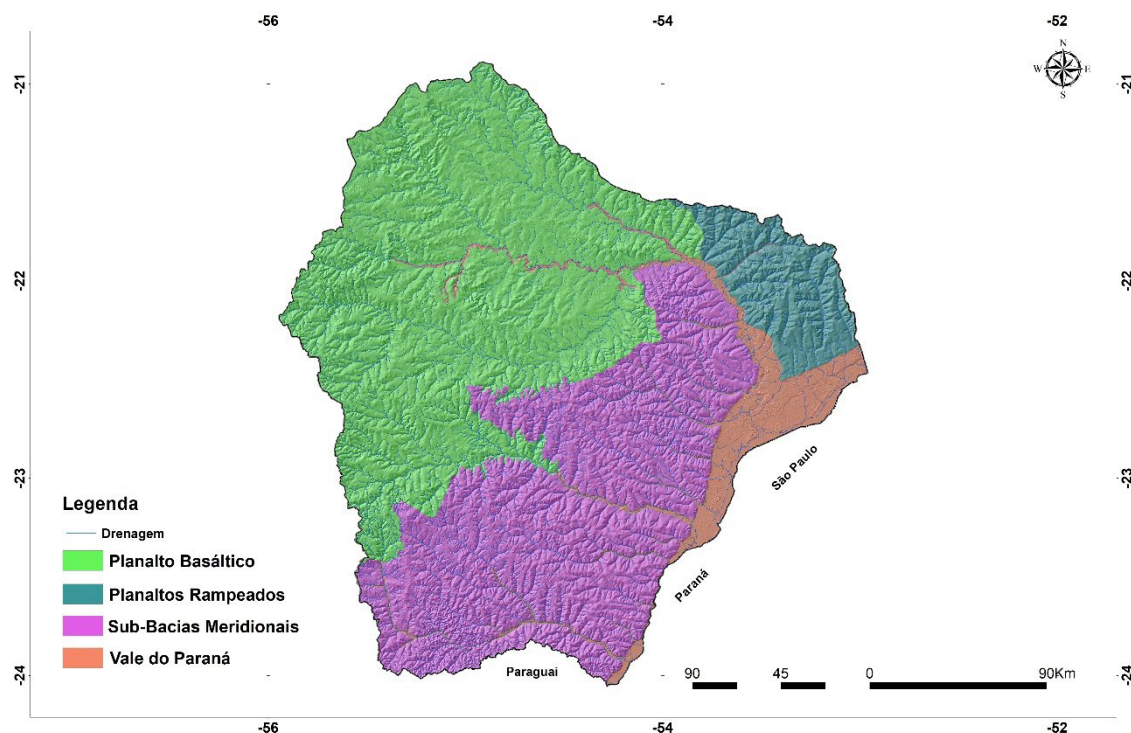


Figura 4. Regiões geoambientais que ocorrem na área de contribuição da usina hidroelétrica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

Fonte: Mato Grosso do Sul (1989).

homogeneidade na morfoestrutura. Nesta, o relevo mostra uma ligeira inclinação da superfície em direção SSE. A norte, as altitudes estão entre 500 e 890 m, e, a sul e sudeste, as cotas altimétricas decrescem para menos de 400 m. De modo geral, a rede de drenagem corre para o rio Paraná, com um direcionamento NNO para SSE. Os cursos principais descrevem um padrão paralelo, enquanto seus afluentes mostram um padrão dendrítico, com densidade de drenagem bastante variável. Na região, predominam as formas conservadas, pediplanadas nos topos, esculpidas em rochas areníticas do Grupo Bauru, e amplas formas dissecadas em interflúvios tabulares ao longo dos vales, onde o processo erosivo fluvial expôs os basaltos da Formação Serra Geral. Predominam formas de modelados planos e de dissecção dos tipos tabulares e convexos ou colinosos. A declividade nestas áreas varia de 0 a 8%. As principais classes de solos associadas a esta região são: os Neossolos Quartzarênicos Órticos; os Latossolos Vermelhos Distróficos, de textura média (psamíticos); e, em menores proporções, os Argissolos Vermelhos Distróficos, de textura arenosa/média ou média.

Sub-bacias meridionais

Esta região situa-se no centro-sul do estado e apresenta cotas altimétricas que variam de 220 a 500 m, onde o relevo evidencia formas dissecadas em amplos interflúvios tabulares, com declividade média de aproximadamente 4%. A rede de drenagem principal, representada, de sul para norte, pelos rios Iguatemi, Maracaí, Guiraí, Amambai e Ivinhema, tem um padrão paralelo, acompanhando a inclinação das camadas, adaptado à estrutura geológica. Já os afluentes, principais responsáveis pela esculturação dos interflúvios, apresentam padrão paralelo dendrítico. Esses padrões de drenagem ensejaram a configuração de relevos tabulares e planos, que acompanham a direção NO-SE da drenagem, e relevo dissecado em amplas formas tabulares nas partes mais baixas. Em sua maior extensão, o relevo é esculpido em rochas areníticas do Grupo Bauru. Sendo assim, as classes de solos mais expressivas são as mesmas encontradas na região dos Planaltos Rampeados, com a qual faz limite ao norte.

Vale do Paraná

Esta região é constituída pelo vale do rio Paraná e seus afluentes, com altimetrias variando de 250 a 300 m. As estruturas geológicas aliadas aos

processos de tectonismo propiciaram um acentuado encaixamento do rio Paraná e de grande parte de seus afluentes. Esse encaixamento é responsável pelo aparecimento no leito do rio de soleiras basálticas resistentes, possibilitando a presença de corredeiras e quedas-d'águas. Possui extensos terraços e planícies fluviais, com sinais de paleodrenagem e áreas de acumulação inundáveis, sem ligação com a drenagem atual. Os afluentes da margem direita do rio Paraná, no geral, apresentam-se paralelos entre si, evidenciando linhas estruturais com direcionamento NO-SE. As classes de solos associadas a estas condições são os Gleissolos

(Melânicos e Háplicos) e Planossolos Háplicos, ambos de texturas variadas, Organossolos e Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos.

Vegetação primária

Os principais tipos de vegetação original encontrados na região de contribuição para a Hidroelétrica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul são apresentados na Figura 5. Descrições e informações mais detalhadas sobre as características da vegetação natural nessa região podem ser consultadas em Mato Grosso do Sul (1989) e IBGE (2004).

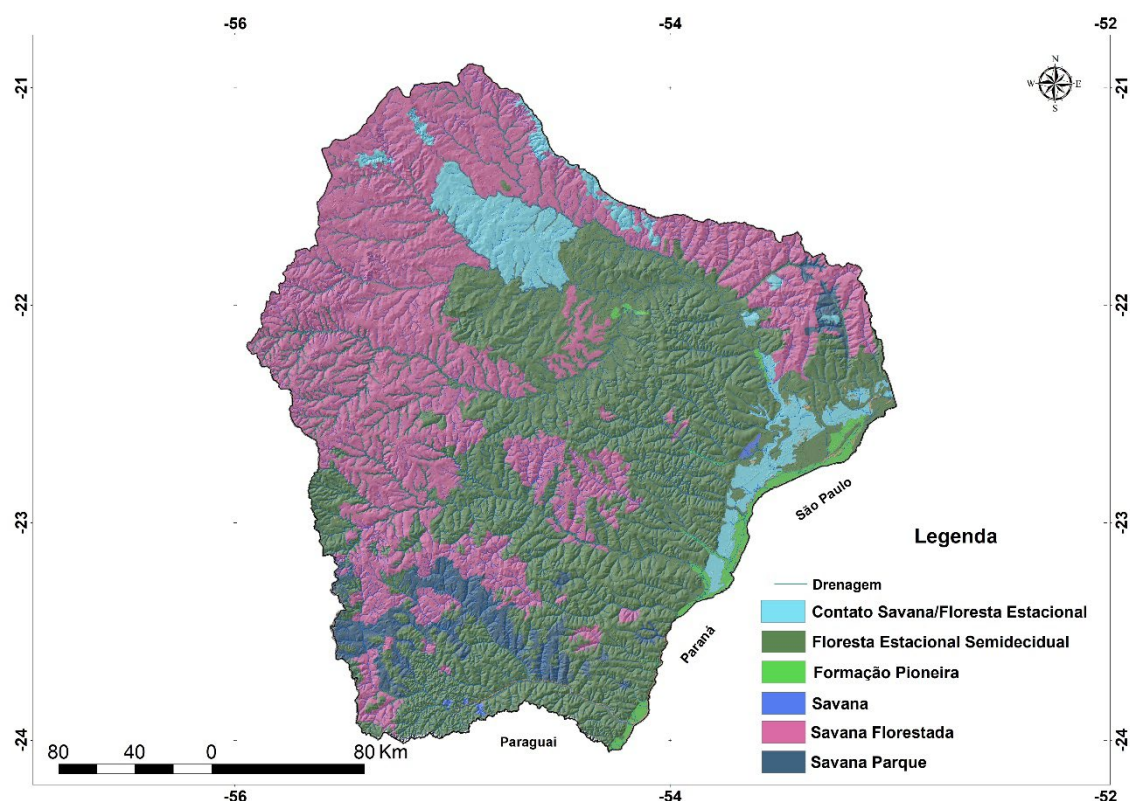


Figura 5. Vegetação primária da área de contribuição da usina hidroelétrica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

Fonte: Mato Grosso do Sul (1989).

Procedimentos metodológicos

Segundo Chagas et al. (2004), recentemente, o mapeamento de solos tem usufruído do uso de tecnologia de processamento de dados, imagens e mapas temáticos, devido à evolução da capacidade de processamento das máquinas e ao uso de sistemas de informações geográficas

(SIG). Os dados e mapas temáticos, quando armazenados e manuseados em ambiente SIG, compreendem um amplo conjunto de informações que podem ser analisadas e interpretadas com diferentes objetivos e em qualquer época (Mendonça-Santos et al., 2007). Estas novas técnicas contribuem para a rapidez e o custo de execução, quando comparadas com métodos tradicionalmente utilizados, tornando o levantamento de solos quantitativo e passível de obtenção das incertezas associadas (Chagas, 2006).

Covariáveis ambientais e dados legados de solos

Na definição do delineamento amostral com a determinação dos locais para descrição morfológica e coleta de amostras de solos, o método Conditioned Latin Hypercube Sampling (cLHS) consistiu em uma técnica de amostragem estratificada que busca selecionar amostras representativas das distribuições multivariadas das variáveis ambientais consideradas, proporcionando maior eficiência amostral em comparação com métodos aleatórios convencionais (Minasny; McBratney, 2006). O procedimento baseia-se na estratificação simultânea de um conjunto de K variáveis, representadas por $X_1, X_2, \dots, X_k$, cujas distribuições são divididas em n intervalos de igual probabilidade (estratos). Em seguida, para cada variável, uma amostra é selecionada dentro de cada estrato, garantindo que toda a amplitude de variação dos dados seja adequadamente representada.

Posteriormente, as amostras provenientes dos diferentes estratos são combinadas por meio de um processo de otimização, de modo que o conjunto final de pontos preserve, simultaneamente, as distribuições marginais das variáveis e a estrutura de correlação existente entre elas. Dessa forma, o cLHS possibilita a seleção de locais amostrais que representam de maneira consistente a variabilidade ambiental da área de estudo, assegurando que os estratos definidos para cada variável apresentem representação proporcional no conjunto amostral final.

Esse método garante que cada variável estará representada de maneira completa através de seus estratos (Carvalho Junior et al., 2014). Nesse contexto, para definir a localização dos pontos que compõem o conjunto amostral da área de contribuição para a Hidroelétrica de Itaipu foi utilizado o programa Conditioned Latin Hypercube Sampling cLHS (Minasny; McBratney, 2007), tendo como covariáveis (declividade, distância horizontal média das bacias de primeira ordem ao canal de drenagem, distância vertical média das bacias de primeira ordem ao canal de drenagem, elevação média das bacias de primeira ordem, distância euclidiana média, insolação direta média) todas elaboradas por bacias hidrográficas contribuintes para a Hidroelétrica de Itaipu, além dos dados de litologia, vegetação e biomas (Cerrado e Mata Atlântica). Aplicando restrições operacionais, como sugerido em Roudier et al. (2012), o método cLHS é uma ferramenta interessante no mapeamento digital

de solos. Todavia, frequentemente ele produz um esquema amostral que resulta em planos de implementação dispendiosos (Carvalho Junior et al., 2022), face às dificuldades de acesso.

No intuito de corrigir essa limitação, adotou-se como critério condicional a distância máxima de 200 metros das vias de acesso. Adicionalmente, para refinar a distribuição espacial da grade amostral, foi utilizada como critério espacial adicional a distância mínima de 2.000 metros de pontos de dados de estudos de solos legados de perfis e amostras extras, oriundos principalmente do Zoneamento Agroecológico do Estado do Mato Grosso do Sul.

Esse delineamento amostral gerou uma grade com a definição de alocação de 360 pontos para descrição e coleta de solos, dos quais 120 perfis em trincheiras e 240 amostras extras através de sondagens a trado.

Adicionalmente, de forma complementar ao delineamento amostral realizado para a caracterização dos solos da área de contribuição da UHE Itaipu, foram utilizados 64 perfis e 106 amostras extras dos estudos de solos elaborados para o Zoneamento Agroecológico do Estado do Mato Grosso do Sul, perfazendo um total de 175 perfis e 306 amostras extras efetivamente utilizados no mapeamento da área de estudo, conforme figura 6.

A seguir, na Figura 7, podemos ver um fluxo com as etapas e os dados de covariáveis ambientais comumente utilizadas para o delineamento amostral em mapeamentos digitais de solos.

Coleta de dados

Posterior à elaboração do delineamento amostral, iniciaram-se as etapas de campo com uma campanha de correlação de solos na região. Em seguida, com o conhecimento obtido nesta etapa, foi então elaborada uma legenda preliminar de identificação de solos que serviu de base para os estudos de levantamento de solos. Buscou-se associar os diferentes ambientes identificados no estado com os solos de ocorrência dominante, bem como os aspectos referentes à geologia, relevo, vegetação, pedregosidade, rochiosidade, tipo e graus de erosão, drenagem interna dos solos e fragilidade e potencialidades dos ambientes, de modo a definir um modelo de relação solo-paisagem para a área de interesse.

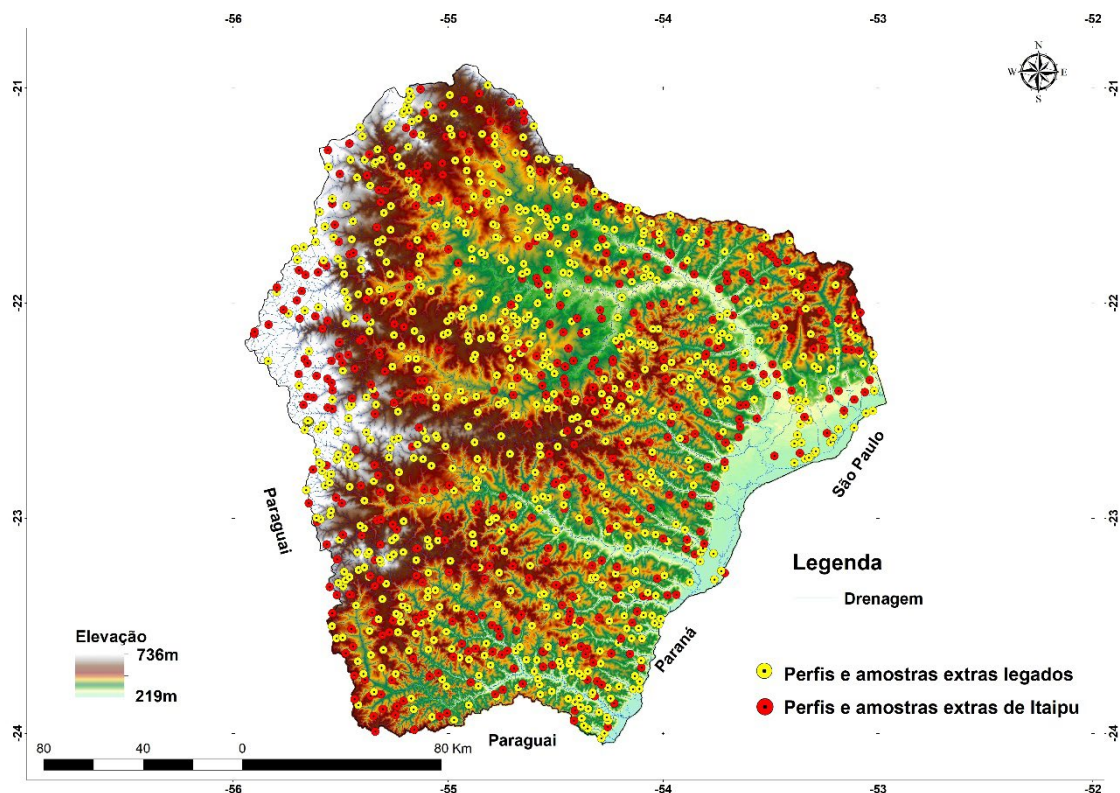


Figura 6. Localização dos perfis e amostras extras legados e coletados utilizados no mapeamento digital de solos da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

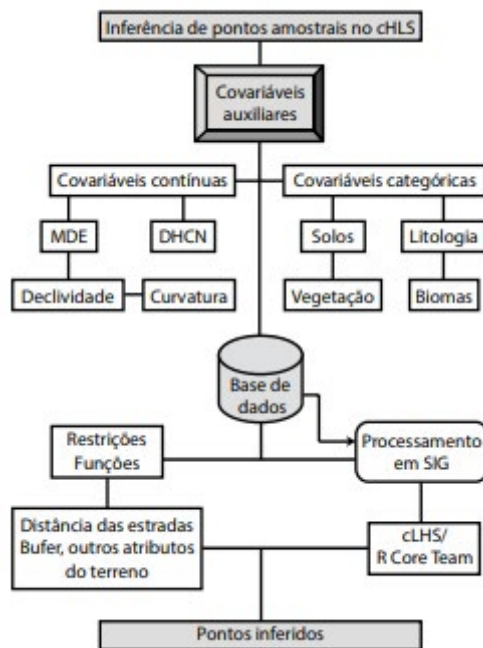


Figura 7. Exemplo de fluxo de covariáveis ambientais utilizadas no delineamento amostral em estudos de mapeamento digital de solos.

Fonte: Adaptado de Carvalho Junior et al. (2022).

Navegador de campo

Para apoiar as etapas de trabalho de campo com a localização dos pontos a serem visitados, obtidos pelo delineamento amostral, elaborou-se um aplicativo para navegação no campo, calcado na ferramenta Field Maps da ESRI (2025a), de acordo com a experiência anterior consolidada no Zoneamento Agroecológico do Estado do Mato Grosso do Sul.

Na elaboração do navegador, foi necessário realizar um planejamento prévio, definindo todos os planos de informação auxiliares, bem como as suas escalas máximas e mínimas de exibição. Nesse aplicativo, os planos de informação mandatórios são os pontos de descrição e coleta designados no delineamento amostral, os pontos oriundos de dados legados e, essencialmente, a malha viária de acesso. Nessa malha, são incluídas desde a malha viária oficial até os acessos em propriedades rurais. Os planos de informação auxiliares utilizados foram a divisão municipal, a sede municipal, a litologia, a vegetação, o modelo digital de elevação, o mapa de solos legado, as bacias hidrográficas e a rede de drenagem, permitindo a habilitação e visualização dos planos de informação de forma integrada ou isoladamente, conforme as Figuras 8 e 9, apresentadas a seguir.



Figura 8. Aplicativo de navegação.

Aplicativo de descrição de dados morfológicos

No intuito de facilitar e harmonizar as descrições de dados morfológicos do projeto, foi elaborada uma versão do aplicativo de coleta de dados de campo, baseada no aplicativo Survey 123 da ESRI (2025b), utilizando a estrutura do aplicativo de coleta de dados no campo anteriormente desenvolvido para o projeto do Zoneamento Agroecológico do Estado do Mato Grosso do Sul.

Esse aplicativo de coleta de dados de campo se baseia totalmente nas informações essenciais para a descrição morfológica de perfis de solos, utilizando todas as informações e características conforme definido pelo *Manual de descrição e coleta de solo no campo* (Anjos et al., 2025). Esse coletor habilita as informações morfológicas empregadas em perfis de solos, amostras extras e pontos de observação, permitindo a unificação e harmonização de todas as informações morfológicas de pedologia, conforme Figura 10 exibida a seguir.

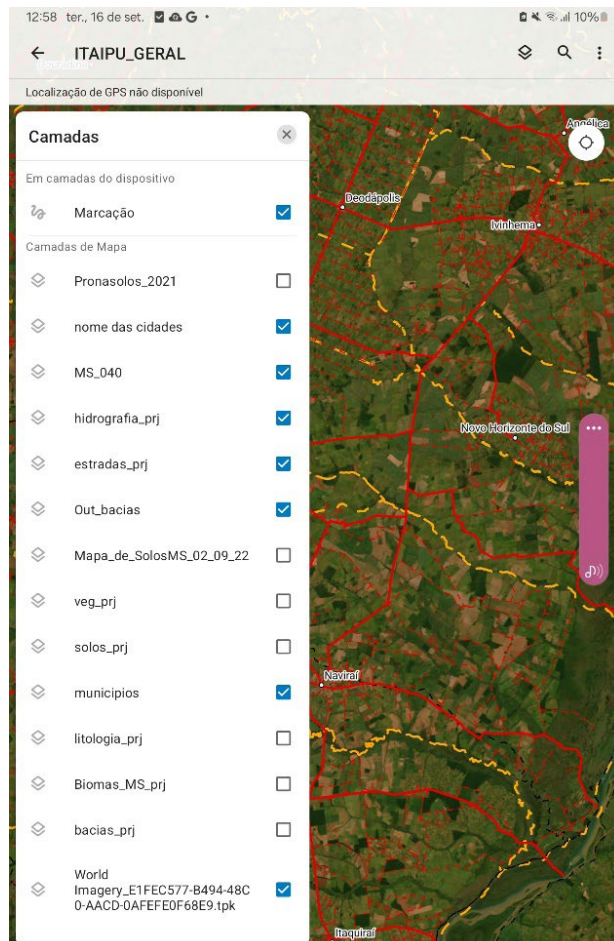


Figura 9. Planos de informação no aplicativo.

The figure displays two screenshots of a mobile application interface for soil data collection. Both screens are titled 'Ficha de Campo 726 - Embrapa Solos - PRODUÇÃO'. The left screenshot shows the 'Coleta de dados de Solo' screen with sections for Identification, Location, General Description, and Geology. The right screenshot shows the same screen with additional sections for Image Gallery, Solo Horizons, and Soil Thickness and Transition.

Figura 10. Telas ilustrativas do aplicativo de descrição morfológica.

Estudos dos solos

Nas amostras coletadas por meio de perfis em trincheiras e por sondagens a trado, foi realizado um conjunto de determinações, com amostras deformadas e indeformadas. Essas amostras seguiram o padrão de descrição e coleta preconizados pelo *Manual de descrição e coleta de solo no campo* da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Anjos et al., 2025).

Determinações analíticas e classificação dos solos

As amostras de solos coletadas (terra fina seca ao ar) foram analisadas seguindo a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017), conforme a seguir: composição granulométrica, argila dispersa em água (ADA), pH em H₂O, pH em KCl, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Al³⁺ e H⁺ + Al³⁺ trocáveis, carbono orgânico, nitrogênio, fósforo assimilável e óxidos do ataque sulfúrico.

Também foram realizadas coletas de amostras indeformadas para determinação de densidade do solo e cálculo da capacidade de água disponível pelo método da panela de Richards (Teixeira et al., 2017).

Os perfis e amostras extras coletados foram classificados de acordo com o *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (Santos et al., 2018) até o quinto nível categórico do SiBCS.

Determinações físico-hídricas de campo

As determinações físico-hídricas de campo foram realizadas nos locais de descrição e coleta de perfis de solos em trincheiras. As determinações de condutividade hidráulica (Ks) saturada foram realizadas utilizando-se o permeâmetro de Gelpi (Soto et al., 2009), em duas profundidades: na camada superficial e na camada de menor permeabilidade estimada pela descrição e avaliação morfológica do perfil. Foram realizadas três repetições de condutividade hidráulica através do permeâmetro de Guelph na camada superficial e na camada identificada pela descrição morfológica como a de menor condutividade estimada.

A taxa de infiltração estabilizada (TIE) foi determinada através do método de Cornell (Ramos et al., 2023), com três repetições em cada local de descrição e coleta de perfis.

Processamento e mapeamento digital de solos

Harmonização dos dados

Na realização do mapeamento digital de classes de solos e de atributos, foi conduzida a harmonização dos dados geoespaciais, etapa crítica,

obrigatória e anterior à modelagem, visto que a consistência espacial e estatística das covariáveis é condição essencial para que os algoritmos produzam estimativas robustas e comparáveis (McBratney et al., 2003).

Na harmonização espacial, todas as camadas de informação foram padronizadas em um único Sistema de Referência de Coordenadas, assegurando a integridade geométrica e espacial dos dados. As covariáveis utilizadas foram obtidas de múltiplas fontes com escalas cartográficas e temáticas distintas — como Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivadas topográficas (atributos do terreno), mapas de litologia, geomorfologia e clima — e foram harmonizadas para garantir resolução espacial e extensão territorial uniformes. Esse processo assegurou que cada ponto amostral estivesse associado ao conjunto completo de covariáveis, possibilitando análises integradas e comparáveis.

Na harmonização pedológica, os resultados de atributos como areia, argila, carbono orgânico, saturação por bases (valor V) e capacidade de troca catiônica foram padronizados nas profundidades de 0–20 cm, 20–60 cm, 60–80 cm, 80–100 cm e de 100–150 cm por meio de média ponderada, com vistas à comparação entre o conjunto de dados.

Assim, a harmonização dos dados, tanto espacial quanto da resolução geométrica e pedológica, representa não apenas uma etapa preliminar de organização, mas uma condição metodológica essencial para a robustez da modelagem preditiva em mapeamento digital de solos (Minasny; McBratney, 2016).

Modelagem preditiva

Para a modelagem preditiva, foram utilizadas técnicas de aprendizado de máquina. Inicialmente, um grande espectro de covariáveis é apresentado ao modelo, incluindo variáveis categóricas e contínuas, totalizando 87 covariáveis. Todavia, mesmo quando possuem alta variância, covariáveis fortemente correlacionadas carregam informações redundantes, aumentando a complexidade do modelo sem uma melhoria significativa no desempenho preditivo. Além disso, covariáveis altamente correlacionadas podem comprometer a análise da importância dos preditores, especialmente em modelos baseados em árvores de decisão, como Random Forest, utilizado nesse trabalho.

Vale registrar que, em um conjunto de covariáveis correlacionadas, uma variável pode ser sucessivamente substituída por outra durante o treinamento do modelo, reduzindo a importância individual de cada preditor, diminuindo a importância

calculada do grupo como um todo e prejudicando a eficiência do modelo.

No mapeamento da área do projeto foram adotadas algumas estratégias para tratar covariáveis altamente correlacionadas conforme sugerido e descrito por Fernandes-Filho et al. (2024).

Seleção das covariáveis

Para a seleção das covariáveis a serem utilizadas no modelo final, foi aplicado um conjunto de técnicas para evitar as limitações citadas anteriormente. Inicialmente, eliminaram-se as variáveis explicativas com variância 0 ou próxima de 0, como, por exemplo, `acc_distance_mínimo`; `hill_slope_index`; `valley_index` e `valley_depth`.

O segundo passo foi a análise de correlação de “Spearman” (Khaledian; Miller, 2020) entre as variáveis restantes por meio de uma matriz de correlação onde foram eliminadas as variáveis altamente correlacionadas ($r > 0,95$), como, por exemplo, `mde`, `slope_graus`, `directinsolation`, e `profile curvature`.

Elaboração do modelo

Foi utilizado o modelo de aprendizado de máquina Random Forest (Machado et al., 2019), incluindo todas as covariáveis, e avaliadas a sua importância, sendo eliminadas as de menor importância pelo uso da técnica de Recursive Feature Elimination (Chen et al., 2022).

Buscando estabelecer uma métrica média da qualidade da modelagem, foram realizadas 50 predições da modelagem, variando os subconjuntos de treino e teste, correspondendo a 80% e 20% do conjunto de dados de amostras de solos respectivamente, empregados tanto na modelagem de classes quanto na de atributos do solo.

Geração dos Mapas Preditos

Na geração do mapa predito de classe de solos, foram utilizadas todas as amostras dos pontos de coleta de solos, sem a individualização entre amostras de treino e teste. Na elaboração do mapa predito final em escala geométrica compatível com a escala cartográfica 1:100.000, foram realizados procedimentos de generalização cartográfica para que os mesmos possam ser harmonizados com estudos realizados no estado do Paraná. Nessa generalização, houve a eliminação de regiões mapeadas com menos de 450 células (30 x 30 m) equivalendo a aproximadamente 40 hectares.

Para os mapas preditos de atributos dos solos foram observados os valores médios de coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (MAE)

e raiz quadrada da média do erro ao quadrado (RMSE). As métricas apresentaram valores satisfatórios para todos os atributos; porém, como foram elaborados mapas preditos de vários atributos em diferentes profundidades, tais métricas não serão apresentadas, pois totalizam 30 tabelas contendo 50 repetições.

Todas as covariáveis derivadas do modelo digital de elevação foram processadas no software SAGA GIS Versão 9.4 (Conrad et al., 2025) embarcado na plataforma do software QGIS Versão 3.34 (QGIS Development Team, 2025).

O processamento para obtenção dos mapas preditivos foi realizado no software R (R Core Team, 2025), utilizando os pacotes Caret (Kuhn, 2008); terra: Spatial Data Analysis (Hijmans, 2025b); raster: Geographic Data Analysis and Modeling (Hijmans, 2025a); Classification and Regression by random Forest (Liaw; Wiener, 2002); openxlsx: Read, Write and Edit xlsx Files (Schauberger; Walker, 2025); e dplyr: A Grammar of Data Manipulation (Wickham et al., 2025).

Produtos do mapeamento digital de solos

No mapa predito elaborado em escala compatível 1:100.000 e apresentado em escala 1:250.000 (Santos et al., 1995), procedeu-se à eliminação de regiões menores que 450 células (30 x 30 m) que equivalem a cerca de 40 hectares, além da recomposição das unidades de mapeamento, conforme a Figura 11.

A seguir, é apresentada a legenda descritiva do primeiro componente das unidades de mapeamento (Tabela 1).

Na geração dos mapas de atributos do solo, nas camadas predefinidas de 0–20 cm, 20–40 cm, 40–75 cm, 75–100 cm e 100–150 cm para os teores de argila e areia, ambos em g/kg, e de 0–20 cm e 20–40 cm para os teores de Carbono, também em g/kg, foi utilizada a média aritmética das 50 predições realizadas pela modelagem, conforme Figuras apresentadas a seguir: teores de argila (Figuras 12, 13, 14, 15 e 16), teores de areia (Figuras 17, 18, 19, 20 e 21) e teores de carbono (Figuras 22 e 23).

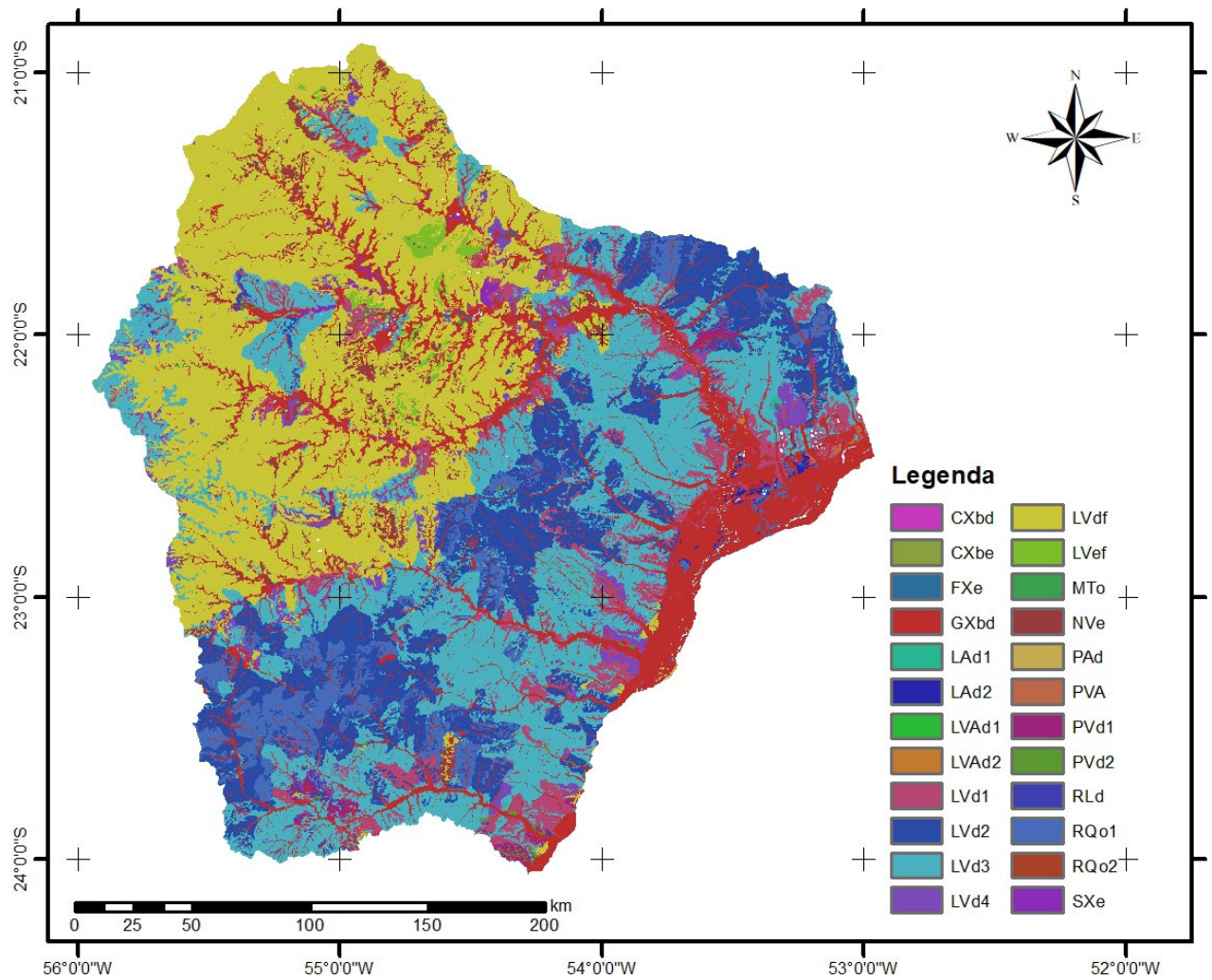


Figura 11. Mapa digital de classes de solos.

Tabela 1. Simbologia e unidades do mapa de classes de solos.

Símbolo	Descrição da classe de solo
CXbd	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico ou latossólico, textura média, A moderado
CXbe	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico, textura média, A moderado
FXe	PLINTOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico, textura média, A moderado
GXbd1	GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, textura arenosa/média, A moderado
LAd1	LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico, textura média, A moderado
LAd2	LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico, textura média, A moderado e fraco
LVA1	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, textura média, A moderado
LVA2	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico psamítico, textura média, A moderado
LVd1	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico argissólico ou típico, textura média ou argilosa, A moderado
LVd2	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico psamítico, textura média, A moderado
LVd3	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura média, A moderado
LVd4	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura muito argilosa e argilosa, A moderado
LVdf	LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, textura muito argilosa e argilosa, A moderado
LVef	LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico, textura muito argilosa e argilosa, A moderado
MTo	CHERNOSSOLO ARGILÚVICO Órtico típico, textura argilosa
NVdf	NITOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, textura muito argilosa, A moderado
PAd	ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico, textura média, A moderado
PVAd	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, textura arenosa/média e média, A fraco e moderado
PVd1	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico e arênico, textura arenosa/média, A fraco
PVd2	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura arenosa/média e média, A moderado
RLd	NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, textura média, A moderado
RQo1	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, A fraco e moderado
RQo2	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico, A fraco e moderado
SXe	PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico gleissólico e vértico, textura média/argilosa, A moderado

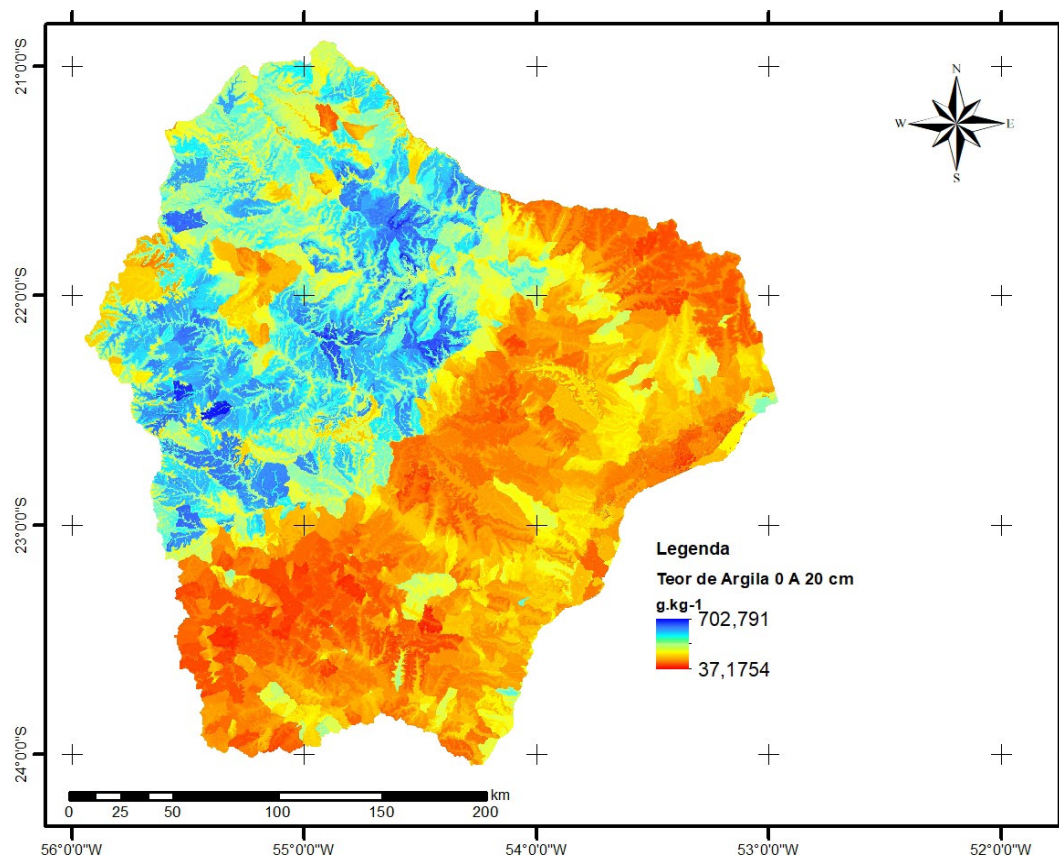


Figura 12. Mapa do teor de argila na camada de 20–40 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

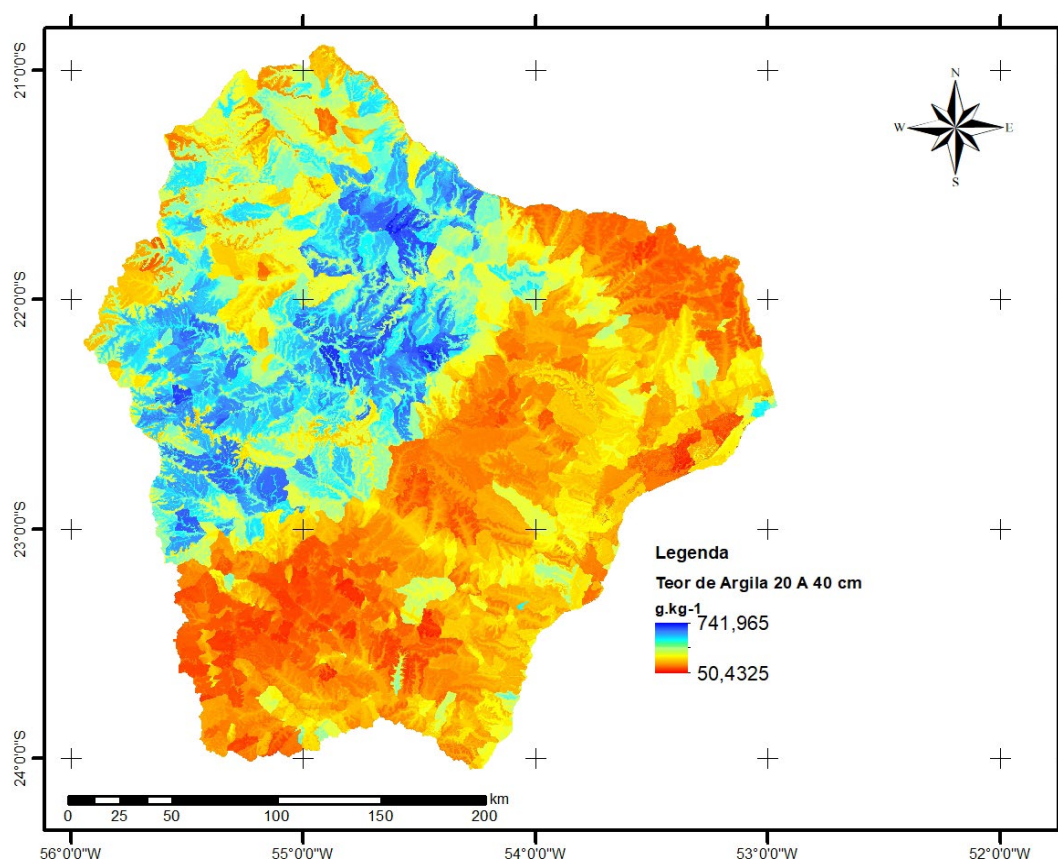


Figura 13. Mapa do teor de argila na camada de 20–40 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

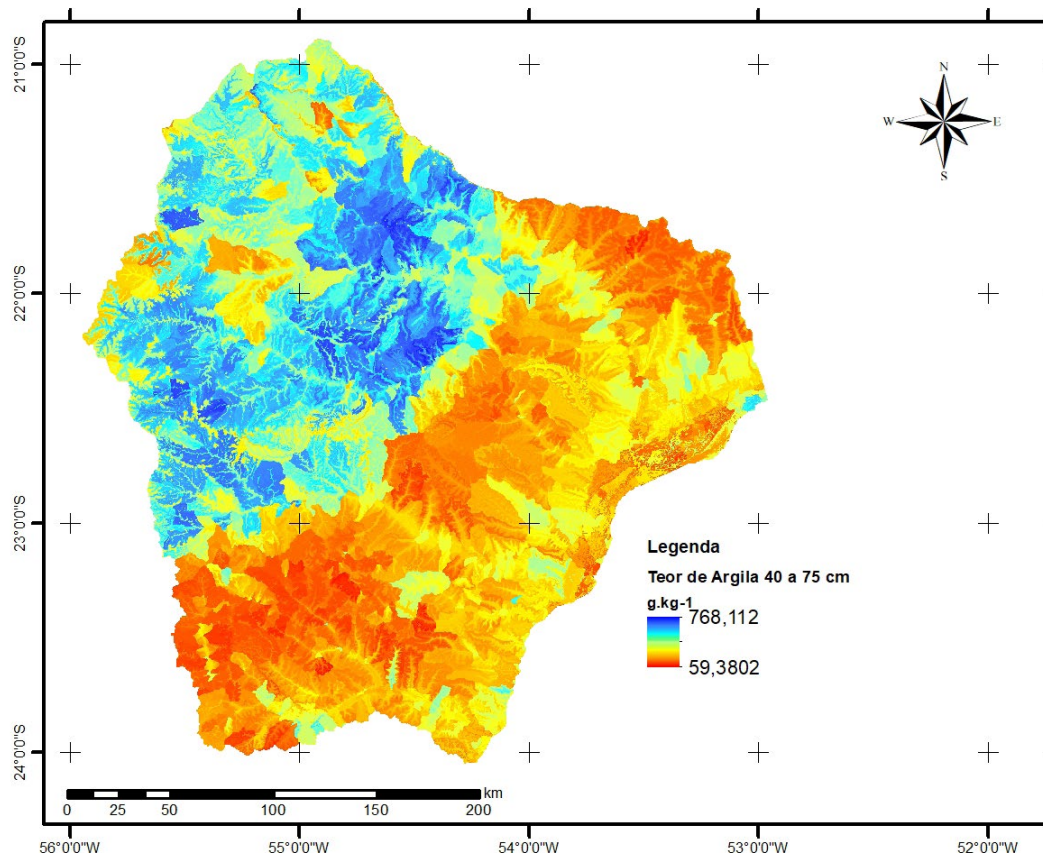


Figura 14. Mapa do teor de argila na camada de 40–75 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

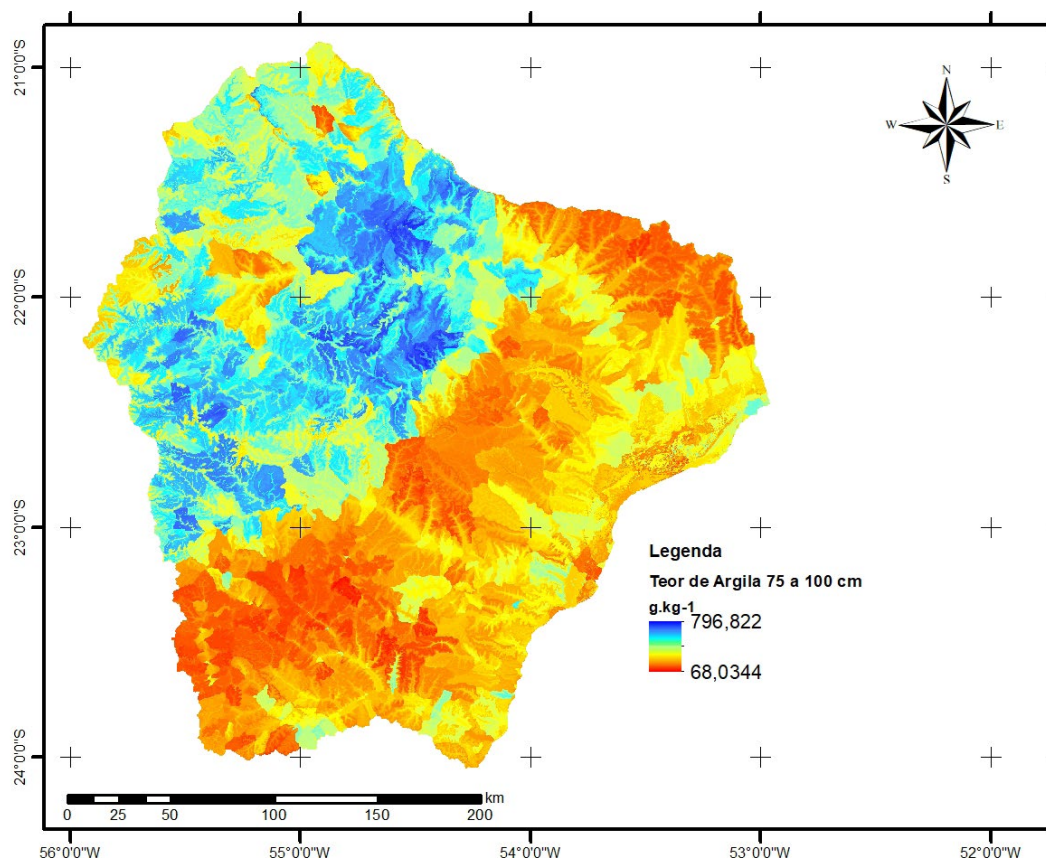


Figura 15. Mapa do teor de argila na camada de 75–100 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

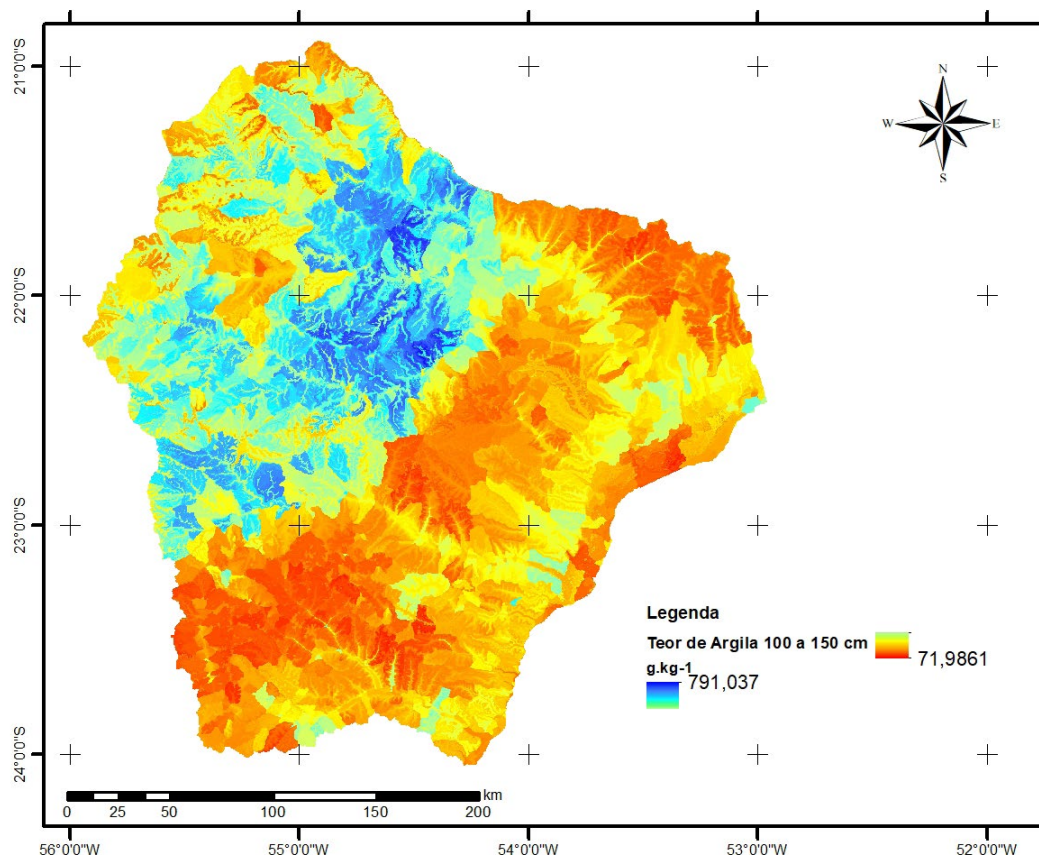


Figura 16. Mapa do teor de argila na camada de 100–150 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

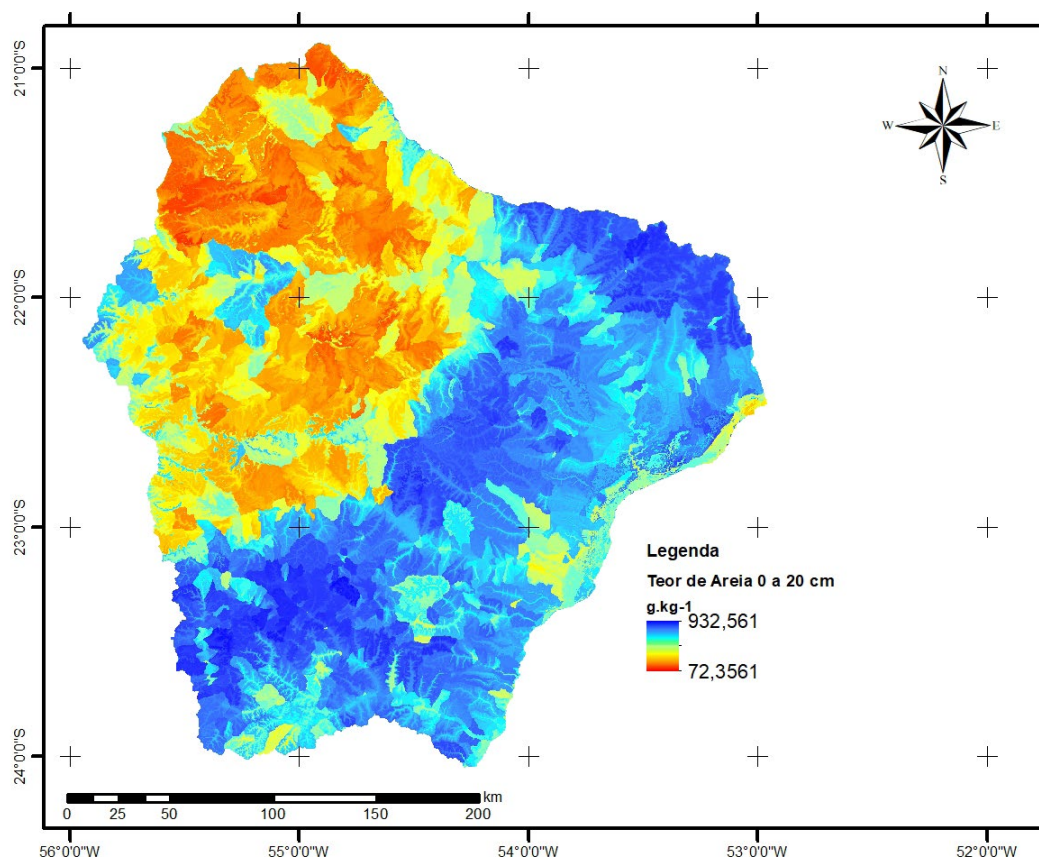


Figura 17. Mapa do teor de areia na camada de 0–20 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

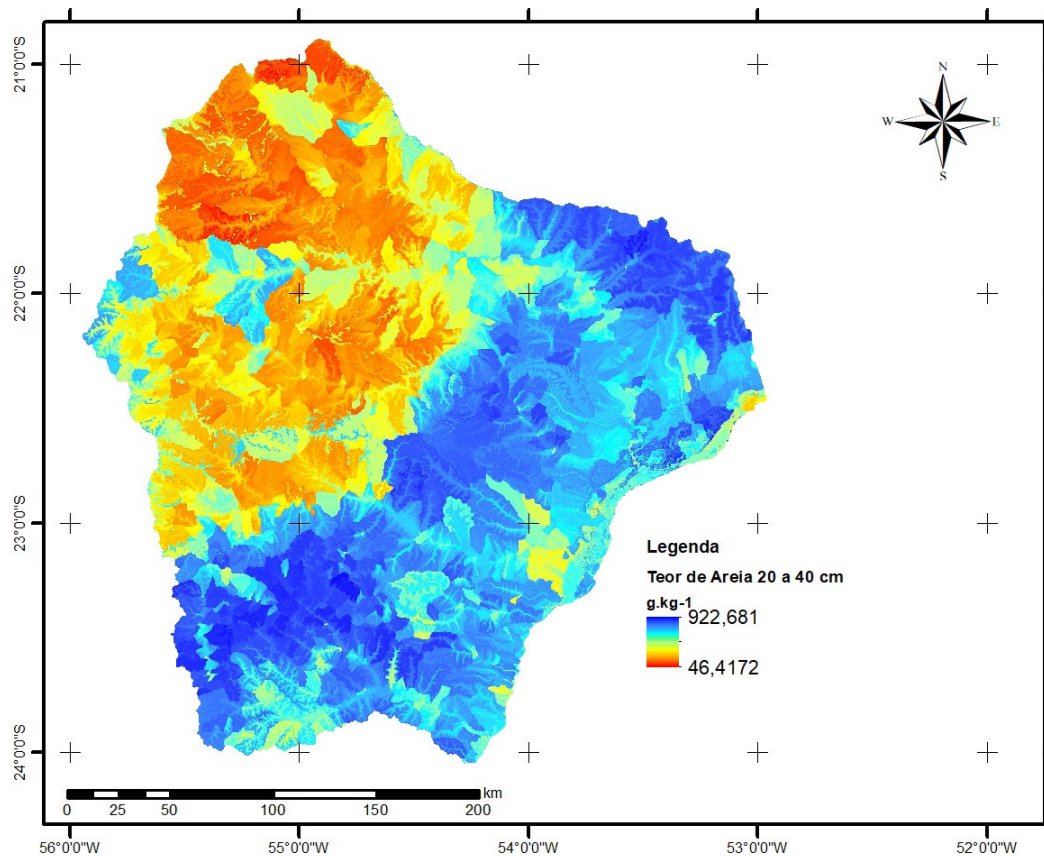


Figura 18. Mapa do teor de areia na camada de 20–40 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

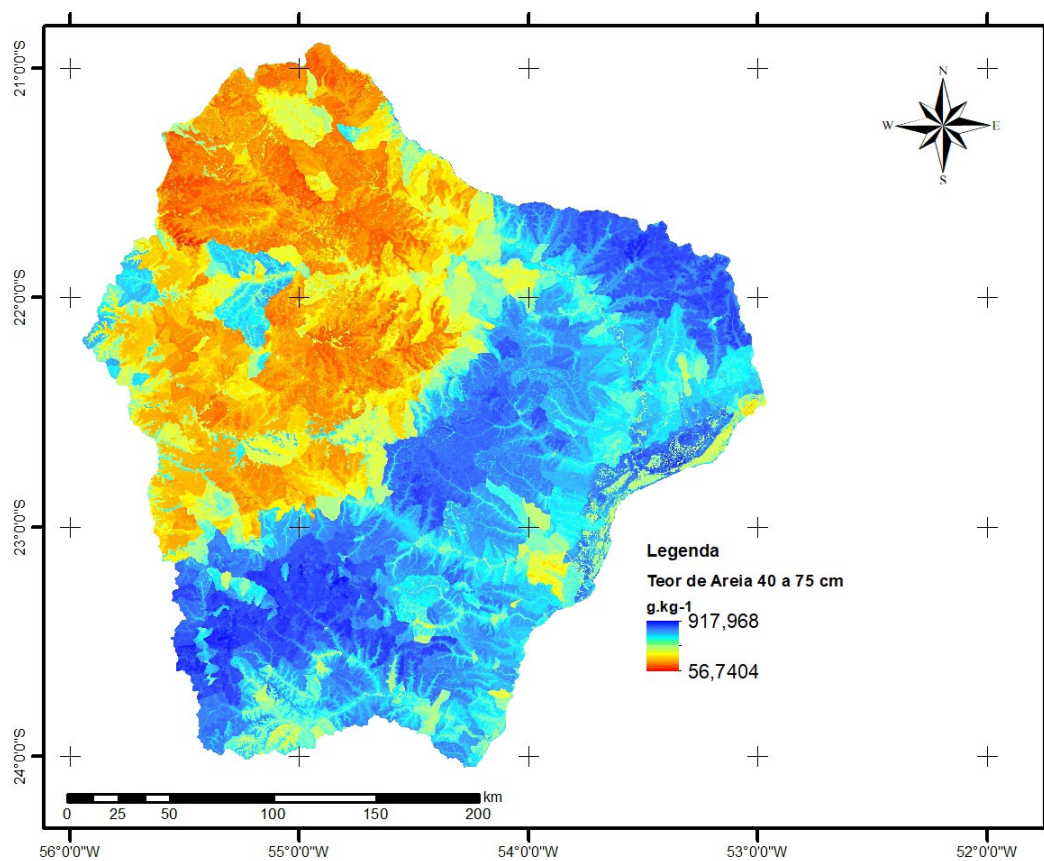


Figura 19. Mapa do teor de areia na camada de 40–75 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

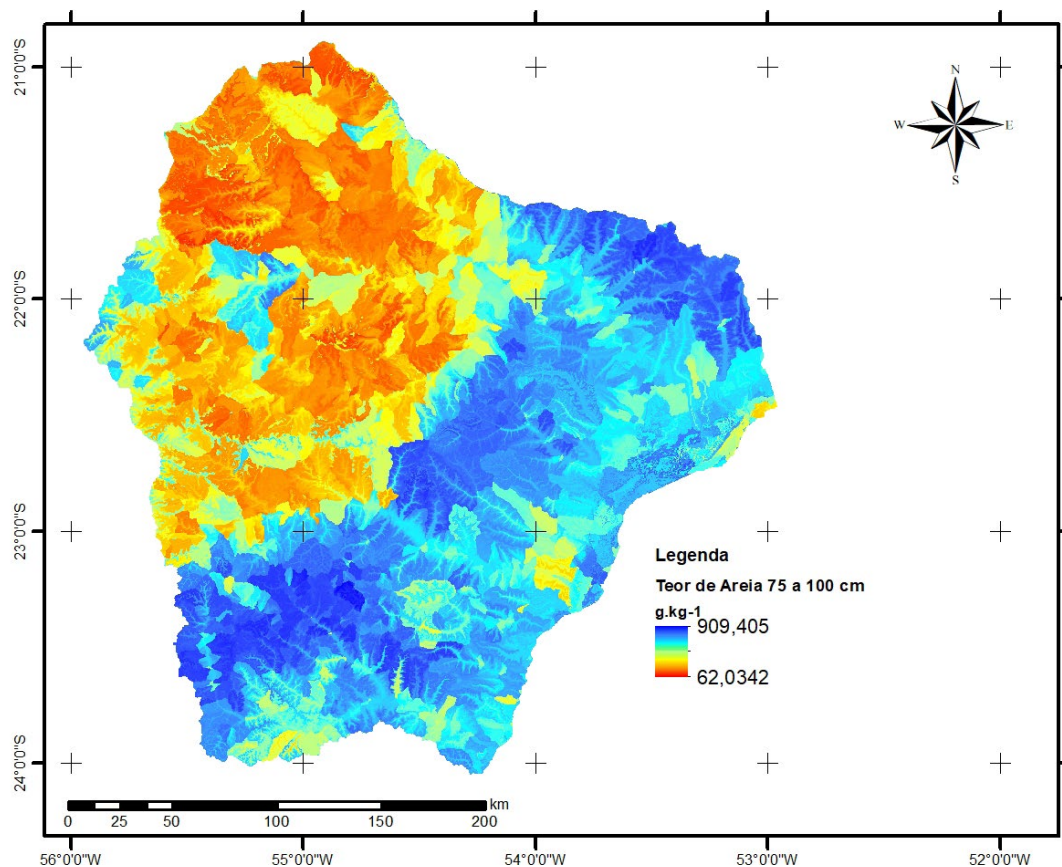


Figura 20. Mapa do teor de areia na camada de 75–100 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

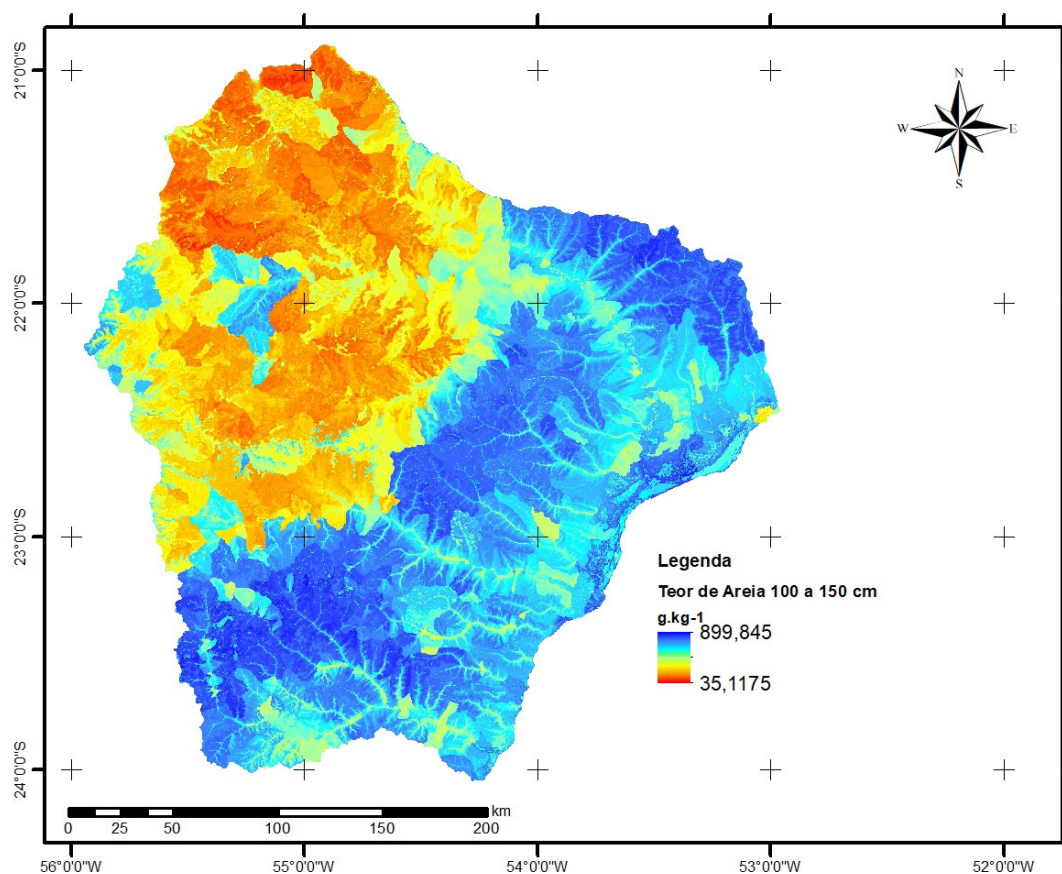


Figura 21. Mapa do teor de areia na camada de 100–150 cm do solo da área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

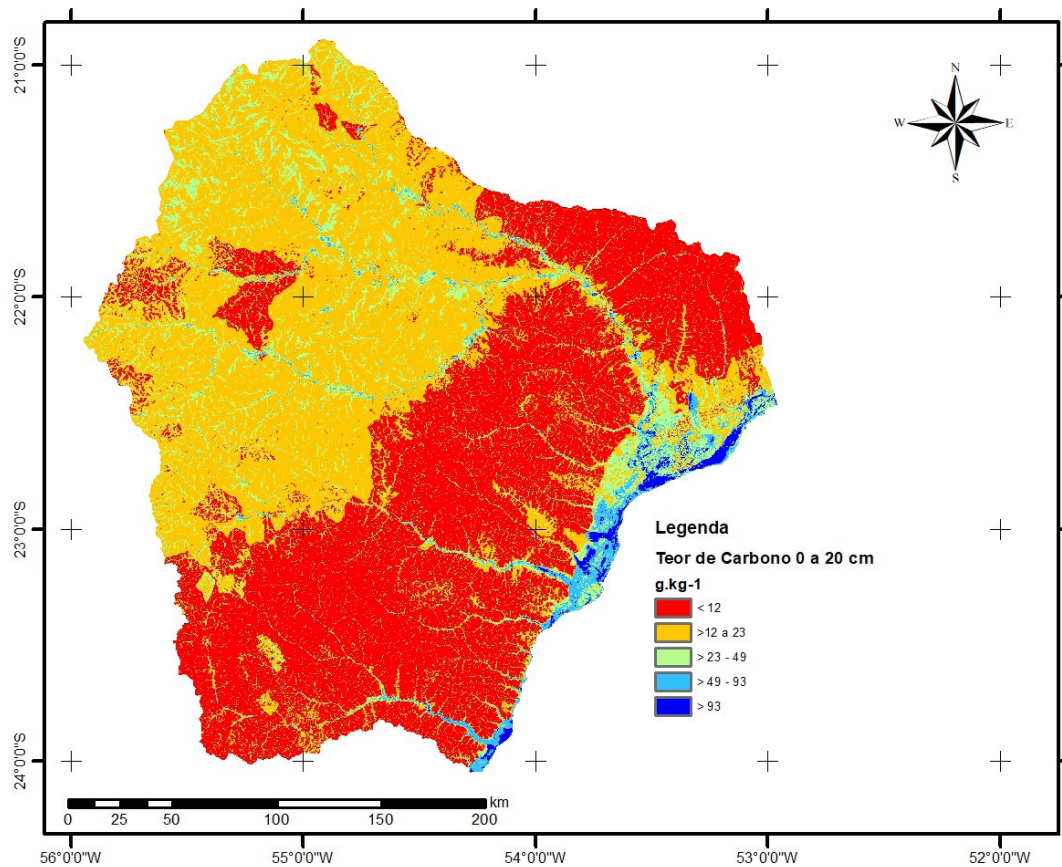


Figura 22. Mapa do teor de carbono no solo na camada de 0–20 cm na área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

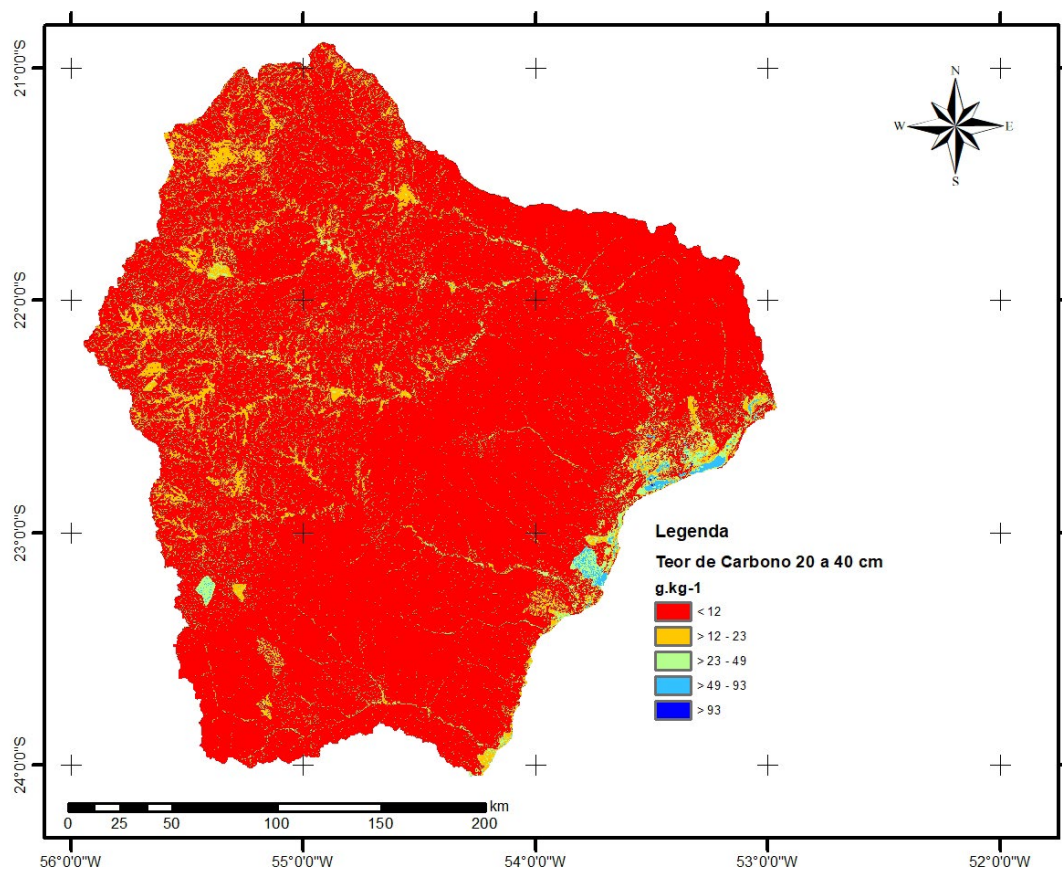


Figura 23. Mapa do teor de carbono no solo na camada de 20–40 cm na área de contribuição da Bacia Hidrográfica de Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul.

Validação dos resultados

O processamento realizado utilizou 75% das amostras para treino do modelo e 25% para teste.

Na avaliação do mapa predito de classes de solos, foram utilizados os parâmetros médios de índice Kappa (Cohen, 1960) e Acurácia Global

(Congalton; Green, 2009), com resultados entre 0,45 e 0,55, com incerteza baixa e média em 90% da área estudada.

Nos mapas de atributos teor de argila, areia e carbono, todos em g/kg, foram utilizados os valores médios de 50 repetições do modelo, apresentando a seguinte estatística básica (Tabela 2).

Tabela 2. Índices estatísticos de desempenho (RMSE, R^2 e MAE) da modelagem preditiva dos atributos areia, argila e carbono orgânico para diferentes profundidades.

Profundidade (cm)	RMSE RFE treino			RMSE teste		
	Areia	Argila	C	Areia	Argila	C
0–20	191,15	154,69	18,29	191,76	156,70	18,30
20–40	194,78	164,21	9,32	195,11	165,44	9,23
40–75	186,00	170,00	-	187,00	172,00	-
75–100	183,00	171,00	-	184,00	173,00	-

Profundidade (cm)	R2 treino			R2 teste		
	Areia	Argila	C	Areia	Argila	C
0–20	0,60	0,49	0,15	0,60	0,47	0,17
20–40	0,58	0,49	0,09	0,58	0,48	0,10
40–75	0,61	0,49	-	0,61	0,48	-
75–100	0,61	0,49	-	0,61	0,47	-

Profundidade (cm)	MAE treino			MAE teste		
	Areia	Argila	C	Areia	Argila	C
0–20	133,70	113,32	7,04	132,55	112,58	6,96
20–40	137,91	119,91	3,82	136,25	119,10	3,78
40–75	133,00	126,00	-	132,00	125,00	-
75–100	131,00	126,00	-	130,00	125,00	-

Conclusão

A distribuição dos solos na área estudada é fortemente controlada pelo relevo, tornando as covariáveis geomorfológicas os principais preditores do modelo. Os resultados confirmam que o conhecimento pedológico continua sendo um componente indispensável do mapeamento digital de solos, tanto na construção e seleção dos atributos das bases de dados quanto na interpretação e validação dos produtos finais.

A aplicação integrada das técnicas de Mapeamento Digital de Solos, associada ao delineamento

amostral por meio do método Conditioned Latin Hypercube Sampling (cLHS), mostrou-se eficiente para representar a variabilidade ambiental da área de contribuição da UHE Itaipu no estado de Mato Grosso do Sul. A utilização de covariáveis relacionadas ao relevo, material de origem, vegetação e demais atributos ambientais, combinada com dados legados e novas observações de campo, possibilitou a construção de uma base de dados pedológicos robusta, contemplando 175 perfis e 306 amostras extras. Os resultados obtidos permitiram a geração de um mapa digital de classes de solos compatível com a escala 1:100.000, representando adequadamente os principais padrões de distribuição dos

solos da região e evidenciando a forte relação entre os fatores de formação dos solos e os compartimentos geoambientais identificados.

Os modelos preditivos desenvolvidos apresentaram desempenho satisfatório para o mapeamento dos atributos do solo, com destaque para os teores de areia e argila em diferentes profundidades, cujas métricas de validação demonstraram estabilidade entre os conjuntos de treinamento e teste. Da mesma forma, o mapa digital de classes de solos apresentou índices de acurácia compatíveis com estudos conduzidos em extensas áreas territoriais e elevada diversidade ambiental. Os produtos gerados constituem uma importante base de informações para estudos hidrológicos, planejamento ambiental, conservação do solo e da água e apoio à tomada de decisão na gestão dos recursos naturais da área de influência da UHE Itaipu, contribuindo para o aprimoramento de modelos hidrológicos e para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis na região.

Referências

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, Dec. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ANJOS, L. H. C. dos; KER, J. C.; SHIMIZU, S. H.; PEREIRA, M. G.; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, V. A. de. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 8. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2025. 156 p.
- CARVALHO JUNIOR, W. de; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B.; CHAGAS, C. da S.; VASQUES, G. M.; PEREIRA, N. R.; MACEDO, J. R. de; DART, R. de O. **Desenho amostral de solos na presença de covariáveis e cLHS para execução do mapa de solos de Mato Grosso do Sul**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. 9 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 80). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149159>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- CARVALHO JUNIOR, W. de; CHAGAS, C. da S.; MUSELLI, A.; PINHEIRO, H. S. K.; PEREIRA, N. R.; BHERING, S. B. Método do hipercubo latino condicionado para a amostragem de solos na presença de covariáveis ambientais visando o mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 2, p. 386-396, mar./abr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200003>.
- CHAGAS, C. da S.; CARVALHO JUNIOR, W. de; BHERING, S. B.; TANAKA, A. K.; BACA, J. F. M. Estrutura e organização do sistema de informações georreferenciadas de solos do Brasil (Sigsolos - versão 1.0). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 5, p. 865-876, out. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000500009>.
- CHAGAS, C. da S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. 2006. 223 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/338887>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- CHEN, Y.; MA, L.; YU, D.; ZHANG, H.; FENG, K.; WANG, X.; SONG, J. Comparison of feature selection methods for mapping soil organic matter in subtropical restored forests. *Ecological Indicators*, v. 135, 108545, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108545>.
- COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960. DOI: <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 183 p.
- CONRAD, O.; BECHT, M.; BÖHNER, J.; CHAPLOT, V.; GALLI, M. **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA GIS)**. Versão 9.4. 2025. Disponível em: <http://www.saga-gis.org>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- ESRI. **ArcGIS Field Maps**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2025a. Software. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-field-maps/overview>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- ESRI. **ArcGIS Survey123**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2025b. Software. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-survey123/overview>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- HIJMANS, R. **Raster**: geographic data analysis and modeling. R package version 3.6-32. 2025a. Disponível em: <https://rspatial.org/raster>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- FERNANDES-FILHO, E. I.; MOQUEDACE, C. M.; PEREIRA, L. F.; VELOSO, G. V.; CARVALHO JUNIOR, W. Methods and challenges in digital soil mapping: applied modelling with R examples. In: CARVALHO JUNIOR, W.; PINHEIRO, H. S. K.; CEDDIA, M. B.; VALLADARES, G. S. (ed.). **Pedometrics in Brazil**. Cham: Springer, 2024. p. 263-283. (Progress in Soil Science). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-64579-2_19.

HIJMANS, R. **Terra**: spatial data analysis. R package version 1.8-64. 2025b. Disponível em: <https://github.com/rspatial/terra>. Acesso em: 6 jul. 2026.

IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2004. 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Disponível em: https://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf. Acesso em: 6 jul. 2026.

KHALEDIAN, Y.; MILLER, B. A. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. **Applied Mathematical Modelling**, v. 81, p. 401-418, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.12.016>.

KUHN, M. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v. 28, n. 5, p. 1-26, 2008. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>.

LACERDA FILHO, J. V. de; BRITO, R. S. C. de; SILVA, M. da G. da; OLIVEIRA, C. C. de; MORETON, L. C.; MARTINS, E. G.; LOPES, R. da C.; LIMA, T. M.; LARIZZATTI, J. H.; VALENTE, C. R. **Geologia e recursos minerais do estado de Mato Grosso do Sul**: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado de Mato Grosso do Sul. Campo Grande: CPRM, 2006. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10217>. Acesso em: 6 jul. 2026.

LIAW, A.; WIENER, M. Classification and regression by randomForest. **R News**, v. 2/3, p. 18-22, Dec. 2002. Disponível em: <https://journal.r-project.org/articles/RN-2002-022/RN-2002-022.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2026.

MACHADO, D. F. T.; SILVA, S. H. G.; CURTI, N.; MENEZES, M. D. de. Soil type spatial prediction from Random Forest: different training datasets, transferability, accuracy and uncertainty assessment. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 3, p. 243-254, maio/jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0300>.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral. **Macrozoneamento geoambiental do estado de Mato Grosso do Sul**. Campo Grande: SEPLAN-MS, 1989. 242 p. Disponível em: https://www.servicos.ms.gov.br/semade_download/Macrozoneamento%20Geoambiental%20de%20MS/Macrozoneamento%20Geoambiental%20de%20MS.pdf. Acesso em: 6 jul. 2026.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1/2, p. 3-52, Nov. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).

MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS, H. G. dos; DART, R. de O.; PARES, J. G. **Mapeamento digital de classes de solos no estado do Rio de Janeiro**. Rio

de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 29 p. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 119). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/339472>. Acesso em: 6 jul. 2026.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 9, p. 1378-1388, Nov. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Digital soil mapping: a brief history and some lessons. **Geoderma**, v. 264, pt. B, p. 301-311, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Latin hypercube sampling as a tool for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (ed.). **Digital soil mapping**: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007. cap. 12, p. 153-165. (Developments in soil science, v. 31). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31012-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31012-4).

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS geographic information system**. Open Source Geospatial Foundation Project. Versão 3.34. 2025. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 6 jul. 2026.

RAMOS, J. C.; SPAGNOLLO, E.; SCHMIDT, F. Infiltração de água no solo medida com simulador de chuva e infiltrômetro de Cornell. **Agropecuária Catarinense**, v. 36, n. 2, p. 26-30, ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.52945/rac.v36i2.1383>.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 6 jul. 2026.

ROUDIER, P.; HEWITT, A. E.; BEAUDETTE, D. E. A conditioned Latin hypercube sampling algorithm incorporating operational constraints. In: MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B. (ed.). **Digital soil assessments and beyond**: proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 227-232. DOI: <https://doi.org/10.1201/b12728>.

SANTOS, H. G. dos; HOCHMULLER, D. P.; CAVALCANTI, A. C.; REGO, R. S.; KER, J. C.; ACHA PANOSO, L.; AMARAL, J. A. M. do. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 116 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330133>. Acesso em: 6 jul. 2026.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J.

C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 6 jul. 2026.

SCHAUBERGER, P.; WALKER, A. **Openxlsx**: read, write and edit xlsx files. R package version 4.2.8. 2025. Disponível em: <https://github.com/ycphs/openxlsx>. Acesso em: 6 jul. 2026.

SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. Análise do método do permeâmetro de Guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada.

Águas Subterrâneas, v. 23, n. 1, p. 137-152, 2009. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v23i1.17004>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Acesso em: 6 jul. 2026.

WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K.; VAUGHAN, D. **Dplyr**: a grammar of data manipulation. R package version 1.1.4. 2025. Disponível em: <https://dplyr.tidyverse.org>. Acesso em: 6 jul. 2026.