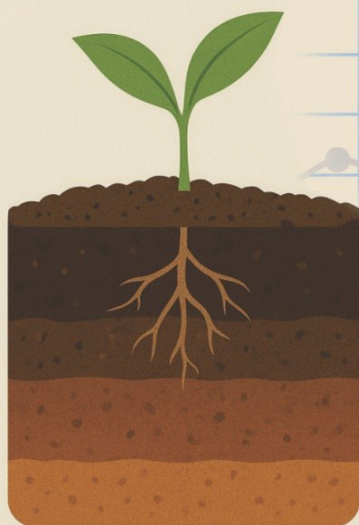


Rio de Janeiro, RJ / Novembro, 2025

Avanços em mapeamento e gestão de solos

Uma abordagem integrada para
o desenvolvimento sustentável
da agricultura brasileira



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

ISSN 1517-2627 / e-ISSN 2966-2443

Documentos 250

Novembro, 2025

Avanços em mapeamento e gestão de solos

**Uma abordagem integrada para o desenvolvimento
sustentável da agricultura brasileira**

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Silvio Barge Bhering

Amaury de Carvalho Filho

Maurício Rizzato Coelho

Ademir Fontana

José Francisco Lumbreras

Etelvino Henrique Novotny

Wenceslau Geraldes Teixeira

Daniel Vidal Pérez

Rachel Bardy Prado

Ana Paula Dias Turetta

Gustavo de Mattos Vasques

Embrapa Solos

Rio de Janeiro, RJ

2025

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024.
Jardim Botânico.
Rio de Janeiro, RJ
22460-000
www.embrapa.br/solos
www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê Local de Publicações

Presidente

Cláudia Pozzi Jantalia

Secretário-executivo

Marcos Antônio Nakayama

Membros

*Bernadete da Conceição Carvalho
Gomes Pedreira, David Vilas Boas
de Campos, Evaldo de Paiva Lima,
Helga Restum Hissa, José Francisco
Lumbreras, Joyce Maria Guimarães
Monteiro, Lucia Raquel Queiroz Pereira
da Luz, Maurício Rizzato Coelho e
Wenceslau Geraldes Teixeira*

Edição executiva

Marcos Antônio Nakayamal

Revisão de texto

Marcos Antônio Nakayama

Normalização bibliográfica

Luciana Sampaio de Araujo

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Alexandre Abrantes Cotta de Mello

Ilustração da capa

Eduardo Guedes Godoy

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

Avanços em mapeamento e gestão de solos : uma abordagem integrada para o desenvolvimento sustentável da agricultura brasileira / Maria de Lourdes Mendonça-Santos ... [et al.]. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2025.

PDF (70 p.) : il. color. — (Documentos / Embrapa Solos, eISSN 2966-2443 ; 250).

1. Reconhecimento do Solo. 2. Mapa. 3. Sensoriamento Remoto. I. Mendonça-Santos, Maria de Lourdes. II. Bhering, Silvio Barge. III. Carvalho Filho, Amaury de. IV. Coelho, Maurício Rizzato. V. Fontana, Ademir. VI. Lumbreras, José Francisco. VII. Novotny, Etelvino Henrique. VIII. Teixeira, Wenceslau Geraldes. IX. Perez, Daniel Vidal. X. Prado, Rachel Bardy. XI. Turetta, Ana Paula Dias. XII. Vasques, Gustavo Mattos. XIII. Embrapa Solos. XIV. Série.

CDD (21. ed.) 631.4

Autores

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Ciência do Solo e Geomática, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Silvio Barge Bhering

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

Amaury de Carvalho Filho

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

Maurício Rizzato Coelho

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

Ademir Fontana

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

José Francisco Lumbreras

Engenheiro-agrônomo, doutor em Planejamento e Gestão Ambiental, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Etelvino Henrique Novotny

Agrônomo, doutor em Química, Pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Wenceslau Gerales Teixeira

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

Daniel Vidal Pérez

Agrônomo, doutor em Química Analítica, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Rachel Bardy Prado

Bióloga, doutora em Ciências da Engenharia Ambiental, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Ana Paula Dias Turetta

Geógrafa, doutora em Ciências do Solo, pesquisadora 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

Apresentação

Esta publicação apresenta os avanços e resultados apoiados pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), via Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 396/2020, cujo objetivo foi impulsionar o conhecimento e a estruturação inicial da gestão de solos no Brasil, com pesquisas em tecnologias inovadoras em mapeamento digital, pedometria e análise de solos, alinhadas aos princípios da química verde. O mapeamento digital de solos utiliza ferramentas computacionais e geotecnologias para criar representações detalhadas dos tipos e propriedades do solo; já a pedometria refere-se ao uso de métodos estatísticos para prever propriedades do solo, enquanto a química verde busca processos menos poluentes e mais sustentáveis.

Entre os resultados concretos alcançados, destacam-se o desenvolvimento de mapas digitais de solos e a implementação de novas metodologias que reduziram o tempo de análises. As informações geradas ajudaram na estruturação do PronaSolos e fortaleceram a governança de dados e informações pedológicas.

Esses avanços têm impacto direto para agricultores, pesquisadores e gestores públicos: permitem que agricultores tomem decisões mais precisas sobre o manejo do solo, aumentando a produtividade e reduzindo custos com insumos; pesquisadores passam a contar com dados mais detalhados para o estudo de ecossistemas; gestores públicos podem planejar políticas agrícolas e ambientais com base em informações técnicas confiáveis.

Destaca-se a importância desse apoio do Mapa, por meio do TED 396/2020, para a produção de serviços ecossistêmicos, a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental. O documento foi dividido em duas partes, evidenciando as duas metas principais apoiadas pelo referido TED: Meta 1 – Métodos e Tecnologias de Mapeamento de Solos; e Meta 2 – Integração e Interpretação da Informação de Solos (Desenvolvimento e Difusão). Vale destacar que o apoio do Mapa, via TED 396/2020, foi fundamental para iniciar essas pesquisas estruturais, que

contribuirão para o avanço do conhecimento de solos e, consequentemente, do programa PronaSolos.

Além disso, 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 garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças do clima, às condições meteorológicas extremas, às secas, às inundações e a outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo.

Marisa Teixeira Mattioli

Chefe-Geral em exercício da Embrapa Solos

Sumário

Introdução	9
Objetivos	12
Descrição geral das metodologias propostas a serem detalhadas	13
Apresentação detalhada das entregas de cada meta proposta	14
Meta 1 – Métodos e Tecnologias de Mapeamento de Solos	14
Meta 1.1 – Desenvolver ou adaptar tecnologias de mapeamento digital e aplicação da pedometria para geração de dados que possibilitem a identificação dos solos de forma rápida, precisa, especializada e detalhada na execução de levantamento e mapeamento de solos em diferentes escalas e para diversos fins	14
Meta 1.2 – Desenvolver métodos inovadores de análise do solo a partir de técnicas de análises que consumam menos reagente, não destrutivas, rápidas e diretas, tanto em campo como laboratorial e que considerem a variabilidade de solos, ambientes e condições específicas de utilização e manejo	21
Meta 1.3 – Implementar o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), compreendendo atualizações e correções, inclusão de novas classes, difusão, validação e prática de uso do sistema no país	33
Meta 2 – Integração e Interpretação da Informação em Solos (Desenvolvimento e Difusão)	39

Meta 2.1 – Desenvolver novas ferramentas de análise, caracterização espacial e de avaliação da qualidade do solo na direção da avaliação das potencialidades, vulnerabilidades e estado da qualidade dos sistemas agrícolas.	39
Meta 2.2 – Desenvolver funções do uso a partir da avaliação integrada da sustentabilidade, envolvendo conceitos de multifuncionalidade da agricultura, serviços ecossistêmicos e funções da paisagem	41
Meta 2.3 – Selecionar e validar indicadores de sustentabilidade, aprimoramento e adequação de métodos e critérios de zoneamentos agroambientais e de planejamento de utilização e ocupação dos solos na definição de zonas de manejo	44
Meta 2.4 – Desenvolver ou inovar métodos de análise da degradação dos solos e de estratégias de reinserção destes solos ao sistema agrícola	47
Considerações finais	55
Referências	57

Introdução

O solo é um recurso natural fundamental para a agricultura, a segurança alimentar e a estabilidade ambiental, desempenhando papel essencial nos processos biogeoquímicos, como armazenamento de água, reciclagem de nutrientes, sequestro de carbono e suporte à biodiversidade. No entanto, sua degradação, intensificada pelo manejo inadequado e pela falta de informações precisas, compromete sua sustentabilidade. Estimativas da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) indicam que, anualmente, bilhões de toneladas de solo são perdidas por erosão, colocando em risco a capacidade produtiva global. Com a projeção de 9,6 bilhões de pessoas em 2050, será necessário um aumento de 60% na produção de alimentos, tornando o solo um recurso ainda mais estratégico.

A disponibilidade de solos férteis no mundo é limitada e submetida a pressões crescentes. O Brasil, com seu vasto território e grande potencial agrícola, dispõe de cerca de 70 a 90 milhões de hectares aptos ao cultivo sem necessidade de desmatamento, destacando-se como peça-chave na segurança alimentar global. Entretanto, o conhecimento sobre seus solos ainda é insuficiente, demandando investimentos em levantamento, mapeamento e conservação para garantir um planejamento eficiente do uso da terra.

Desde a década de 1950, o Brasil tem empreendido esforços no mapeamento sistemático dos solos, inicialmente sob a coordenação da Comissão de Solos do Ministério da Agricultura, que foi continuado pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, hoje Embrapa Solos. As iniciativas de mapeamento resultaram em escalas generalizadas, como o Projeto Radambrasil (1:1.000.000) e levantamentos regionais (1:600.000 a 1:400.000), abrangendo aproximadamente 35–40% do território nacional com escalas mais detalhadas (1:100.000 a 1:400.000). No entanto, a descontinuidade desses programas na década de 1980 gerou lacunas significativas, sobretudo nas escalas mais detalhadas

(menos de 5% do território está mapeado em escalas maiores ou iguais a 1:100.000), fundamentais para estabelecer estratégias de planejamento, zoneamentos e uso, manejo e conservação do recurso solo.

Com a descontinuidade do programa de mapeamento dos solos brasileiros na década de 1980, surgiram grandes lacunas de informação sobre o recurso solo, principalmente em escalas mais detalhadas, fundamentais para estabelecer estratégias de planejamento (zoneamentos) e de uso, manejo e conservação do recurso solo, comprometendo a sustentabilidade de sistemas de produção. Tiveram continuidade estudos, reconhecidos mundialmente, que permitiram acumular conhecimento e a compreensão do comportamento de solos tropicais e subtropicais. Os levantamentos e mapeamentos realizados foram muito importantes para o desenvolvimento do conhecimento dos nossos solos, mas não foram conclusivos em termos de detalhamento da informação e baixa cobertura do território, para realmente serem utilizados no planejamento e execução de projetos agrícolas e ambientais, definição de políticas públicas, como seguro rural, assentamentos agrícolas, zoneamentos agroecológicos, estudos de impactos e riscos ambientais em âmbito estadual (escala 1:100.000), municipal e de microbacias (escala semidetalhada de 1:25.000) e até para o planejamento de propriedades agrícolas (escala de detalhe de 1:10.000). A maioria desses planejamentos e políticas, com decisões importantes para o país, tem sido embasada em informações de solos em escalas inadequadas.

Em 2015, Ano Internacional do Solo, a Embrapa disponibilizou para a sociedade o Sistema de Informação de Solos Brasileiros¹, o qual contém hoje mais de 9 mil perfis de solos. Parece muito, mas esse valor representa apenas cerca de 1 perfil de solo a cada 1.000 km², distribuídos irregularmente no país, o que é muito pouco e insuficiente para a tomada de decisão em âmbito estadual,

(1) Disponível em: <https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>.

municipal e local. Além da escassez de dados e informações de solos em escala adequada, falta treinamento e capacitação para formar um novo contingente de especialistas em solos (o número de especialistas para desenvolver levantamentos e mapeamentos de solos é atualmente muito limitado). Faltava também, uma governança e mandato para normatizar, coordenar e executar trabalhos de levantamento, mapeamento, manejo e conservação de solos, além de investimentos do poder público para conhecer seu território em mais detalhe. Enfim, faltava uma voz unificada e com autoridade para melhor coordenar os diversos esforços realizados pelas instituições no país.

Diante disso, a Embrapa, com base em seu mandato e experiência histórica no estudo e levantamento/mapeamento de solos no Brasil, propôs a criação de um novo Programa Nacional de Solos para o país, o PronaSolos, com recursos específicos, a serem garantidos no orçamento da União, de modo a garantir sua continuidade. O Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos) atende à recomendação do TCU (Acórdão nº 1928/2019) e foi oficializado pelo Decreto nº 9.414/2018 (Brasil, 2018). Os objetivos do PronaSolos são elencados no art. 2º do Decreto 9.414/2018 (Brasil, 2018) e revisados pelo Decreto 10.269/2020 (Brasil, 2020): 1. Definição das áreas prioritárias e da agenda de trabalho para estudo de solos no Brasil; 2. Execução de levantamento de solos e de suas interpretações; 3. Criação de Plataformas Tecnológicas para estruturar e operacionalizar o Sistema Nacional de Informação de Solos, de acesso público; 4. Organização dos dados relacionados ao solo no sistema tratado no tópico anterior; 5. Implementação de inovações relacionadas ao levantamento de solos e temas correlatos.

As ações preliminares para a estruturação do PronaSolos foram realizadas mediante projeto especial da Diretoria da Embrapa, entre os anos de 2015/2016, liderado pela Embrapa Solos, com a participação de 22 unidades da Embrapa e 41 instituições públicas e privadas. Após a criação do PronaSolos, foram nomeados e instalados os Comitês Estratégico e Executivo pelo Decreto 10.269/2020 (Brasil,

2020). O Brasil, como um dos maiores produtores agrícolas do mundo, necessita de informações detalhadas sobre seus solos para garantir a sustentabilidade da produção e atender à crescente demanda global por alimentos. O Programa Nacional de Solos (PronaSolos) surge como uma política pública estratégica para suprir a lacuna de conhecimento sobre solos em escalas adequadas, permitindo o planejamento e a implementação de práticas de manejo e conservação eficazes. O lançamento da Plataforma PronaSolos foi realizado em 04/12/2020.

Foi nesse contexto, de fortalecer e apoiar a Embrapa Solos na estruturação do PronaSolos, que o apoio do Mapa, via TED 396/2020, foi negociado e apoiou diversas iniciativas (direta ou indiretamente), as quais produziram os resultados elencados neste documento.

Assim, resgatamos nesta publicação as iniciativas e desenvolvimentos científicos apoiados que visam fortalecer o PronaSolos, por meio do desenvolvimento de metodologias e tecnologias inovadoras para mapeamento e gestão de solos (TED 396/2020). Destacamos a importância do projeto para a geração de informações precisas e detalhadas, contribuindo para a agricultura de precisão, o zoneamento agroecológico e os serviços ecossistêmicos.

Objetivos

Este documento tem como objetivo apresentar as principais pesquisas e avanços apoiados pelo TED 396/2020, que consistiu em:

- Desenvolver e adaptar tecnologias de mapeamento digital e pedometria para a identificação rápida e precisa de solos em diferentes escalas;
- Desenvolver métodos inovadores de análise de solos, priorizando técnicas não destrutivas, rápidas e com menor consumo de reagentes, segundo o princípio da química verde;

- Integrar dados e informações de solos em plataformas tecnológicas para acesso público, fortalecendo o Sistema Nacional de Informação de Solos e o PronaSolos;
- Aplicar os conhecimentos gerados em estudos de caso, como o Zoneamento Agroecológico do Mato Grosso do Sul e bacias hidrográficas da Hidrelétrica de Itaipu.

Descrição geral das metodologias propostas a serem detalhadas

O conjunto de pesquisas aqui apresentado, apoiadas pelo TED 396/2020 e outros projetos, adotou uma abordagem multidisciplinar, combinando coleta de dados em campo, análises laboratoriais, processamento de dados geoespaciais e desenvolvimento de modelos e ferramentas computacionais.

As metodologias incluem:

- Mapeamento digital de solos: Utilização de sensoriamento remoto (imagens de satélite e radar), dados de campo e modelos de aprendizado de máquina para gerar mapas de atributos do solo em alta resolução espacial.
- Pedometria: Aplicação de técnicas estatísticas e geoestatísticas para modelar a variação espacial dos solos e otimizar a amostragem.
- Análises de laboratório: Desenvolvimento e adaptação de métodos de química verde para a análise de solos, visando reduzir o consumo de reagentes e a geração de resíduos.
- Desenvolvimento de ferramentas de coleta de dados em campo, com a criação de aplicativos para dispositivos móveis, para otimizar a coleta de dados e a navegação em campo.

Apresentação detalhada das entregas de cada meta proposta

As principais entregas, que são resultados obtidos durante o período de desenvolvimento e que estão relacionadas ao objeto do TED 396/2020, são aqui apresentadas, no escopo das duas grandes Metas estabelecidas em comum acordo:

- Meta 1. Métodos e Tecnologias de Mapeamento de Solos, com 3 produtos esperados.
- Meta 2. Integração e Interpretação da Informação em Solos (Desenvolvimento e Difusão), com 4 produtos esperados.

Meta 1 – Métodos e Tecnologias de Mapeamento de Solos

Meta 1.1 – Desenvolver ou adaptar tecnologias de mapeamento digital e aplicação da pedometria para geração de dados que possibilitem a identificação dos solos de forma rápida, precisa, espacializada e detalhada na execução de levantamento e mapeamento de solos em diferentes escalas e para diversos fins

O mapeamento digital de solos é uma alternativa para produzir mapas de atributos ou classes de solos (por exemplo, classes taxonômicas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) e dos seus atributos químicos, físicos, hídricos, morfológicos,

mineralógicos e biológicos, como nutrientes do solo (nitrogênio, fósforo e potássio) (Vasques; Benites, 2023), acidez (pH) (Vasques et al., 2021a), água disponível (Vasques et al., 2021b), densidade (Vasques et al., 2021c), teores de argila, silte e areia (Vasques et al., 2021d), capacidade de troca catiônica (Vasques et al., 2021e), salinidade (Vasques et al., 2021f), teor de carbono (Vasques et al., 2021g) e estoque de carbono do solo (Vasques et al., 2021h). Atualmente, a quantificação dos estoques de carbono do solo tem importância global, pois contribui para o entendimento da dinâmica de carbono no solo em contribuição às iniciativas globais de combate e mitigação às mudanças climáticas. Nesse contexto, os mapas de estoque de carbono produzidos pela Embrapa Solos (Vasques et al., 2021h) tiveram notícia publicada na página do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) (Rodrigues, 2021) e foram apresentados pelo presidente da Embrapa na Conferência das Partes de 2021 (COP26), dando destaque ao Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos).

O mapeamento digital de solos possui abordagens e ferramentas de análise espacial de dados que podem ser desenvolvidas e adaptadas a diferentes situações e contextos. Por isso, pode ser realizado em diferentes extensões geográficas e escalas espaciais, desde pequenas áreas (por exemplo, encostas, talhões agrícolas, experimentos controlados em parcelas) (Tavares et al., 2022; Vasques et al., 2022d) até grandes áreas (Ferreira et al., 2022), unidades da Federação inteiras (Bhering et al., 2023) e todo o território nacional (Vasques; Benites, 2023; Vasques et al., 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e, 2021f, 2021g, 2021h).

No mapeamento digital de solos, os dados obtidos em campo servem como variáveis-alvo a serem estimadas e mapeadas. Para auxiliar nas estimativas e no mapeamento, são usadas camadas de geoinformação que servem como variáveis preditoras, chamadas co-variáveis, em modelos para estimativa dos atributos do solo. No caso de mapeamentos de grandes extensões, as covariáveis podem ser derivadas de mapas (por exemplo, geológico, hidrológico), de sensores remotos orbitais (por exemplo, Landsat, MODIS, Sentinel) e de

planos de informação gerados a partir desses dados (por exemplo, mapa de uso e cobertura da terra e modelo digital de elevação).

Com apoio do TED 396/2020 e de outros projetos, como o PronaSolos/Finep, as metodologias de MDS foram adaptadas para as condições brasileiras, aplicadas em grandes extensões para geração de dados que possibilitem a identificação dos solos de forma rápida, precisa, espacializada e detalhada na execução de levantamento e mapeamento de solos em diferentes escalas e para diversos fins, a exemplo do conjunto de mapas de atributos químicos, físicos e hídricos do solo produzidos pela Embrapa Solos para todo o território nacional (Vasques et al., 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e, 2021f, 2021g, 2021h). Os mapas foram produzidos com alta resolução espacial (90 m) e em seis camadas até a profundidade de 2 m (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 e 100–100 cm), resultando em informação inédita para o país sobre a distribuição horizontal e vertical de diversos atributos do solo (teor e estoque de carbono, densidade, teores de argila, silte e areia, pH, capacidade de troca catiônica, água disponível e salinidade).

Dada a extensão continental do País e a grande diversidade de solos e ambientes, produzir esses mapas requereu desenvolver uma abordagem robusta, combinando diferentes métodos de regressão (lineares e não-lineares, paramétricos e não paramétricos) de maneira que, em conjunto, cada método contribuiu para explicar uma parte da variação do atributo-alvo do solo. Ao mesmo tempo, a combinação de métodos reduziu o erro global das estimativas, aumentando a precisão destas, evitando a geração de estimativas extremas e irreais (valores muito altos ou muito baixos do atributo do solo) e eliminando os artefatos espaciais indesejados porventura produzidos por um ou outro método, como, por exemplo, padrões retilíneos repetitivos e padrões granulares do tipo sal e pimenta. Esses mapas representam, nacionalmente, uma contribuição ao PronaSolos e, globalmente, uma contribuição à Aliança Mundial pelo Solo da FAO, sendo a Embrapa e o Mapa os responsáveis técnicos no Brasil pela geração desses mapas.

Outra adaptação de MDS realizada com o apoio do TED 396/2020 do Mapa e de outros projetos da Embrapa Solos foi o estudo de imagens de radar para o mapeamento dos teores de areia, silte e argila

do solo em uma área de 13.440 km² na Amazônia (Ferreira et al., 2022). Sabe-se que, em regiões com alta incidência de nuvens ao longo do ano, como é o caso da Amazônia e da Mata Atlântica, o uso de imagens multiespectrais (Landsat, MODIS, ASTER) é comprometido, pois as nuvens impedem que os sinais eletromagnéticos gerados pelo solo e pela vegetação, objetos de interesse para fins de mapeamento de solos, atinjam o sensor. Em outras palavras, as nuvens ficam visíveis nas imagens, impedindo a visão da vegetação e do solo abaixo delas. Ao contrário das imagens multiespectrais, imagens de radar não sofrem influência de nuvens, sendo excelentes alternativas de dados para regiões com alta cobertura de nuvens ao longo do ano. Contudo, as imagens de radar são mais difíceis de manusear e interpretar do que as imagens multiespectrais, pois necessitam de métodos de pré e pós-processamento exclusivos, mais complexos e que requerem maior expertise no tema. Para investigar esse tema e avaliar a utilidade e a dificuldade do uso de imagens de radar, um estudo de mapeamento dos teores de areia, silte e argila do solo foi realizado em uma área de 13.440 km² na Amazônia (Ferreira et al., 2022). No estudo, as imagens de radar contribuíram para o aumento da acurácia das estimativas dos teores de areia, silte e argila do solo em relação às estimativas desses atributos obtidas a partir de covariáveis somente de relevo. Contudo, a complexidade do processamento dessas imagens ainda impede a sua ampla adoção em projetos de mapeamento de solo, carecendo de mais estudos para avaliar o seu benefício frente à dificuldade de uso.

Para realizar o mapeamento digital de solos, a primeira etapa consiste na amostragem. Para isso, o delineamento amostral deve ser elaborado visando caracterizar a variação espacial do objeto sob estudo, bem como otimizar os recursos necessários para realizar as visitas de campo, as coletas e as análises das amostras de solo. Sendo assim, delineamentos amostrais otimizados e inteligentes, contendo menos pontos amostrais, porém com pontos representativos da variação espacial dos solos na área de estudo, foram propostos (Vasques et al., 2022d). Nesse estudo, 18 pontos amostrais foram distribuídos de maneira otimizada em três zonas homogêneas previamente delineadas em um talhão agrícola

de 72 ha (Vasques et al., 2022c), sendo alocados seis pontos em cada zona. Os atributos do solo medidos nesses 18 pontos foram comparados àqueles medidos em 72 pontos amostrais distribuídos em malha uniforme, sendo um ponto por hectare. Os 18 pontos amostrais reduziram em 75% (de 72 para 18) o número de pontos coletados, ao mesmo tempo em que captaram corretamente as médias e os padrões espaciais do teor de argila, do pH e dos teores de Ca, Mg e K trocáveis do solo. Essa abordagem representa uma redução de 75% dos custos de coleta e análise das amostras de solo, podendo ser adaptada para outras iniciativas em áreas agrícolas e mesmo em maiores extensões, com potencial de reduzir consideravelmente os custos de coleta e análise de laboratório de projetos de caracterização de solos.

Todavia, a utilização dessas novas técnicas e métodos de delineamento amostral apresenta um grande desafio: a perfeita e exata navegação até os pontos amostrais selecionados, que, em sua origem, era realizada com base em imagens de satélite e cartas planialtimétricas impressas. No intuito de superar esse desafio, foi necessário o desenvolvimento de um aplicativo para dispositivos móveis, em que todos os planos de informação pudessem ser integrados, sejam para suporte à navegação (rodovias federais, estaduais, vicinais, acessos, imagens de satélite, limite municipal, sede municipal, localidades, entre outros) ou planos de informação vinculados aos estudos técnicos (mapa de solos legados, pontos amostrais legados, mapas de declividade, litologia, uso atual, hidrografia e delineamento amostral). Tal aplicativo requer todo um planejamento de exibição e configuração dos planos amostrais, pois ele opera off-line, possuindo apenas o dispositivo de posicionamento global (GPS) em modo on-line. Essa tecnologia viabilizou a utilização dessas novas técnicas para delineamento amostral, ampliando a qualidade dos resultados obtidos e otimizando a atividade de aquisição de dados. Atualmente, no ambiente da Embrapa Solos, diversos projetos e suas atividades de pesquisa se utilizam dessa tecnologia. Essa tecnologia foi desenvolvida em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB), utilizando as ferramentas *Explorer* e atualmente *Field Maps* da Plataforma ArcGIS da ESRI. A Figura 1 apresenta exemplos das telas disponíveis nesse aplicativo.

Outra tecnologia desenvolvida no âmbito desses estudos foi o coletor de dados de solos, desenvolvido com a ferramenta *Survey* (ESRI), também em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB), em sua primeira versão. Esse coletor de dados registra todas as propriedades dos pontos de amostragem designados e pode operar integrado com o aplicativo de navegação ou isoladamente. A Figura 2 apresenta exemplos das telas disponíveis no aplicativo.

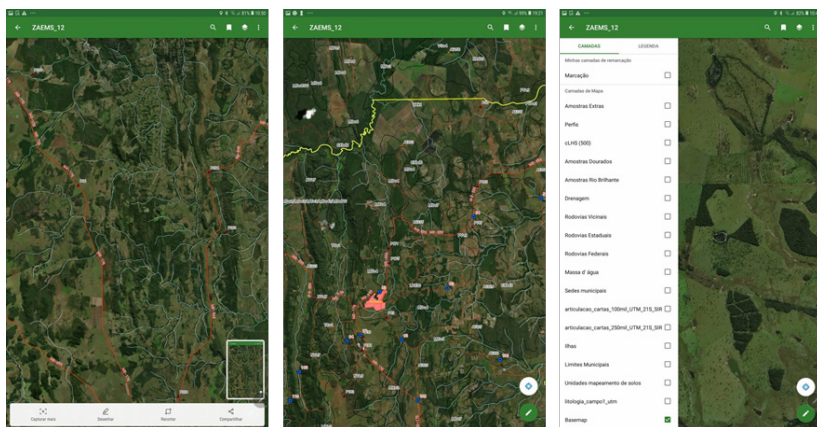


Figura 1. Telas do aplicativo de navegação no campo.

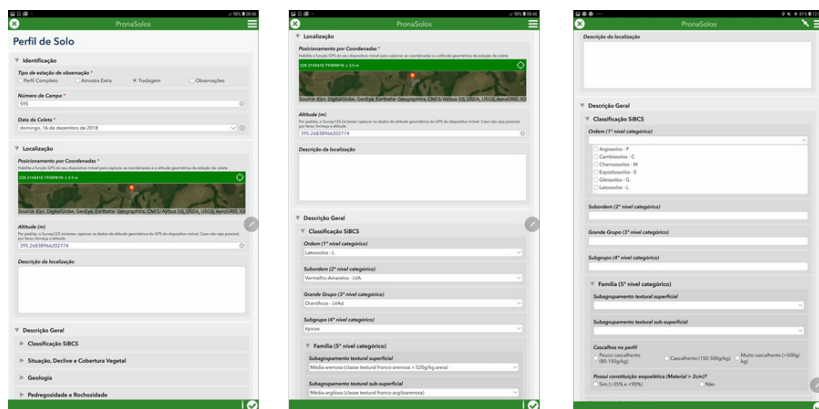


Figura 2. Telas do aplicativo de coleta de dados no campo.

Produtos obtidos e relacionados à Meta 1.1, no contexto TED 396/2020

- Mapa – Estoque de carbono dos solos do Brasil (Vasques et al., 2021).
- Artigo – Use of airborne radar images and machine learning algorithms to map soil clay, silt, and sand contents in remote areas under the Amazon rainforest (Ferreira et al., 2022).
- Artigo – Soil total nitrogen, available phosphorus and available potassium maps for Brazil at 0–30, 30–60 and 60–100 cm depth intervals with 250 m spatial resolution (Vasques; Benites, 2023).
- Artigo – Soil acidity (pH) maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021a).
- Artigo - Soil available water maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021b).
- Artigo - Soil bulk density maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021c).
- Artigo - Soil clay, silt and sand content maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021d).
- Artigo - Soil effective cation exchange capacity maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021e).
- Mapa - Soil salinity (electrical conductivity) maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021f).

- Artigo - Soil organic carbon content maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021g).
- Artigo - Soil organic carbon stock maps for Brazil at 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 and 100–100 cm depth intervals with 90 m spatial resolution (Vasques et al., 2021h).

Meta 1.2 – Desenvolver métodos inovadores de análise do solo a partir de técnicas de análises que consumam menos reagente, não destrutivas, rápidas e diretas, tanto em campo como laboratorial e que considerem a variabilidade de solos, ambientes e condições específicas de utilização e manejo

A análise de solo é uma ferramenta fundamental para a agricultura moderna, permitindo otimizar o uso de recursos, aumentar a produtividade e reduzir o impacto ambiental. No entanto, os métodos tradicionais de análise de solo podem ser demorados, caros e gerar resíduos químicos com sérios impactos ambientais. Nesse contexto, novas tecnologias estão surgindo para tornar a análise de solo mais rápida, precisa e sustentável, como as técnicas não destrutivas, que permitem analisar o solo sem a necessidade de preparo prévio da amostra, reduzindo o consumo de reagentes e o tempo de análise (espectroscopia no infravermelho próximo, NIRS), espectroscopia de fluorescência de raios X (XRF), espectroscopia de emissão óptica induzida por laser (LIBS), entre outras. Além dessas técnicas de Química Verde em laboratórios, destacam-se também os sensores portáteis de campo e drones equipados com sensores hiperespectrais, que permitem coletar dados sobre os solos em tempo real, em grandes áreas e com alta resolução espacial, bem como os aplicativos móveis

acoplados a plataformas on-line, que permitem integrar dados de diferentes fontes e gerar mapas de diferentes atributos dos solos.

Seguindo os princípios da Química Verde, foram desenvolvidas metodologias inovadoras para a quantificação de metais pesados, da fração estável de carbono orgânico e da porosidade do solo (Santana et al., 2021; Troyack et al., 2021; Lemes et al., 2022). Para a análise de metais pesados em solos contaminados, utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios X portátil (pXRF), permitindo a detecção simultânea de Sb, As, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Se e Zn. Os teores de Ag, Hg, Pb, Se e Zn ultrapassaram os valores de referência. Comparado aos métodos convencionais, o pXRF reduziu drasticamente o tempo de análise e eliminou a necessidade de reagentes químicos e a geração de resíduos (Troyack et al., 2021).

Outro avanço refere-se à quantificação dos teores de argila, óxidos de ferro e silício, atributos essenciais para a gênese e classificação de solos e para a avaliação da retenção de nutrientes e do sequestro de carbono. Tradicionalmente, o método do ataque sulfúrico era empregado. Nele, utiliza-se o ácido sulfúrico concentrado e mais de 30 outros reagentes, gerando aproximadamente 700 mL de resíduos químicos por amostra, além de demandar muito tempo (5 horas para analisar 10 amostras). Como alternativa, foi desenvolvida uma metodologia rápida (<2 s) e sustentável para quantificação de óxidos de ferro e susceptibilidade magnética, utilizando um equipamento nacional de ressonância magnética nuclear de baixo campo (SpecFit). Essa metodologia não requer preparo de amostra, exceto a usual secagem e peneiragem para a obtenção da TFSA (terra fina seca ao ar). Ela foi aplicada a 74 amostras da Soloteca da Embrapa Solos, obtendo-se o coeficiente de determinação (R^2) de 0,9986 para óxidos de ferro e 0,9984 para susceptibilidade magnética, com excelente limite de quantificação (1 g/kg para óxidos de ferro e 0,002 para susceptibilidade magnética). Essa metodologia, ainda em fase de publicação, representa um avanço significativo para análise de solos. Essas abordagens metodológicas são disruptivas e requerem tempo de desenvolvimento, mas são fundamentais para aprimorar a análise

ambiental e agrícola, otimizando a caracterização dos solos com menor impacto ambiental e maior eficiência analítica. A publicação dos resultados ocorrerá posteriormente à vigência do TED 396, mas ainda dentro do escopo do projeto PronaSolos/Finep.

Utilizando um equipamento nacional de ressonância magnética nuclear de baixo campo (SpecFit), foi desenvolvida uma metodologia inovadora e ambientalmente sustentável para a quantificação de óxidos de ferro e susceptibilidade magnética em solos, sem o uso de reagentes ou preparo de amostras. O método, que permite análises em menos de dois segundos em amostras acondicionadas em tubos Falcon lacrados, foi validado com 74 amostras da Soloteca da Embrapa Solos, demonstrando alta precisão ($R^2 = 0,9986$ para óxidos de ferro e $R^2 = 0,9984$ para susceptibilidade magnética), com limites de quantificação de 1 g/kg e 0,002, respectivamente. A publicação dessa metodologia está em preparação, com menção ao suporte do TED 396 (Tavares et al., 2025)².

Outra inovação relevante foi o desenvolvimento de um método para determinação do índice Ki (relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), essencial para levantamentos e classificações de solos, empregando espectroscopia vibracional no infravermelho médio (ATR-FTIR). Esse procedimento, também baseado em princípios de Química Verde, elimina a necessidade do tradicional ataque sulfúrico e fornece resultados em segundos, com excelente precisão ($R^2 = 0,9995$) e limite de quantificação de 0,5. No entanto, a validação inicial foi limitada a 20 amostras devido ao uso temporário do equipamento. A aquisição de um espectrômetro foi providenciada pelo projeto PronaSolos/Finep e permitirá a ampliação dos estudos, cujos resultados preliminares já serão publicados, com crédito à TED 396 (Novotny et al., 2025)³.

(2) TAVARES, O. C. H.; BORGES, A. A. A.; NOVOTNY, E. H. **Determination of Fe2O3 and magnetic susceptibility in intact soil samples, without any chemicals (green chemistry) in seconds by low-field NMR.** 2025. No prelo.

(3) NOVOTNY, E. H.; BORGES, A. A. A.; OLIVEIRA, A. P. de. **Determination of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio (Ki) of soils by Attenuated Total Reflectance – Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR): a green chemistry approach.** 2025. No prelo.

No campo das propriedades físico-hídricas dos solos, foi conduzida uma parceria interna para validar um método recentemente publicado (Novotny et al., 2023). Foram analisadas 21 amostras indeformadas de solos por esse método e pelos métodos convencionais (mesas de tensão, câmaras de Richards e psicrômetro). As amostras analisadas correspondem ao extremo oposto das já analisadas, que ensejaram a publicação do método, a saber, horizontes glei depletados em íons paramagnéticos e Vertissolos. Com essas novas análises, amplia-se a validação e a aplicabilidade do método. Os resultados são promissores e foram submetidos para publicação como capítulo do livro *Guia de campo da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC das várzeas do Médio Rio Amazonas e entorno*, atualmente, no prelo (Guimarães et al., 2025), com o devido reconhecimento ao financiamento do TED 396/2020.

No estudo publicado por Santana et al. (2021), um espectrômetro de infravermelho próximo foi usado para quantificar o teor de carbono orgânico associado a minerais, que é a fração mais estável do carbono do solo. Essa fração mais estável representa o carbono sequestrado e aprisionado no solo por um longo tempo, ao contrário do que seria a fração lábil do carbono orgânico, que pode ser transformada e perdida na forma de emissão de CO_2 com maior facilidade. A fração estável é comumente usada como parâmetro para avaliar o potencial do solo para sequestrar carbono em determinada condição e ambiente. O processo de extração e medição da fração estável do carbono no solo é demorado e envolve diferentes etapas. Primeiro, é realizado o fracionamento físico da amostra de terra fina seca ao ar (TFSA) por meio de dispersão à base de NaOH, agitação durante 16 h, peneiramento e lavagem em peneira fina. Em seguida, a amostra é seca em estufa, retirada dos frascos por meio da raspagem das suas paredes, moída e pesada em balança de precisão. Então, a amostra é submetida à combustão seca no analisador CNHS Perkin Elmer 2400 (que necessita de calibração, reagentes e manutenção constante). O teor

de carbono da fração estável é calculado a partir dos resultados do analisador. Em comparação, para análise via espectrômetro de infravermelho próximo, a amostra de TFSA foi colocada no espectrômetro Perkin Elmer Spectrum 100N e lida por cerca de 30 s, sem a necessidade de preparação ou fracionamento da amostra. Em seguida, modelos de predição foram ajustados usando regressão por mínimos quadrados parciais para estimar a fração de carbono estável do solo a partir das curvas espectrais do solo obtidas pelo espectrômetro. As estimativas dos teores da fração estável do carbono do solo obtidas via espectroscopia de infravermelho tiveram a mesma acurácia do método convencional de medição via combustão seca, mas sem a necessidade da etapa trabalhosa de fracionamento da amostra.

Lemes et al. (2022) desenvolveram uma metodologia baseada em tomografia computadorizada de raios X (microCT) para caracterizar a porosidade do solo em 2D e 3D, permitindo uma análise detalhada da conectividade dos poros e sua influência na infiltração de água e erosão. Esse método inovador se mostrou mais informativo do que os métodos tradicionais baseados na densidade do solo, além de ser não destrutivo, possibilitando o reaproveitamento das amostras para outras análises. O método de tomografia computadorizada de raios-X (microCT) é não invasivo e não destrutivo, permitindo o reaproveitamento das amostras indeformadas coletadas para outras análises, como foi o caso deste trabalho, em que posteriormente à análise por microCT, as amostras foram analisadas em câmaras de Richards para medição da capacidade de retenção de água pelo solo. Ao contrário do método convencional de cálculo da porosidade do solo (por meio da medição da densidade do solo e da densidade de partículas), a microCT permite, além da visualização da rede de poros do solo em 2 e 3D, o cálculo da curva de frequência de poros de diferentes diâmetros, comprimentos e volumes, além de fornecer valores de microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo.

Para o mapeamento da salinidade do solo, Tavares et al. (2022) empregaram o condutivímetro Geonics EM38-MK2 em conjunto com dados de radar do satélite Sentinel-1. A fusão dessas informações, associada ao uso de modelos de floresta aleatória (random forest), permitiu estimar a salinidade do solo com acurácia de 74%, demonstrando a eficácia da abordagem para o monitoramento de solos em áreas irrigadas. Além da condutividade elétrica, o sensor Geonics EM38-MK2 mede a susceptibilidade magnética do solo, parâmetro explorado por Vasques et al. (2022c) para o delineamento de zonas homogêneas em um talhão de 72 ha em Itaí, SP. A integração desses dados com teores de Th e U obtidos via espectrômetro de raios gama foi interpolada por krigagem e agrupada pelo método fuzzy k-means o que possibilitou uma caracterização detalhada da variabilidade espacial do solo, permitindo a separação em três zonas homogêneas de manejo, nas quais os teores de argila, carbono orgânico e Ca e Mg trocáveis variaram entre essas zonas, evidenciando diferentes solos dentro do mesmo talhão.

Além da condutividade elétrica, o sensor Geonics EM38-MK2 mede a susceptibilidade magnética (SM) do solo, parâmetro explorado por Vasques et al. (2022c) para o delineamento de zonas homogêneas em um talhão de 72 ha em Itaí, SP. A integração desses dados com teores de Th e U obtidos via espectrômetro de raios gama possibilitou uma caracterização detalhada da variabilidade espacial do solo, permitindo uma abordagem de manejo mais eficiente, conforme já comentado. Considerando os métodos convencionais de coleta e análise de solo, o delineamento das zonas homogêneas somente só seria possível a partir de muitas amostras de solo com cobertura razoável do talhão, o que seria trabalhoso e caro. Considerando-se a densidade amostral de uma amostra por hectare, comumente preconizada em agricultura de precisão, isso totalizaria 72 amostras no talhão contra as mais de 4 mil leituras obtidas em pouco tempo (menos de 2 h de percurso) pelos sensores, as quais recobrem muito melhor

o talhão. A abordagem usando sensores de campo com leituras contínuas por segundo, trouxe agilidade e eficiência para a caracterização da variação das propriedades do solo, subsidiando a geração de mapas dessas propriedades com diversas aplicações, uma delas sendo o delineamento de zonas homogêneas para fins de manejo do solo, com aumento da resolução espacial e reduzindo custos.

O radar de penetração no solo (GPR, do inglês “ground penetrating radar”) é um equipamento que mede as variações de amplitude e o tempo de retorno de um pulso eletromagnético emitido verticalmente em direção ao solo. Diferenças de permissividade elétrica relativa (constante dielétrica) ocorrem devido a diferenças entre os constituintes ao longo de um perfil do solo em profundidade. Essas diferenças causam a reflexão (retorno) de parte do pulso e a redução da amplitude do pulso em profundidade. Imagens de GPR (radargramas) são obtidas a partir do caminharmento com o equipamento ao longo de um transecto no sentido horizontal, onde as respostas de cada pulso são enfileiradas em sequência, permitindo enxergar objetos e camadas existentes na subsuperfície do solo. Para interpretar os radargramas, é necessário estimar a velocidade de propagação do pulso eletromagnético no solo, bem como a localização exata dos objetos e camadas que se deseja investigar. Para isso, foi elaborado um método usando vergalhões de ferro enterrados no solo que indicam tanto a localização e profundidade de camadas de interesse no solo, como permitem estimar a velocidade do pulso por meio do formato das hipérboles geradas nos radargramas. Esse método foi elaborado tanto para antena de GPR de 450 MHz (Nascimento et al., 2022) como para a de 750 MHz (Nascimento et al., 2023). O método permite estabelecer a velocidade do pulso e identificar as camadas de interesse com precisão, permitindo o delineamento dessas camadas ao longo do radargrama. O método permitiu identificar camadas com acúmulo de argila características de alguns tipos de solo (Planossolos, Argissolos) e pode ser usado para estabelecer os limites entre manchas de

diferentes tipos de solos em uma área, tendo potencial para reduzir a necessidade de abertura de trincheiras de solo em mapeamentos ultradetalhados de áreas relativamente pequenas (menos de 1 ha), reduzindo custos.

O estudo conduzido por Teixeira et al. (2023b) em Volta Grande do Xingu (VGX) utilizou espectrometria de fluorescência de raios X portátil (pXRF) e susceptibilidade magnética (SM) para identificar modificações antrópicas no solo do Sítio Arqueológico Bom Jesus. O pXRF, uma técnica inovadora para análise elementar, apresenta vantagens como portabilidade, preparo simplificado de amostras (método do pó seco) e preservação da amostra para análises subsequentes. Foram avaliados os teores de Ti, Mn, Fe, Cu, Zn e Sr.

A susceptibilidade magnética (SM) é uma propriedade dos minerais do solo e da matéria orgânica, sendo útil para o mapeamento de horizontes antrópicos. Esse método baseia-se no magnetismo remanente, alterado pelo aquecimento de minerais paramagnéticos, especialmente em locais onde ocorreram fogueiras. A SM tem sido amplamente utilizada para delimitar horizontes antrópicos e caracterizar sítios arqueológicos. Os principais resultados indicam que as concentrações de titânio (Ti) em determinadas unidades do sítio arqueológico sugerem um material de origem contínuo. Já os teores de ferro (Fe) aumentaram com a profundidade, correlacionando-se ao incremento de argila, um comportamento típico de Argissolos predominantes na região. Além disso, os aumentos nos teores de manganês (Mn), zinco (Zn) e estrôncio (Sr) nos horizontes antrópicos, até 50-70 cm de profundidade, corroboram os resultados obtidos com o método tradicional de ICP-OES, bem como as descrições de cores mais escuras e a presença de artefatos.

Os resultados da susceptibilidade magnética mostraram valores elevados nas camadas superficiais, evidenciando os efeitos do aquecimento. Mesmo em camadas sem artefatos, a SM indicou alterações possivelmente causadas pelo aquecimento de camadas próximas à

superfície. Essas mudanças na SM foram atribuídas à conversão de hematita em magnetita ou maghemita e à degradação de minerais magnéticos, fenômenos observados em condições anóxicas causadas pela combustão de matéria orgânica. Assim, conclui-se que o pXRF e a SM são ferramentas inovadoras e eficazes para identificar horizontes antrópicos, complementando análises químicas tradicionais e descrições morfológicas do solo.

Além do uso em geoarqueologia, a SM tem sido aplicada na agricultura para estimar atributos agronômicos, como os teores de argila e ferro, conforme demonstrado por Teixeira et al. (2023a) no *Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins*. Quando apresenta valores elevados, a SM indica a presença de minerais ferri- e paramagnéticos. Além disso, grandes variações nos valores de SM dentro de um mesmo perfil de solo sugerem processos distintos na gênese desses solos.

A avaliação da SM é rápida, não destrutiva e pode ser realizada tanto in situ quanto em laboratório. No estudo da XIV RCC, foram analisadas 87 amostras provenientes de 14 perfis de solo, utilizando um susceptímetro-condutímetro KT 10 S/C (Terraplus, Canadá), no Laboratório de Avaliação e Modelagem da Água no Solo (LAMAS) da Embrapa Solos. Entre os resultados mais relevantes, destacou-se um Plintossolo pétrico com valores de SM elevados em todos os horizontes, indicando um material de origem uniforme e sem diferenciação genética. Já os dados de SM do Cambissolo háplico (GO13) apresentaram elevados teores de Fe, mas baixos valores de SM. Isso ocorre porque a correlação entre Fe e SM nem sempre é encontrada, devido às diferenças entre os minerais de Fe e ao tamanho dos grãos minerais.

A SM é uma ferramenta promissora para avaliação de atributos dos solos, pois permite inferir rapidamente sobre a composição mineralógica e direcionar análises mais detalhadas, como as técnicas de fluorescência e difração de raios X, que são mais sofisticadas e

onerosas. Assim, sua aplicação pode otimizar investigações tanto em geoarqueologia quanto em levantamentos pedológicos e agrícolas.

A escassez de água potável é um desafio global (Galaitis et al., 2018), com a agricultura consumindo 70% desse recurso (FAO, 2011; World Bank, 2020). A distribuição do tamanho dos poros e a curva de retenção de água no solo (CRAS) são propriedades fundamentais dos solos e essenciais para a compreensão das taxas de transporte de fluidos e solutos dentro da zona vadosa, com uma ampla gama de aplicações, como agricultura, silvicultura, ecologia, ciências ambientais e engenharia civil (Stingaciu et al., 2010). Essas propriedades hidrofísicas influenciam as taxas de infiltração do solo, os processos de escoamento e erosão, o crescimento das plantas, o desenvolvimento da microbiota, o transporte de nutrientes e contaminantes, bem como a recarga de aquíferos e descarga em águas superficiais (Nimmo, 2009; Wang et al., 2015; Medici et al., 2019; Villarreal et al., 2020).

A CRAS é um dos dados experimentais mais importantes da Física do Solo (Tormena et al., 1998) e de mais difícil obtenção (Costabel; Hiller, 2021). Os métodos disponíveis, tais como funil de placa porosa, mesa de tensão ou câmaras de pressão (câmara de Richards), psicrometria e a combinação deles (Teixeira; Bhering, 2017), são onerosos, demorados (semanas a meses) e propensos a vieses e erros (Rieu; Sposito, 1991; Sun; Cui, 2020), sendo um dos maiores gargalos nos laboratórios de Física do Solo e em programas de levantamento e classificação de solos. A principal limitação está relacionada ao longo tempo necessário para que as amostras atinjam o equilíbrio hidrostático, que leva de dias a vários meses (Hunt; Ewing, 2009). Além disso, essa metodologia é suscetível a erros, principalmente em potenciais matriciais baixos, como a perda de contato hidráulico entre as amostras e as placas de pressão, e a incerteza na determinação do equilíbrio hidrostático (Campbell et al., 2007; Solone et al., 2012).

Um exemplo de aplicação desses dados da curva de retenção de água no solo, é o que foi proposto ao Zoneamento Agrícola de Risco

Climático (ZARC), que estima a água disponível no solo de forma muito grosseira, pelo teor de argila e que pode se beneficiar dessas informações mais precisas, como política pública. O ZARC é utilizado nas operações de crédito rural (R\$ 400,7 bilhões na safra 2023/24) e na contratação de seguro agrícola. Portanto, um método que determine de forma acurada e rápida as CRAS atenderá também a uma demanda de cerca de 2,2 milhões de contratos de custeio agrícola.

Com o advento do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos), que visa mapear os solos de 1,3 milhão de km² nos primeiros dez anos e mais 6,9 milhões de km² até 2048, em escalas que vão de 1:25.000 a 1:100.000, haverá uma grande demanda por dados físico-hídricos dos solos, demanda essa impossível de ser atendida utilizando-se os métodos convencionais. A metodologia baseada em RMN de baixo campo permite a obtenção da CRAS em menos de 2h, com maior acurácia (Novotny et al., 2023), porém necessita de validação para solos com alto teor de ferro.

Dentre os benefícios dessas novas tecnologias, destacam-se: a redução do consumo de reagentes químicos e do impacto ambiental; o aumento da velocidade e da precisão das análises; a possibilidade de realizar análises em campo em tempo real; a geração de mapas de fertilidade do solo de alta resolução; e a otimização do uso de fertilizantes e corretivos do solo, aumentando assim a produtividade das lavouras e a sustentabilidade ambiental. Com o apoio do TED 396/2020, foram desenvolvidos os seguintes estudos com aplicação de química verde, alguns deles ainda necessitando de validação.

Produtos obtidos e relacionados à Meta 1.2, no contexto do TED 396/2020:

- Capítulo de Livro – Curvas de retenção de água de horizontes e solos selecionados da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos obtidas por ressonância magnética nuclear de baixo campo (Guimarães et al., 2025).

- Capítulo de Livro – Influence of soil cover on pore distribution in a Ferralsol evaluated by 3D computerized microCT (Lemes et al., 2022).
- Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa – Identifying soil horizons transitions for ground-truthing and interpreting ground penetrating radar (GPR) imagery of Planosols (Nascimento et al., 2023).
- Capítulo de Livro – Iron rods in support of the use of ground penetrating radar with 450 MHz monostatic antenna for imaging argillic horizon (Nascimento et al., 2022).
- Artigo em preparação – Determination of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio (Ki) of soils by Attenuated Total Reflectance – Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR): a Green Chemistry approach (Novotny et al., 2025)⁴.
- Artigo publicado – Monitoring mineral-associated organic matter in tropical pastures using near infrared spectroscopy (Santanta et al., 2021).
- Artigo em preparação – Determination of Fe_2O_3 and magnetic susceptibility in intact soil samples, without any chemicals (Green Chemistry) in seconds by low-field NMR (Tavares et al., 2025)⁵.
- Capítulo de Livro – Proximal and remote sensor data fusion for in-depth salinization mapping in the Brazilian semiarid via machine learning (Tavares et al., 2022).

⁽⁴⁾ NOVOTNY, E. H.; BORGES, A. A. A.; OLIVEIRA, A. P. de. **Determination of $\text{SiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio (Ki) of soils by Attenuated Total Reflectance – Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR): a green chemistry approach.** 2025. No prelo.

⁽⁵⁾ TAVARES, O. C. H.; BORGES, A. A. A.; NOVOTNY, E. H. **Determination of Fe_2O_3 and magnetic susceptibility in intact soil samples, without any chemicals (green chemistry) in seconds by low-field NMR.** 2025. No prelo.

- Artigo publicado – Estimativa do número de amostras de solo para caracterizar elementos químicos utilizando fluorescência de raios X portátil em áreas contaminadas: estudo de caso em Resende (Troyack et al., 2021).
- Artigo publicado – Ground penetrating radar (GPR) models of the regolith and water reservoir of an underground dam in the Brazilian semiarid region (Vasques et al., 2022a)
- Capítulo de Livro – Ground penetrating radar non-invasively positions an underground dam and estimates its water reservoir shape and volume (Vasques et al., 2022b)
- Capítulo de Livro – Management zones from proximal soil sensors capture within-field soil property and terrain variations (Vasques et al., 2021)
- Artigo – O registro arqueológico no solo: as ocupações humanas na Volta Grande do Xingu – Pará (Teixeira et al., 2023b)
- Capítulo de Livro – Avaliação da susceptibilidade magnética e da condutividade elétrica aparente dos perfis da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos - RCC de Goiás e Tocantins (Teixeira et al., 2023a).

Meta 1.3 – Implementar o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), compreendendo atualizações e correções, inclusão de novas classes, difusão, validação e prática de uso do sistema no país

Em seu trabalho de revisão intitulado *Soil classifications: their origin, the state-of-the art and perspectives*, Krasilnikov et al. (2010) proporcionam uma excelente visão geral de mais de 25 sistemas de classificação de solos nacionais; dentre eles está o do Brasil, em que as seis edições do livro *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*

(SiBCS): Sistema... (1999) e Santos et al. (2006; 2013; 2014; 2018a; 2025), refletiram o nível e a evolução do conhecimento sobre os solos brasileiros. Todas as edições foram coordenadas, financiadas e publicadas pela Embrapa, contando com a participação efetiva de uma rede nacional de profissionais em Pedologia, oriunda e formalizada nos próprios projetos de desenvolvimento e atualização do SiBCS, todos inseridos nos portfólios de projetos da Embrapa desde sua origem.

Ao considerarmos que a classificação de solos é o espelho do nosso conhecimento a respeito do solo e que a estrutura de um sistema taxonômico é dependente dos conceitos e ideias correntes sobre gênese, geografia e funcionamento dos solos (Krasilnikov et al., 2010), argumenta-se aqui que os estudos relacionados à Pedologia brasileira e ao desenvolvimento do SiBCS são muito mais recentes em relação àqueles similares dos norte-americanos (Soil Taxonomy), estes iniciados no final do século 19 e início do século 20 (Bockheim et al., 2014). Há, durante a evolução do SiBCS, além de sua evidente mais curta história, muito menos recursos humanos e financeiros no Brasil relacionados ao desenvolvimento e aperfeiçoamento do tema. Carece-se até hoje no país de uma estrutura organizacional efetiva e inserida em um programa nacional de taxonomia e interpretação dos solos para diversos fins (Polidoro et al., 2016), sendo este um dos objetivos do programa PronaSolos. Consequentemente, o estado da arte da Pedologia brasileira, resumidamente exposto acima, evidencia que há muito menos conhecimento sobre a gênese, a geografia e o funcionamento dos solos brasileiros comparativamente aos norte-americanos.

Em vista do exposto, torna-se evidente que a busca por um sistema de classificação de solos brasileiros, atualizado e mais bem ajustado à realidade do País, vai ao encontro do melhor conhecimento de seus solos, com enfoque nos estudos de gênese, morfologia e caracterização dos solos, acrescentando-se a necessidade do desenvolvimento de pesquisas em outros campos da Ciência do Solo, como a física, a química e a mineralogia de solos, já que proporcionam a base para a identificação e seleção de atributos diagnósticos

apropriados para a sua adequada classificação, especialmente para o estabelecimento de limites entre classes (Golden et al., 2010; Krasilnikov et al., 2010).

Assim, além da carência de conhecimento sobre a gênese, a geografia, os tipos e os atributos dos solos brasileiros, é premente no País o desenvolvimento ou a adaptação de métodos analíticos de rotina mais modernos, simples, baratos, rápidos e estáveis, bem como não poluentes em relação aos tradicionais (Demattê et al., 2019), ajustando-os aos preceitos da química verde e acompanhando as tendências atuais e a evolução tecnológica no tema. Os métodos de análise de solos utilizados hoje em taxonomia no Brasil datam de 1969 (Vettori, 1969), tendo sofrido adequações e modernizações ao longo do tempo, até os dias atuais, apenas nos procedimentos de determinação analítica, permanecendo as tradicionais formas de extração desde a sua concepção.

Desde a 5ª edição do SiBCS (Santos et al., 2018a), houve avanços significativos no conhecimento dos solos nacionais, de tal forma que são inúmeras as propostas para a sua atualização. Tais propostas têm sua origem, sobretudo, nas discussões: (1) entre os membros do Comitê-Executivo Nacional de Classificação de Solos, doravante referido como CE; e (2) emanadas dos participantes das últimas três Reuniões Brasileiras de Classificação e Correlação de Solos (RCCs), ocorridas nos estados do Maranhão (XIII RCC; Silva et al., 2020), Goiás e Tocantins (XIV RCC; Santos et al., 2023a) e Amazonas e Pará (XV RCC; Lumbreras et al., 2025), todas inseridas no escopo dos portfólios de projetos submetidos e aprovados pela Embrapa, cujo objetivo precípuo é a atualização do SiBCS.

O referido CE foi concebido pela comunidade pedológica brasileira em 1999, representando um dos elos de uma estrutura organizacional criada à época para atualizar o SiBCS. Originalmente hierarquizada em Comitê Assessor Nacional, CE, Comitês Regionais e Núcleos de Discussão e Colaboração, tal estrutura mostrou-se ineficiente para a consecução de seus objetivos por motivos diversos. Hoje, embora não se faça mais menção a tal estrutura organizacional, a comunidade pedológica brasileira reconhece o CE como o grupo responsável

pelo trabalho de avaliação, organização, consolidação e redação final das propostas emanadas das discussões (Santos et al., 2025). A maioria dos autores das edições de números 3, 4 e 5 do SiBCS são membros atuais do CE. As RCCs, por outro lado, são reuniões, com frequência predominante e preferencialmente bienal, ocorridas em campo, em que os participantes se agrupam em frente a perfis de solos, previamente selecionados e intensivamente analisados, estudados e distribuídos ao longo de um roteiro também previamente selecionado, geralmente percorrendo os principais pedoambientes de um ou mais estados brasileiros. São tradicionalmente promovidas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, tendo sempre coordenadores de instituições locais e nacionais, incluindo a Embrapa Solos (Oliveira et al., 2021). As RCCs se constituem hoje em um dos principais instrumentos para a validação e o aprimoramento do SiBCS por meio de correlações *in situ* entre ocorrências de diferentes classes de solos pouco estudadas e conhecidas no território nacional. Congregam os principais pedólogos do país, mesmo alguns do exterior, além de pesquisadores, professores, estudantes de pós-graduação, extensionistas e, eventualmente, produtores rurais locais. Na ocasião do evento, os participantes afeitos aos temas discutem a gênese, a evolução e a caracterização pedogeoambiental dos perfis estudados, além de avaliar as suas potencialidades, limitações agrícolas e vulnerabilidade ambiental, todos focados e motivados no alcance de um objetivo comum: aprimorar o SiBCS à luz do amplo e diversificado conhecimento e das experiências dos pedólogos e das inúmeras pesquisas realizadas nos solos estudados – as denominadas pesquisas coligadas, especificamente desenvolvidas para o evento e para este fim.

As RCCs tradicionalmente têm sido as molas propulsoras da revisão e da atualização do SiBCS (Oliveira et al., 2021). Apesar da crescente demanda por sua realização e até da ansiedade de pesquisadores, professores, extensionistas e estudantes de instituições públicas e privadas de todo o país (quando e onde será realizada e mesmo se poderão participar, diante do número limitado de vagas), as RCCs são eventos que demandam muito tempo de dedicação e

recursos humanos e financeiros, requerendo um projeto oficial em rede e apoio de diferentes fontes financiadoras, com recursos adequados para se efetivarem. É uma oportunidade ímpar de agregar a maioria dos pedólogos brasileiros, com diferentes níveis de conhecimento e experiência, a fim de discutir, validar, revisar e atualizar o SiBCS, além de conhecer ambientes e solos pouco estudados. As RCCs são também indutoras de várias pesquisas básicas e aplicadas, uma vez que revelam, aos pesquisadores, solos e ambientes pouco conhecidos, além de serem um eficiente meio de capacitação e atualização tecnológica de agentes multiplicadores: professores universitários e de institutos federais de educação, extensionistas e consultores vinculados ao tema se aperfeiçoam e se qualificam na descrição morfológica e classificação de solos segundo os critérios taxonômicos mais recentes (Oliveira et al., 2021).

A disponibilização da 5ª edição do SiBCS foi inédita, quer pela gratuidade, quer pelo formato de apresentação em ebook e pela versão também em língua inglesa (Santos et al., 2018b), contribuindo para a divulgação e popularização do SiBCS, já que se tornou fácil, gratuita e prontamente disponível em muitos smartphones, tablets e computadores pessoais de, sobretudo, estudantes e professores de agronomia e áreas afins. Desde seu lançamento no *Congresso Mundial de Ciência do Solo*, realizado no Rio de Janeiro em agosto de 2018, foram registrados 191.162 downloads do e-book em português (Santos et al., 2018a) e 6.065 da edição em inglês (Santos et al., 2018b) até a data de 13 de fevereiro de 2025. Essa informação, associada aos comprovados 35.814 livros físicos vendidos de todas as edições do SiBCS (registro disponível até 30/06/2020), evidenciam sua importância no cenário nacional: um bestseller científico, validado e amplamente aceito e utilizado pela comunidade científica nacional – resultados parcialmente devidos às constantes e significativas atualizações a que foi submetido ao longo dos anos, via projetos da Embrapa.

Enfim, o desenvolvimento de projetos e a inversão de recursos financeiros de diferentes fontes externas à Embrapa, dedicados exclusivamente para a constante atualização do SiBCS, justificam-se pelo que ele e suas atualizações representam para:

- 1) os tomadores de decisão, seja pronta e diretamente no campo ou na esfera política, seja a longo prazo, pois o futuro que se projeta é que a gestão sustentável do recurso solo no campo seja baseada em dados e informações precisos desse recurso natural, resultantes de pesquisas e métodos inovadores, que são associados ao maior Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil, o PronaSolos;
- 2) todos os brasileiros que trabalham com pesquisa e extensão rural nas áreas de conhecimento que permeiam o tema solos, pois inevitavelmente utilizam o sistema taxonômico para se comunicar, divulgar suas pesquisas e para incorporá-las mais adequadamente aos sistemas produtivos; e
- 3) o ensino nacional no tema solos, já que é o sistema taxonômico de solos oficial do Brasil, sendo utilizado como livro-texto em todas as instituições de nível superior de ensino e pesquisa (graduação e pós-graduação) do País afeitas ao tema.

Produtos obtidos e relacionados à Meta 1.3, no contexto do TED 396/2020:

O projeto Taxonomia de Solos Movida à Ciência em Rede (Projeto SEG nº 10.20.03.032.00.00), vigente de 01/01/2021 a 31/03/2025, foi uma iniciativa da Embrapa voltada para a atualização do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Este projeto, juntamente com o projeto PronaSolos (FINEP/CTAGRO/FNDCT - Convênio 01.22.0081.00, Ref. 1218/21) e o TED 396/2020 do Mapa, possibilitaram avanços significativos no aprimoramento do SiBCS e na realização da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos (XV RCC AM-PA), conforme discriminação abaixo:

- 1) Três publicações - Santos et al. (2022, 2023b, 2024), cujos conteúdos são exclusivamente de propostas de atualização do SiBCS, precursoras da 6ª edição.

- 2) Livro - Guia de campo da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC das várzeas do Médio Rio Amazonas e entorno (Lumbreras et al., 2025).
- 3) Livro - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 6ª edição revista e ampliada (Santos et al., 2025).

Meta 2 – Integração e Interpretação da Informação em Solos (Desenvolvimento e Difusão)

Meta 2.1 – Desenvolver novas ferramentas de análise, caracterização espacial e de avaliação da qualidade do solo na direção da avaliação das potencialidades, vulnerabilidades e estado da qualidade dos sistemas agrícolas.

A “agricultura de baixo carbono (C)”, que preconiza, sobretudo, o incremento do C no solo, faz parte das agendas de promoção do desenvolvimento rural sustentável e de políticas setoriais, como os planos ABC e ABC+, contemplando tecnologias como estratégias ou práticas de manejo e cultivo. Dentre elas, estão a recuperação de pastagens degradadas, a integração lavoura-pecuária-floresta, a fixação biológica de nitrogênio, o sistema plantio direto e as florestas plantadas.

Nessa perspectiva, o desenvolvimento de protocolos que contemplem todas as condições e etapas necessárias para coleta de amostras de solo e quantificação de C é prerrogativa para o monitoramento, relato e verificação. Os protocolos desenvolvidos têm potencial para

serem aplicados ou para subsidiar o aperfeiçoamento metodológico para a determinação do estoque de C do solo em diversos programas de certificação já estabelecidos ou em fase de estabelecimento, e das marcas-conceito Carne Carbono Neutro, Carne Baixo Carbono, dentre outras em fase de desenvolvimento, como o Carbono Nativo, Bezerro Baixo Carbono, Leite Baixo Carbono e Soja Baixo Carbono.

Quanto à quantificação do carbono (C) no solo, ele pode ser obtido por diferentes métodos, especialmente por aqueles que determinam o C total, como o da combustão seca, e o carbono orgânico (C org), pela oxidação úmida. Por essa condição, quando a intenção é atender aos critérios de certificação e do mercado de C, ou mesmo à comparação entre os teores, há a necessidade de realizar a harmonização ou correspondência entre os tipos de C, uma vez que, de um lado, os parâmetros de referência utilizam o C total e, de outro, a maioria dos laboratórios do Brasil obtém o C orgânico.

Nos estudos desenvolvidos com o apoio do TED 396/2020 e de outros projetos alinhados ao tema, desenvolveu-se um protocolo para a coleta de amostras de solos e a quantificação do carbono orgânico dos solos em áreas de agricultura de baixo carbono. A avaliação dos níveis de C é uma ferramenta para o monitoramento da evolução, bem como para a aferição e orientação do manejo e cultivo das terras. De forma mais detalhada, os níveis de referência de carbono orgânico (C org) podem ser obtidos e adotados para cada classe de textura do solo, nas diferentes camadas e nos diferentes biomas, o que foi um diferencial desse estudo. Nesse sentido, podem ser aplicados como orientadores no monitoramento da eficácia das tecnologias previstas para os cultivos agrícolas no Plano ABC e ainda, podem ser aplicados aos diversos programas de certificação já estabelecidos ou em estabelecimento e às marcas conceito *Carne Carbono Neutro*, *Carne Baixo Carbono*, dentre outras em fase de desenvolvimento, como o *Carbono Nativo*, *Bezerro Baixo Carbono*, *Leite Baixo Carbono*, *Trigo Baixo Carbono* e *Soja Baixo Carbono*. Com os teores de referência

de C org, será possível, além de avaliar a quantidade e qualidade dos solos agrícolas, estabelecer uma relação de causa e efeito das práticas de cultivo e manejo sobre o componente orgânico do solo, bem como definir padrões regionais com potencial de incremento da matéria orgânica dos solos.

Produtos relacionados à Meta 2.1, no contexto do TED 396/2020:

- Série Documentos – Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono (Fontana et al., 2024)
- Capítulo de Livro – Funções para predição do carbono total e estoque de carbono em perfis da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos (Fontana et al., 2025)
- Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento – Níveis de referência do carbono orgânico no solo sob vegetação natural dos biomas brasileiros (Fontana et al., 2024)

Meta 2.2 – Desenvolver funções do uso a partir da avaliação integrada da sustentabilidade, envolvendo conceitos de multifuncionalidade da agricultura, serviços ecossistêmicos e funções da paisagem

O conhecimento do solo é central na temática da sustentabilidade na agricultura. Contudo, é preciso aplicar novas ferramentas e métodos para sua integração com outros temas correlatos, como água, biodiversidade e clima, considerando-se a multifuncionalidade da paisagem rural. Para tal, existe uma abordagem denominada “serviços ecossistêmicos (SE)”, que são os benefícios ofertados gratuitamente

pelos ecossistemas em prol das atividades humanas (Millennium Ecosystem Assessment, 2003). Essa abordagem tem se expandido no âmbito da ciência e de políticas públicas, globalmente e também no Brasil, principalmente a partir da Lei Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) (Brasil, 2021). A aplicação de métricas de avaliação e valoração de SE em múltiplas escalas é um caminho para subsidiar políticas públicas e tomadores de decisão, visando à ampliação da multifuncionalidade da paisagem rural. A “multifuncionalidade da paisagem” é entendida como a provisão de várias funções e serviços do ecossistema em níveis elevados ou desejados. No Brasil, país que detém a maior parte da biodiversidade global e que se destaca no cenário mundial com a grande produção agropecuária, é preciso expandir esses novos conceitos e fomentar ações que favoreçam a provisão dos SE e, conseqüentemente, se adaptando e se tornando mais resiliente às mudanças climáticas. A Embrapa Solos, seguindo essa tendência global e nacional, desenvolveu uma linha de pesquisa focada nos “Serviços Ecossistêmicos”, com destaque para os solos. Essa linha conta com a parceria de pesquisadores de outras unidades da Embrapa e com parceiros externos. Esse grupo de pesquisa tem gerado várias pesquisas e suas publicações em linguagem acessível, visando ao nivelamento conceitual e de métodos no Brasil. O grupo tem apoiado diretamente a formulação e implementação de políticas públicas, por meio da assessoria parlamentar da Embrapa e do Portfólio de Projetos da Embrapa intitulado Serviços Ambientais, como foi o caso da elaboração da Lei Nacional de PSA (Brasil, 2021).

A aplicação da abordagem dos serviços ecossistêmicos se inicia com a seleção e a classificação dos SE a serem avaliados, de acordo com o objetivo de cada estudo; depois, passa-se à seleção de indicadores que possam indicar ou medir a sua oferta no contexto da agricultura e os métodos para sua avaliação e, em alguns casos, valoração. A próxima etapa é obter os dados relacionados aos indicadores, podendo ser dados primários ou secundários, a depender da escala do estudo, passando pela sistematização, normalização e processamento desses dados. A etapa seguinte é a análise integrada dos dados utilizando-se de

modelagem e ferramentas estatísticas, bem como Sistemas de Informação Geográfica, para a apresentação dos resultados na forma de mapas.

A abordagem dos serviços ecossistêmicos tem a vantagem de relacionar os bens e serviços que os ecossistemas ofertam aos benefícios e ao bem-estar humano, aqui com foco na agricultura. Trata-se de uma abordagem que visa ao incentivo à conservação dos recursos naturais e à aproximação da ciência com as políticas públicas e os tomadores de decisão. Os produtos relacionados a essa linha de pesquisa, obtidos no contexto do presente TED (relacionados a seguir), são importantes para dar maior visibilidade à abordagem como instrumento que vai contribuir para o manejo sustentável da agricultura, favorecendo também maior adaptação às mudanças climáticas. Eles trazem conceitos, métodos e exemplos da aplicação da abordagem de serviços ecossistêmicos no Brasil, que é integradora, mantendo o elemento solo como central na produção agropecuária sustentável, com base em paisagens multifuncionais. Dessa forma, contribuem para a difusão do conhecimento sobre o tema para toda a sociedade brasileira, com destaque para o apoio às políticas públicas, como é o caso da Política Nacional de PSA (Brasil, 2021).

Produtos obtidos e relacionados à Meta 2.2, no contexto do TED 396/2020

- Portfólio Embrapa – Portfólio de serviços ambientais: pesquisa, inovação e subsídios às políticas públicas (Portfólio [...], 2020)
- Artigo - Participatory assessment to define indicators for monitoring water-based payment of ecosystem services programs in Brazil (Turetta et al., 2022)
- Capítulo de Livro – Intensificação da agricultura com sustentabilidade (Stralioetto et al., 2022)
- Artigo – Dynamic and maintenance of water purification ecosystem service in the Guandu River Hydrographic Region, Rio de Janeiro, Brazil (Xavier et al., 2023)

- Projeto internacional em andamento no âmbito do Programa EJP Soil da União Europeia, intitulado Serviços Ecossistêmicos do Solo sob Intensificação Sustentável da Agricultura: em Busca de Mapeamento e Monitoramento Inovadores em Múltiplas Escalas (SOIL-ES) (2023 a 2025), coordenado pela Embrapa Solos, em parceria com a Embrapa Maranhão e Embrapa Territorial, bem como instituições de pesquisa da França, Argentina e Uruguai. Pesquisa em desenvolvimento – Protocolo para Valoração de Serviços Ecossistêmicos do Solo (2023-2025), Projeto PronaSolos/FINEP/MCTI.

Meta 2.3 – Selecionar e validar indicadores de sustentabilidade, aprimoramento e adequação de métodos e critérios de zoneamentos agroambientais e de planejamento de utilização e ocupação dos solos na definição de zonas de manejo

Em nível de propriedade rural, a variação dos solos e seus atributos responde mais a processos locais, sendo, nesses casos, necessário o uso de outras fontes de dados que captem as variações locais, como sensores de campo (por exemplo, condutivímetro, espectrômetro de raio gama), sensores remotos de alta resolução espacial (por exemplo, drones, Planet) e planos de informação de alta resolução derivados desses sensores (por exemplo, modelo digital do terreno, imagem hiperespectral). Sensores geofísicos de campo foram usados para estabelecer zonas de manejo homogêneas e um delineamento amostral otimizado, estabelecendo abordagens complementares para a caracterização da distribuição de atributos do solo para o manejo do solo em talhões de produção agrícola.

Para otimizar recursos de pesquisa e, ao mesmo tempo, garantir uma boa caracterização e mapeamento dos solos em áreas agrícolas,

aliam-se ao delineamento amostral otimizado estratégias para segmentar as áreas de plantio, visando estabelecer zonas homogêneas para realizar a caracterização dos solos e seus atributos. Uma estratégia elaborada foi o delineamento de zonas de manejo por agrupamento via fuzzy k-médias a partir de dados de sensores geofísicos de campo (condutímetro, susceptímetro e espectrômetro de raio gama). Esses dados foram obtidos em um talhão agrícola irrigado sob pivô central de 72 ha (Vasques et al., 2022c, 2022d). Entre as zonas delineadas, observaram-se diferenças significativas ($p < 0,05$) nos teores de argila, carbono orgânico e Ca e Mg trocáveis. Essas diferenças direcionam as recomendações de adubação e irrigação para as diferentes zonas de manejo, respectivamente. Segmentações similares podem ser realizadas para delinear zonas com solos relativamente homogêneos a partir de dados de sensores de campo, sensores remotos, mapas e outros planos de informação, podendo inclusive ser aplicadas a áreas maiores, facilitando a caracterização e mapeamento dos solos e seus atributos. Essas mesmas técnicas de delineamento amostral estão sendo empregadas nos estudos de solos realizados para o Zoneamento Agroecológico do estado do Mato Grosso do Sul e, também, nos estudos em andamento das bacias hidrográficas contribuintes para a Hidrelétrica de Itaipu, no mesmo estado.

Assim como descrito na Meta 1.1, a utilização dessas novas técnicas e métodos de delineamento de zonas de manejo exigiu a perfeita e exata navegação até os pontos amostrais selecionados. Por isso, foi desenvolvido e utilizado o mesmo aplicativo para dispositivos móveis descrito na Meta 1.1, no qual foram integrados todos os planos de informação, sejam para suporte à navegação (rodovias federais, estaduais, vicinais, acessos, imagens de satélite, limite municipal, sede municipal, localidades, entre outros), sejam planos de informação vinculados aos estudos técnicos (mapa de solos legados, pontos amostrais legados, mapas de declividade, litologia, uso atual, hidrografia, e delineamento amostral). Essa tecnologia foi desenvolvida em parceria com o Serviço

Geológico do Brasil (SGB) utilizando das ferramentas Explorer e, atualmente, Field Maps da Plataforma ArcGIS da ESRI.

Outra tecnologia desenvolvida, conjuntamente, com o objeto na Meta 1.1, foi o coletor de dados de solos, elaborado com a ferramenta Survey (ESRI), também em parceria com Serviço Geológico do Brasil (SGB) em sua primeira versão. Esse coletor de dados registra todas as propriedades dos pontos de amostragem designado. Pode operar integrado com o aplicativo de navegação ou isoladamente.

Imagens de radar podem ser usadas também em áreas menores, desde que possuam alta resolução espacial. Esse é o caso do sensor de radar de abertura sintética na banda C a bordo do satélite Sentinel-1, que possui resolução espacial de 5 x 5 m. Imagens obtidas por esse sensor foram combinadas com medidas de condutividade elétrica obtidas por um sensor de campo (Geonics EM38-MK2) e, em conjunto, foram usadas para estimar a salinidade do solo em uma área de produção com solos em processo de salinização no perímetro irrigado do Baixo Açu, no Rio Grande do Norte (Tavares et al., 2022). A combinação de sensor remoto (Sentinel-1) e sensor de campo (Geonics) permitiu mapear a salinidade do solo com boa precisão. Com essa informação, o produtor pode criar zonas de manejo específicas para o controle e combate ao processo de salinização da sua fazenda. Em comparação ao trabalho de Ferreira et al. (2022) na Amazônia, esse trabalho fez uso mais simplificado de imagens de radar, mostrando ser possível usar esse tipo de dado sem a necessidade de pré-processamentos complexos. No caso, as imagens originais de dupla polarização do Sentinel-1 foram usadas diretamente no estudo, ao invés de calcular o coeficiente de retroespalhamento como no trabalho da Amazônia. Essa informação é útil, pois reafirma e aumenta o potencial de uso de imagens de radar em projetos de mapeamento digital de solos.

Produtos obtidos e relacionados à meta de pesquisa 2.3, no contexto TED 396/2020

- Capítulo de Livro – Management zones from proximal soil sensors capture within-field soil property and terrain variations (Vasques et al., 2022c).
- Artigo – An optimized sample for assessing soil property variations across the field and within management zones efficiently (Vasques et al., 2022d).
- Artigo – Proximal and remote sensor data fusion for in-depth salinization mapping in the Brazilian semiarid via machine learning (Tavares et al., 2022);

Meta 2.4 – Desenvolver ou inovar métodos de análise da degradação dos solos e de estratégias de reinserção destes solos ao sistema agrícola

Meta 2.4.1 – Desenvolver ou inovar métodos de análise da degradação dos solos

Optou-se por estudar a vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica, uma das que mais causam prejuízos à agricultura brasileira. O mapa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica foi desenvolvido a partir de dois fatores: a suscetibilidade à erosão e a exposição aos processos erosivos pelo uso e cobertura do solo. A suscetibilidade à erosão foi obtida a partir dos dados de erodibilidade dos solos (dados intrínsecos ao solo, oriundos de levantamentos pedológicos), declividade do terreno e erosividade da chuva, ao passo que a exposição aos processos erosivos foi obtida por meio dos dados das classes de uso

e cobertura do solo e, também, das pastagens degradadas do Brasil. Esse complexo cruzamento de informações foi produzido por meio de modelagens matemáticas baseadas na interpretação especializada, utilizando chaves de interpretação.

Etapas metodológicas

As bibliografias utilizadas para a consecução metodológica do trabalho, como será visto a seguir, encontram-se publicadas em Simões et al. (2021).

A carta temática de Erodibilidade dos Solos do Brasil foi gerada a partir da interpretação pedológica, por meio de conhecimento especializado, considerando de forma ponderada os quatro primeiros componentes (Unidades Taxonômicas) de cada unidade de mapeamento do Mapa de Solos do Brasil, publicado na escala 1:250.000. A carta foi originariamente gerada na forma vetorial, tendo sido rasterizada (pixels de 30 x 30 m) para permitir o geoprocessamento e a integração com os demais dados espaciais. As unidades pedológicas derivadas foram categorizadas em cinco classes que representam variação ordinal da erodibilidade dos solos em função das suas propriedades intrínsecas, quanto à sua capacidade de resistir à erosão hídrica. Foram estabelecidas as seguintes classes: (1) Muito baixa; (2) Baixa; (3) Média; (4) Alta; (5) Muito alta.

A erosividade foi determinada pelo conjunto de equações de EI30 apresentadas no trabalho de Oliveira et al. (2012), exceto para a região Norte do Brasil (Manaus-AM) na qual foi utilizada a equação proposta por Barbosa et al. (2015). Essas equações foram plotadas em formato de ponto no ambiente SIG do ArcGIS para a produção de zonas de proximidade da equação utilizando o método dos polígonos de Thiessen. Com o estabelecimento dos vínculos entre as equações de EI30 e as estações pluviométricas, foi possível calcular no Microsoft Excel® o EI30 para cada um dos meses e estações pluviométricas. O somatório do EI30 de cada mês resultou na erosividade da chuva

anual de cada estação. De posse desses resultados, que eram pontuais, gerou-se o mapa de R por meio da interpolação com o IDW. Para finalizar, o mapa foi reclassificado de acordo com as classes de erosividade anual propostas por Carvalho (2008).

A carta de declividade do terreno foi gerada a partir de um modelo digital do terreno, com base nos dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), para pixel de 30 m. A variável foi dividida em cinco classes de declividade de acordo com os intervalos das classes de relevo estabelecidas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos et al., 2018), a saber: (1) Muito baixa (relevo plano: $\leq 3\%$ de declividade); (2) Baixa (suave ondulado: > 3 a $\leq 8\%$ de declividade); (3) Média (relevo ondulado: > 8 a $\leq 20\%$ de declividade); (4) Alta (relevo forte ondulado: > 20 a $\leq 45\%$ de declividade); e (5) Muito alta (relevo montanhoso: $> 45\%$ a $\leq 75\%$ de declividade).

O Modelo de Uso e Cobertura da Terra foi gerado a partir da integração dos dados do MapBiomass e de dados sobre as pastagens degradadas (LAPIG/UFG) a partir de simples operação de geoprocessamento ("merge"), em ambiente SIG, para acrescentar informação/camada ("layer") de pastagens degradadas (LAPIG/UFG) ao mapa de uso e cobertura fornecido pelo MapBiomass para os anos de 1985 e 2019, gerando um modelo único com mais uma classe de uso, tipificada como pastagens degradadas.

O Mapa da Vulnerabilidade dos Solos à Erosão Hídrica do Brasil constitui um modelo espacial, em escala nacional, que expressa o grau de vulnerabilidade dos solos aos processos erosivos, considerando o nível de exposição em função da cobertura vegetal natural e/ou do uso agropecuário. Os níveis de vulnerabilidade são representados em cinco classes nominais de intensidade – Muito Baixa; Baixa; Média; Alta; Muito Alta. A metodologia baseou-se em uma modelagem conceitual de integração temática baseada em conhecimento especializado. Foram utilizados os seguintes modelos de entrada: (i) Mapa da Suscetibilidade dos Solos à Erosão Hídrica do Brasil (Embrapa Solos); (ii) Mapa de Uso e Cobertura da Terra (MapBiomass coleção 5). Os modelos foram segmentados em cinco classes de intensidade e reamostrados em matrizes com pixels de 30 x 30m. O processamento ocorreu por meio da plataforma

do *Google Earth Engine*⁶. Os códigos computacionais encontram-se no Anexo II do relatório de Simões et al. (2021).

Benefícios proporcionados

Dessa forma, aliando o conhecimento intrínseco do solo, sua ocorrência na natureza e o uso atual das terras, o mapa de vulnerabilidade à erosão se apresenta como uma informação robusta para a comunidade acadêmica e para os formuladores e executores de políticas públicas no que diz respeito à identificação de áreas com maior potencial de serem degradadas pelo uso do solo.

Meta 2.4.2 – Desenvolver ou inovar estratégias de reinserção de solos degradados ao sistema agrícola

No que diz respeito às estratégias de reinserção de solos degradados ao sistema agrícola, optou-se pelo caminho do desenvolvimento tecnológico envolvendo a metodologia de Aptidão Agrícola das Terras. Apesar de trabalhos com a aplicação desse método serem executados há bastante tempo, em conexão com os levantamentos de solos, abrangendo áreas de dimensões variadas, ainda não se dispunha de uma interpretação integral do potencial agrícola das terras brasileiras que possibilitasse a visão geral do potencial de uso agropecuário do País. Além disso, foram implementadas melhorias no sistema ao se propor uma avaliação integrada das condições das terras, visando à identificação do uso mais sustentável e possível sob diferentes níveis de manejo, e a adoção de três níveis de manejo, o que representa o reconhecimento da distinta importância dos problemas de solos de acordo com as condições socioeconômicas do agricultor e da região. Com o objetivo de mostrar as alternativas de uso de uma determinada área, o que inclui, também, aquelas áreas que apresentam solos degradados, as terras são posicionadas em seis grupos,

(6) Disponível em: <https://earthengine.google.com>.

em função de suas condições naturais e, também, da viabilidade de melhoramento das cinco qualidades básicas (fertilidade natural, excesso de água, deficiência de água, suscetibilidade à erosão e impedimentos à mecanização) e da intensidade da limitação que persistir após a utilização de práticas agrícolas inerentes aos níveis de manejo A (baixo nível tecnológico), B (médio nível tecnológico) e C (alto nível tecnológico), um fato inovador em relação a sistemas anteriores.

A avaliação da aptidão agrícola consiste, em síntese, na interpretação das qualidades do ecossistema por meio da estimativa das limitações das terras para uso agrícola e das possibilidades de correção ou redução dessas limitações, de acordo com diferentes níveis de manejo. Tem como finalidade a indicação do potencial agrícola das terras para diferentes tipos de uso e procura atender a uma relação custo/benefício favorável, sob os pontos de vista socioeconômico e ambiental, atendendo assim aos pilares da sustentabilidade. Em última análise, a classificação da aptidão agrícola expressa o tipo de exploração agropecuária mais sustentável possível para uma determinada área, tendo como referência, de um lado, o retorno econômico e, de outro, a preservação da qualidade das terras. Deve ser entendida, portanto, não como uma recomendação para uso direto pelos produtores rurais, mas como uma base para o planejamento agrícola.

Etapas metodológicas

A avaliação da aptidão agrícola das terras do Brasil foi realizada conforme procedimento metodológico adotado pela Embrapa, tendo como referência o mapa de solos do país publicado pelo IBGE (2018), em escala 1:250.000, complementado por distinções de condições climáticas relacionadas à disponibilidade hídrica e à regionalização de ambientes naturais de características peculiares, que podem influenciar as condições para uso agrícola ou mereçam atenção especial no tocante ao manejo e conservação de suas terras. Dessa avaliação foram excluídas as Unidades de Conservação de Proteção Integral e as Terras Indígenas, assim como as áreas ainda não desmatadas da Amazônia Legal, devido à condição especial do bioma Amazônia, reserva natural da biodiversidade. Visando possibilitar a

interpretação da grande quantidade de dados disponíveis no mapa pedológico, a avaliação foi realizada por meio do estabelecimento de cruzamentos entre as diferentes características expressas na denominação dos solos, constante da legenda de identificação do mapa de solos, referentes a classes de primeiro, segundo, terceiro e quarto níveis categóricos do *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (Santos et al., 2018), assim como informações de textura, horizonte A, saturação por bases, relevo e ocorrência de pedregosidade, rochosidade e erosão.

Assim, a primeira fase de execução dos trabalhos consistiu na organização dos dados e informações do mapa pedológico, identificando-se as interações entre os distintos parâmetros com possibilidade de influenciar as cinco qualidades básicas do ecossistema agrícola (deficiência de fertilidade, deficiência de água, deficiência de oxigênio, suscetibilidade à erosão, impedimentos à mecanização). Em seguida, foram estabelecidos os graus de limitação relativos a cada uma delas, considerando-se as condições de manejo em baixo (manejo A), médio (manejo B) e alto nível tecnológico (manejo C), que pelo confronto com as regras estabelecidas nos quadros-guia (referentes a condições de clima tropical úmido, subtropical e semiárido), por meio de procedimento informatizado com uso de planilhas do Microsoft Excel®, resultou na classificação da aptidão agrícola dos solos componentes de cada unidade de mapeamento do mapa pedológico.

Procedeu-se, então, a uma revisão geral dos critérios de interpretação, realizando-se diversos ajustes e adequações nas regras de cruzamento dos diferentes parâmetros e no estabelecimento dos graus de limitação. Foi também aprimorada a distinção das condições de disponibilidade hídrica, com a espacialização de sete domínios climáticos, assim como foram elaborados critérios mais específicos para a avaliação das condições das terras de alguns ambientes particulares, como o Pantanal Matogrossense e seu entorno, a Ilha do Bananal e as áreas de restinga.

Como parte do processo de aprimoramento do método de avaliação do potencial agrícola, ora em curso, visando subsidiar as ações

futuras de interpretação do potencial de uso das terras pelo PronaSolos, foi realizado um estudo adicional, abordando condições ambientais mais específicas, no contexto da XIV RCC (Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos, estados de Goiás e Tocantins), no qual são apresentadas, em caráter experimental, algumas inovações no esquema metodológico original (Carvalho Filho et al., 2023), entre elas a incorporação aos quadros-guia de critérios adicionais para avaliação da aptidão para silvicultura em condições de manejo mais tecnicado (correspondente ao nível de manejo C), além da limitação referente à profundidade efetiva dos solos (impedimentos ao enraizamento), especificamente para avaliação das possibilidades de uso com silvicultura e espécies arbóreas. Foi também ampliada a simbologia de representação da aptidão agrícola, incluindo a indicação das possibilidades de usos menos intensivos, caso pertinente.

Foi assim constituída a versão atual do mapa de aptidão agrícola do Brasil, em escala 1:500.000, que será disponibilizado, na comemoração dos 50 anos da Embrapa Solos em 28/05/2025, para consulta em formato vetorial (*shapefile*) na plataforma da Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa (GeoInfo) e no Portal de Dados da Plataforma Tecnológica do PronaSolos.

Benefícios proporcionados

O mapa de aptidão agrícola das terras do Brasil, na escala 1:500.000, apresenta a distribuição espacial das condições para uso agropecuário em todo o território nacional, representadas por diferentes categorizações relacionadas ao potencial produtivo, que indicam diversas possibilidades de utilização das terras – informações fundamentais para fins de planejamento, gestão estratégica e desenvolvimento territorial. Para cada condição de manejo especificada (níveis A, B e C), são indicadas as classes de aptidão agrícola boa, regular ou restrita para o uso com lavouras dos solos que ocorrem nas distintas unidades delimitadas no mapa, o que permite identificar o potencial de uso das terras tanto para pequenos produtores rurais, com baixo grau de instrução e descapitalizados, quanto

para agricultores de nível médio e para a agricultura em escala empresarial. São apresentadas também as possibilidades para usos menos intensivos, com pastagens (plantadas ou nativas) ou silvicultura ou, caso não haja condições mínimas de sustentabilidade econômico-ambiental, indicação para preservação da natureza ou algum outro tipo de uso não agrícola.

O mapa de aptidão agrícola do Brasil fornece, portanto, uma base integrada para orientação do uso agrícola, em todo o território nacional, além de ajudar nos indicativos para a reinserção de terras degradadas ao sistema produtivo. Devido ao seu caráter generalizado e à limitação inerente à pequena escala, que inviabilizam sua aplicação direta para tomada de decisão em nível de fazendas, as informações disponibilizadas são indicadas para planejamentos de caráter regional – estados, regiões administrativas e grandes bacias hidrográficas. Podem, assim, ser usadas para fins de direcionamento de atividades agropecuárias, alocação de recursos e regionalização de incentivos, ou mesmo para definição da distribuição de redes viárias de escoamento da produção, priorização de estratégias conservacionistas em áreas mais vulneráveis à degradação e, também, como subsídio a zoneamentos diversos. Além disso, esse mapeamento pode ser utilizado na avaliação do potencial de expansão da produção agrícola em nível municipal ou de microrregiões geográficas, bem como para direcionamento e adequação de projetos de extensão rural ou, ainda, para identificação de áreas preferenciais para preservação e formação de parques.

Além de atender às necessidades gerais de planejamento do uso das terras, como suporte à tomada de decisão e subsídio a políticas públicas, as informações disponibilizadas constituem valioso guia para identificação de áreas prioritárias para atuação do Mapa, por meio de seus programas voltados ao uso sustentável das terras, como o Programa ABC+ e o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas (PNCPD). Outros dois programas de Estado diretamente beneficiados são o Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos) e o Programa Nacional de Zoneamento de Risco Climático (ZARC).

Produtos obtidos e relacionados à Meta 2.4, no contexto do TED 396/2020

- Capítulo de Livro – Avaliação da aptidão agrícola das áreas de ocorrência dos solos da XIV RCC - estados de Goiás e Tocantins (Carvalho Filho et al., 2023).
- Mapa 1:500.000 da Aptidão de Solos do Brasil – lançamento no aniversário da Embrapa Solos em 28/05/2025⁷.
- Mapa de Vulnerabilidade à erosão⁸.
- Matéria veiculada na mídia⁹.

Considerações finais

Este documento evidencia os avanços e resultados alcançados com o apoio do Ministério da Agricultura (Mapa), via TED 396/2020, cuja finalidade foi impulsionar o conhecimento e a estruturação inicial da gestão de solos no Brasil. Por meio de pesquisas em tecnologias inovadoras de mapeamento digital, pedometria e análise de solos – todas fundamentadas nos preceitos da química verde –, foram geradas informações críticas que contribuíram decisivamente para o avanço da estruturação do PronaSolos.

Os resultados obtidos têm implicações significativas para a pesquisa em solos, as práticas agrícolas e a formulação de políticas públicas. Para a pesquisa, os dados gerados ampliam a compreensão da dinâmica e variabilidade dos solos brasileiros, promovendo o desenvolvimento de metodologias mais precisas e sustentáveis.

(7) Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/map/6499>.

(8) Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/2997>.

(9) Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/8640/mapa-de-vulnerabilidade-a-erosao-dos-solos-no-brasil>.

No âmbito das práticas agrícolas, a melhoria na gestão dos dados de solos possibilita o aprimoramento do manejo e a implementação de técnicas de agricultura de precisão, resultando em maior produtividade e sustentabilidade. Em termos de políticas públicas, o fortalecimento do PronaSolos fornece subsídios robustos para a criação de estratégias de zoneamento agroecológico, seguro rural e mitigação de riscos ambientais, essenciais para a segurança alimentar e a preservação dos ecossistemas.

Contudo, o estudo apresenta limitações inerentes à abrangência territorial e à disponibilidade de dados em escalas mais detalhadas, fatores que restringem a aplicabilidade imediata dos resultados em determinadas regiões. Dessa forma, sugere-se que pesquisas futuras ampliem a cobertura dos levantamentos de solos e integrem novas tecnologias de sensoriamento remoto e inteligência artificial para refinar a análise e a interpretação dos dados de solos.

O apoio proporcionado pelo Mapa, por meio do TED 396/2020, foi fundamental para o desenvolvimento das atividades de pesquisa elencadas neste documento, demonstrando a importância de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento na área de solos. Tais investimentos não apenas impulsionam a inovação tecnológica, mas também são essenciais para o desenvolvimento sustentável da agricultura, que depende intrinsecamente de um manejo eficiente dos recursos naturais.

Além disso, é crucial destacar a relevância do suporte do referido TED para a recuperação e modernização da infraestrutura da Embrapa Solos. Investimentos em transporte (veículos), processamento digital de campo e de escritório (computadores, notebooks, softwares) e na melhoria de espaços físicos (salas de reunião e auditórios com mobiliário adequado e ar-condicionado) são determinantes para ampliar a capacidade de execução de projetos estruturais. Tais melhorias potencializam a eficiência operacional e a qualidade das pesquisas, facilitando a difusão do conhecimento e a implementação de práticas inovadoras no gerenciamento dos solos brasileiros.

Em síntese, os avanços promovidos por este projeto estabelecem bases sólidas para o fortalecimento do PronaSolos e ressaltam

a necessidade de um compromisso contínuo com a inovação e a modernização dos sistemas de informação e infraestrutura, fundamentais para garantir a sustentabilidade e a competitividade da agricultura no Brasil.

Referências

- BARBOSA, A. J. S.; BLANCO, C. J. C.; MELO, A. M. Q. de. Determinação do fator energético da chuva (R) para Belém-PA. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSSÉDIMENTOLOGIA, 1., 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330934491_DETERMINACAO_DO_FATOR_ENERGETICO_DA_CHUVA_R_PARA_BELEM-PA. Acesso em: 22 set. 2025.
- BHERING, S. B.; CARVALHO JUNIOR, W. de; RENDEIRO, N. P.; CHAGAS, C. da S.; MACEDO, J. R. de; LIMA, E. de P.; SILVA, E. F. da; OLIVEIRA, A. P.; GONÇALVES, A. O.; COMUNELLO, E.; MARTINS, A. M. M.; VASQUES, G. M.; DART, R. de O.; CALDERANO FILHO, B.; DANIEL FILHO, A. C. B.; LOPES, C. H. L.; MEURER, I.; LEAL, R. B.; SANTOS, J. C. V. Mapa do Zoneamento Agroecológico do Mato Grosso do Sul. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2023. Escala 1:100.000. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/1692>. Acesso em: 29 set. 2025.
- BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HARTEMINK, A. E.; BREVIK, E. C. Soil-forming factors and Soil Taxonomy. **Geoderma**, v. 226/227, p. 231-237, Aug. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.016>.
- BRASIL. **Decreto nº 9.414, de 19 de junho de 2018**. Institui o Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil. 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/d9414.htm. Acesso em: 15 set. 2025.
- BRASIL. **Decreto nº 10.269, de 6 de março de 2020**. Institui o Comitê Estratégico e o Comitê-Executivo do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2023/2020/decreto/d10269.htm.

gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10269.htm. Acesso em: 15 set. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nº 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14119.htm. Acesso em: 15 set. 2025.

CAMPBELL, G. S.; SMITH, D. M.; TEARE, B. L. Application of a dew point method to obtain the soil water characteristic. In: SCHANZ, T. (ed.). **Experimental unsaturated soil mechanics**. Berlin: Springer, 2007. p. 71-77. (Springer proceedings in physics, v. 112). DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-69873-6_7.

CARVALHO FILHO, A. de; LUMBRERAS, J. F.; OLIVEIRA, A. P. de; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de; SILVA, E. F. da; UHLMANN, A.; EVANGELISTA, B. A.; ALMEIDA, R. E. M. de. Avaliação da aptidão agrícola das áreas de ocorrência dos solos da XIV RCC - estados de Goiás e Tocantins. In: SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, R. E. M. de; MADARI, B. E. (ed.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. E-book. cap. 22. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155338>. Acesso em: 15 set. 2025.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

COSTABEL, S.; HILLER, T. Soil hydraulic interpretation of nuclear magnetic resonance measurements based on circular and triangular capillary models. **Vadose Zone Journal**, v. 20, n. 2, e20104, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20104>.

DEMATTÊ, J. A. M.; DOTTO, A. C.; BEDIN, L. G.; SAYÃO, V. M.; SOUZA, A. B. e. Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: constructing the future of a hybrid laboratory for low

environmental impact. **Geoderma**, v. 337, p. 111-121, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.010>.

DINIZ, F. **Na COP26, Embrapa apresenta mapas de estoque de carbono orgânico do solo**. 2 nov. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/65904039/na-cop26-embrapa-apresenta-mapas-de-estoque-de-carbono-organico-do-solo>. Acesso em: 15 set. 2025.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)**: managing systems at risk. Rome: FAO; London: Earthscan, 2011. 285 p. Disponível em: <https://www.fao.org/4/i1688e/i1688e.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMPANHA, M. M. (ed.). **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 121 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1110948>. Acesso em: 15 set. 2025.

FERREIRA, A. C. de S.; CEDDIA, M. B.; COSTA, E. M.; PINHEIRO, E. F. M.; NASCIMENTO, M. M. do; VASQUES, G. M. Use of airborne radar images and machine learning algorithms to map soil clay, silt, and sand contents in remote areas under the Amazon rainforest. **Remote Sensing**, v. 14, n. 22, 5711, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14225711>.

FONTANA, A.; BALIEIRO, F. de C.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F. Funções para predição do carbono total e estoque de carbono em perfis da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos. In: LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; SANTOS, L. A. C. dos; RODRIGUES, M. do R. L.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (ed.). **Guia de campo da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC das várzeas do médio Rio Amazonas e entorno**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. cap. 22, p. 651-676. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1178898/1/Guia-de-campo-da-XV-RCC-2025.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025.

FONTANA, A.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. de C. (ed.). **Protocolo para coleta de amostras e quantificação do carbono no solo da agricultura de baixo carbono**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 31 p.

(Embrapa Solos. Documentos, 243). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1169442>. Acesso em: 15 set. 2025.

FONTANA, A.; VIVIAN, A. M.; ARCO, M. A. de L.; MENEZES, A. R. de; SANTOS, B. V.; CLEMENTE, E. de P. **Níveis de referência do carbono orgânico no solo sob vegetação natural dos biomas brasileiros**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2024. 9 p. (Embrapa Gado de Corte. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 59). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1169042>. Acesso em: 15 set. 2025.

GALAITSI, S.; VEYSEY, J.; HUBER-LEE, A. **Where is the added value? A review of the water-energy-food nexus literature**. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2018. Disponível em: <https://www.sei.org/publications/added-value-review-water-energy-food-nexus-literature/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

GOLDEN, M.; MICHELI, E.; DITZLER, C.; ESWARAN, H.; OWENS, P.; ZAHNG, G.; MCBRATNEY, A.; HEMPEL, J.; MONTANARELLA, L.; SCHAD, P. Time for a Universal Soil Classification System. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., 2010, Brisbane. **Proceedings** [...]. Brisbane: IUSS, 2010. Disponível em: <https://old.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0463.pdf>. Acesso em: 24 set. 2025.

GUIMARÃES, D. V.; TAVARES, O. C. H.; OLIVEIRA, A. P. de; BORGES, A. A. A.; MUSACCHIO, I.; LUMBRERAS, J. F.; NOVOTNY, E. H. Curvas de retenção de água de horizontes e solos selecionados da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos obtidas por ressonância magnética nuclear em baixo campo. In: LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; SANTOS, L. A. C. dos; RODRIGUES, M. do R. L.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (ed.). **Guia de campo da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC das várzeas do médio Rio Amazonas e entorno**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. cap. 20, p. 607-640. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1178898/1/Guia-de-campo-da-XV-RCC-2025.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025.

HUNT, A.; EWING, R. **Percolation theory for flow in porous media**. 2nd ed. Berlin: Springer, 2009. (Lecture notes in physics, v. 771). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89790-3>.

IBGE. **Mapa de solos do Brasil**. Rio de Janeiro, 2018. 1 mapa, color. Escala 1:250.000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoesambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>. Acesso em: 3 dez. 2019.

KRASILNIKOV, P.; ARNOLD, R.W.; IBÁÑEZ, J.-J. Soil classifications: their origin, the state-of-the-art and perspectives. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 19., 2010, Brisbane. **Proceedings** [...]. Brisbane: IUSS, 2010. Disponível em: <https://old.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/2119.pdf>.

LEMES, M.; MACHADO, A.; VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; LOPES, R. T.; ROSAS, R. O. Influence of soil cover on pore distribution in a Ferralsol evaluated by 3D computerized microCT. In: PEDOMETRICS BRAZIL, 2., 2021, Rio de Janeiro. **Annals** [...]. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1139948>. Acesso em: 15 set. 2025.

LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; SANTOS, L. A. C. dos; RODRIGUES, M. do R. L.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. (ed.). **Guia de campo da XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC das várzeas do médio Rio Amazonas e entorno**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 803 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1178898/1/Guia-de-campo-da-XV-RCC-2025.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025.

MEDICI, G.; WEST, L. J.; BANWART, S. A. Groundwater flow velocities in a fractured carbonate aquifer-type: implications for contaminant transport. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 222, p. 1-16, Apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.02.001>.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington, DC: Island Press, 2003. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/en/Framework.html>. Acesso em: 15 set. 2025.

NASCIMENTO, C.; VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; CEDDIA, M. Iron rods in support of the use of ground penetrating radar with 450 MHz monostatic antenna for imaging argillic horizon. In: PEDOMETRICS BRAZIL,

2., 2021, Rio de Janeiro. **Annals** [...]. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1140305>. Acesso em: 15 set. 2025.

NASCIMENTO, C. W. R. do; CEDDIA, M. B.; VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; MARTINS, S. S.; OLIVEIRA, R. P. de; TAVARES, S. R. de L. **Identifying soil horizons transitions for ground-truthing and interpreting ground penetrating radar (GPR) imagery of Planosols**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023. E-book. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 285). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1156146>. Acesso em: 15 set. 2025.

NIMMO, J. R. Vadose water. In: LIKENS, G. E. (ed.). **Encyclopedia of inland waters**. Oxford: Academic Press, 2009. p. 766-777. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00014-4>.

NOVOTNY, E. H.; AZEVEDO, E. R. de; GODOY, G. de; CONSALTER, D. M.; COOPER, M. Determination of soil pore size distribution and water retention curve by internal magnetic field modulation at low field 1H NMR. **Geoderma**, v. 431, 116363, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116363>.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>.

OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ARAUJO FILHO, J. C. de. As Reuniões de Classificação e Correlação de Solos (RCCs): história, organização e contribuições para a pedologia brasileira. In: SOUZA-FILHO, L. F.; SILVA, R. C. da; CÉSAR, F. R. C. F.; SOUZA, C. M. M. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2021. v. 11, p. 235-290.

POLIDORO, J. C.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; CARVALHO JUNIOR, W. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; CURCIO, G. R.; CORREIA, J. R.; MARTINS, E. de S.; SPERA, S. T.; OLIVEIRA, S. R. de M.; BOLFE, E. L.; MANZATTO, C. V.; TOSTO, S. G.; VENTURIERI, A.; SA, I. B.; OLIVEIRA, V. A. de; SHINZATO, E.; ANJOS, L. H. C. dos; VALLADARES, G. S.; RIBEIRO, J. L.; MEDEIROS, P. S. C. de; MOREIRA, F. M. de S.; SILVA, L. S. L.; SEQUINATTO, L.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. de O. **Programa**

Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2016. 53 p. (Embrapa Solos. Documentos, 183). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1054924>. Acesso em: 17 set. 2025.

PORTFÓLIO serviços ambientais: pesquisa, inovação e subsídios às políticas públicas. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2020. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127107>. Acesso em: 15 set. 2025.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras.** 3. ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330132>. Acesso em: 15 set. 2025.

RIEU, M.; SPOSITO, G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. theory. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 5, p. 1231-1238, Sept./Oct. 1991. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500050006x>.

RODRIGUES, A. **Novos mapas de estoque de carbono dos solos vão subsidiar políticas públicas de sustentabilidade.** 27 out. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/novos-mapas-de-estoque-de-carbono>. Acesso em: 15 set. 2025.

SANTANA, F. B. de; SOUZA, A. M. de; BALIEIRO, F. de C.; MIORANZA, M.; RODRIGUES, R. de A. R.; POPPI, R. J. Monitoring mineral-associated organic matter in tropical pastures using near infrared spectroscopy. **Brazilian Journal of Analytical Chemistry**, v. 8, n. 32, p. 78-90, jul./set. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.30744/brjac.2179-3425.AR-10-1021>.

SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, R. E. M. de; MADARI, B. E. (ed.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins.** Brasília, DF: Embrapa, 2023a. E-book. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155338>. Acesso em: 15 set. 2025.

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, 2018a. 356 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 15 set. 2025.

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; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

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; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014. E-book.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/338818>. Acesso em: 9 out. 2025.

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; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1176834/1/Sistema-Brasileiro-de-Classificacao-de-Solos-2025.pdf>. Acesso em: 8 out. 2025.

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. **Brazilian Soil Classification System**. 5th ed. rev. and exp. Brasília, DF: Embrapa, 2018b. E-book. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094001>. Acesso em: 16 set. 2025.

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. **Proposta de atualização da quinta edição do Sistema**

Brasileiro de Classificação de Solos: ano 2022. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. 133 p. (Embrapa Solos. Documentos, 233). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1147080>. Acesso em: 15 set. 2025.

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; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A. **Proposta de atualização da 5ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos:** ano 2023. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023b. 143 p. (Embrapa Solos. Documentos, 238). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1154993>. Acesso em: 15 set. 2025.

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; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A. **Proposta de atualização da 5ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos:** ano 2024. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2024. 212 p. (Embrapa Solos. Documentos, 244). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1167901>. Acesso em: 15 set. 2025.

SILVA, M. B. e; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de (ed.). **Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos:** RCC do Maranhão. Brasília, DF: Embrapa, 2020. E-book. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127220>. Acesso em: 23 set. 2025.

SIMÕES, M.; FERRAZ, R. P. D.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; BACA, J. M.; FREITAS, P. L. de; LIMA, E. de P.; KUCHLER, P. C.; ALMEIDA, M. B. F. de. **Mapeamento da vulnerabilidade à erosão hídrica dos solos brasileiros em função da dinâmica de uso e cobertura da terra:** subsídio às políticas de conservação de solo e água conduzidas pelo Mapa. 2021. Disponível em: https://staging-brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/08/PREMIO-MAPBIOMAS_VulnerabilidadeErosao_FINAL-Margareth-Simoes.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

SISTEMA Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

SOLONE, R.; BITTELLI, M.; TOMEI, F.; MORARI, F. Errors in water retention curves determined with pressure plates: effects on the soil water balance.

Journal of Hydrology, v. 470/471, p. 65-74, Nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.017>.

STINGACIU, L. R.; WEIHERMÜLLER, L.; HABER-POHLMEIER, S.; STAPF, S.; VEREECKEN, H.; POHLMEIER, A. Determination of pore size distribution and hydraulic properties using nuclear magnetic resonance relaxometry: a comparative study of laboratory methods. **Water Resources Research**, v. 46, n. 11, W11510, Nov. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009WR008686>.

STRALIOTTO, R.; PRADO, R. B.; FERRAZ, R. P. D.; SIMÕES, M.; FONTANA, A.; DENARDIN, J. E.; GIONGO, V.; AMARAL, A. J. do; BIANCHI, S. R.; BEDENDO, G. C. Intensificação da agricultura com sustentabilidade. In: TORRES, L. A.; CAMPOS, S. K. (ed.). **Megatendências da Ciência do Solo 2030**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. E-book. cap. 5. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1143326>. Acesso em: 15 set. 2025.

SUN, W.-J.; CUI, Y.-J. Determining the soil-water retention curve using mercury intrusion porosimetry test in consideration of soil volume change. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 12, n. 5, p. 1070-1079, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.022>.

TAVARES, S. R. de L.; VASQUES, G. M.; OLIVEIRA, R. P. de; DANTAS, M. M.; RODRIGUES, H. M. Proximal and remote sensor data fusion for in-depth salinization mapping in the Brazilian semiarid via machine learning. In: PEDOMETRICS BRAZIL, 2., 2021, Rio de Janeiro. **Annals [...]**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1140303>. Acesso em: 15 set. 2025.

TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: 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. pt. 1, cap. 4, p. 34-46. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1087258>.

TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M. H. dos; PIMENTEL, L. G.; VALLE, L. G. de F.; LUMBRERAS, J. F.; CERNICCHIARO, G. R. C.; SHINZATO, E. Avaliação da susceptibilidade magnética e da condutividade elétrica aparente dos perfis da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos - RCC de Goiás e Tocantins. In: SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, R. E. M. de; MADARI, B. E. (ed.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins**. Brasília, DF: Embrapa, 2023a. E-book. cap. 13. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155338>. Acesso em: 15 set. 2025.

TEIXEIRA, W. G.; SILVA, W. F. da V. e; PIMENTEL, L.; SCHAAN, D. P. O registro arqueológico no solo: as ocupações humanas na Volta Grande do Xingú - Pará. **Caderno 4 Campos**, n. 2, p. 80-101, dez. 2023b. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1160920>. Acesso em: 15 set. 2025.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>.

TROYACK, I. B.; VÖN MUHLEN, C.; VASQUES, G. M.; TEIXEIRA, W. G. Estimativa do número de amostras de solo para caracterizar elementos químicos utilizando fluorescência de raios X portátil em áreas contaminadas: estudo de caso em Resende. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 893-901, set./out. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200158>.

TURETTA, A. P. D.; FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; SCHULER, A. E.; COUTINHO, H. L. da C. Participatory assessment to define indicators for monitoring water-based payment of ecosystem services programs in Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 17, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2796>.

VASQUES, G. M.; BENITES, V. M. Soil total nitrogen, available phosphorus and available potassium maps for Brazil at 0-30, 30-60 and 60-100 cm depth intervals with 250 m spatial resolution: version 2023: technical report. In:

EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2023. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/1505>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F. Soil acidity (pH) maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021a. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/3211>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F. Soil available water maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021b. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/1822>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F. Soil bulk density maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021c. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/3036>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F. Soil clay, silt and sand content maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021d. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/2640>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F. Soil effective cation exchange capacity maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021e. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/2919>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F. Soil salinity (electrical conductivity) maps for Brazil at 0-5, 5-15,

15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021f. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/3037>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. Soil organic carbon content maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021g. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/2968>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; COELHO, M. R.; DART, R. de O.; CINTRA, L. C.; BACA, J. F.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L. Soil organic carbon stock maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm depth intervals with 90 m spatial resolution: version 2021: technical report. In: EMBRAPA. **Geoinfo**. [Brasília, DF], 2021h. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/document/2607>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; HUBER, E.; TAVARES, S. R. de L.; MARQUES, F. A.; SILVA, M. S. L. da. Ground penetrating radar (GPR) models of the regolith and water reservoir of an underground dam in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Geophysics**, v. 206, 104797, Nov. 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104797>.

VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; HUBER, E.; TAVARES, S. R. de L.; MARQUES, F. A.; SILVA, M. S. L. da. Ground penetrating radar non-invasively positions an underground dam and estimates its water reservoir shape and volume. In: PEDOMETRICS BRAZIL, 2., 2021, Rio de Janeiro. **Annals** [...]. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022b. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1140030>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; OLIVEIRA, R. P. de; HERNANI, L. C.; TAVARES, S. R. de L. Management zones from proximal soil sensors capture within-field soil property and terrain variations. In: PEDOMETRICS BRAZIL, 2., 2021, Rio de Janeiro. **Annals** [...]. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022c. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1140033>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASQUES, G. M.; RODRIGUES, H. M.; TAVARES, S. R. de L.; HERNANI, L. C.; OLIVEIRA, R. P. de. An optimized sample for assessing soil property variations across the field and within management zones efficiently. In: PEDOMETRICS BRAZIL, 2., 2021, Rio de Janeiro. **Annals** [...]. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2022d. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1140307>. Acesso em: 15 set. 2025.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 24 p. (Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. Boletim técnico, 7). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330739>. Acesso em: 22 set. 2025.

VILLARREAL, R.; LOZANO, L. A.; POLICH, N. G.; SALAZAR, M. P.; BELLORA, G. L.; TURINETTO, M. J.; SORACCO, C. G. Influence of soil water holding and transport capacity on glyphosate dynamics in two agricultural soils from Pampas Region. **Geoderma**, v. 376, 114566, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114566>.

WANG, T.; FRANZ, T. E.; ZLOTNIK, V. A. Controls of soil hydraulic characteristics on modeling groundwater recharge under different climatic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 521, p. 470-481, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.040>.

WORLD BANK. **Water in agriculture**. 2020. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>. Acesso em: 30 jul. 2020.

XAVIER, F. M. G.; PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C. Dynamic and maintenance of water purification ecosystem service in the Guandu River Hydrographic Region, Rio de Janeiro, Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 28, e12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320220109>.

