

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PLANTIO DIRETO E SEU PAPEL NA CONSERVAÇÃO DO SOLO
E DA ÁGUA- AVANÇOS E DESAFIOS NO BRASIL: Revisão**

Bibliográfica

BRUNO CAMIM RAMOS

JABOTICABAL – SP
1º Semestre/2026

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PLANTIO DIRETO E SEU PAPEL NA CONSERVAÇÃO DO SOLO
E DA ÁGUA- AVANÇOS E DESAFIOS NO BRASIL**

: Revisão Bibliográfica

BRUNO CAMIM RAMOS

Orientador: Prof. Dr. Douglas Henrique Bandeira

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias
/FCAV – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das
exigências para graduação em
Engenharia Agrônômica.

JABOTICABAL – SP
1º Semestre/2026

FICHA CATALOGRÁFICA

R175p

Ramos, Bruno Camim

Plantio direto e seu papel na conservação do solo e da água- avanços e desafios no Brasil: revisão bibliográfica / Bruno Camim Ramos. -- Jaboticabal, 2026

42 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Douglas Henrique Bandeira

1. sistema de plantio direto. 2. revolvimento do solo. 3. rotação de culturas.
4. erosão hídrica. I. Título.

Bruno Camim Ramos

**PLANTIO DIRETO E SEU PAPEL NA CONSERVAÇÃO DO SOLO
E DA ÁGUA: AVANÇOS E DESAFIOS NO BRASIL: Revisão Bibliográfica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em **Engenharia Agrônômica**.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Henrique Bandeira

Coorientador (se houver): Marcílio Vieira Martins Filho

Área de Concentração: Conservação do Solo e da Água

Trabalho aprovado em 26/06/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA**
Data: 26/06/2026 17:07:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Orientador Douglas Henrique Bandeira

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **NILTON EUGENIO MARIO**
Data: 26/06/2026 17:03:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me Nilton Eugénio Mário

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL MONTANARI**
Data: 26/06/2026 16:57:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr Rafael Montanari

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ**
Data: 02/07/2026 16:20:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mara Cristina Pessoa da Cruz
Chefe do Departamento

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais por sempre me apoiaram no caminho dos estudos. Agradeço também ao professor Douglas Henrique Bandeira que me auxiliou desde o início e teve a disponibilidade e extrema disposição para me ajudar a realizar meu trabalho de conclusão de curso, por fim agradeço aos meus amigos e companheiros da república Tôa-Tôa que me ensinaram que a faculdade vai além das portas da universidade.

SUMÁRIO

RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 METODOLOGIA DA REVISÃO.....	3
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1 Dinâmica da erosão hídrica no solo.....	5
3.2 Classificação da erosão hídrica do solo.....	7
3.3 Fatores determinantes da erosão hídrica.....	9
3.3.1 Influência do clima e das precipitações.....	10
3.3.2 Características do solo.....	11
3.3.3 Influência do relevo e da declividade.....	12
3.3.4 Uso e práticas de manejo do solo.....	13
3.4 Impactos da erosão hídrica.....	15
3.5 Sistemas de preparo e manejo do solo.....	17
3.5.1 Sistema de preparo convencional.....	19
3.5.2 Sistema de plantio direto.....	21
3.5.2.1 Desafios e limitações do SPD no Brasil.....	23
3.5.2.2 Contribuições do SPD para a conservação da água.....	24
3.5.3 Sistema de cultivo mínimo.....	25
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
5 REFERÊNCIAS.....	30

RESUMO

A erosão hídrica é um dos principais processos de degradação dos solos. A erosão hídrica constitui um dos principais processos de degradação dos solos agrícolas, ocasionando perdas expressivas de nutrientes, matéria orgânica e produtividade, além de comprometer a qualidade dos recursos hídricos. No Brasil, a intensificação da agricultura e o uso de sistemas convencionais de preparo do solo contribuíram para o agravamento dos processos erosivos, tornando necessária a adoção de práticas conservacionistas. Nesse contexto, o Sistema de Plantio Direto (SPD) destaca-se como uma das principais tecnologias voltadas à conservação do solo e da água, fundamentando-se na ausência de revolvimento, na manutenção de cobertura vegetal permanente e na rotação de culturas. Este trabalho teve como objetivo analisar, por meio de revisão bibliográfica de caráter narrativo, os avanços, benefícios e desafios do SPD na agricultura brasileira. A revisão foi realizada com base em artigos científicos, livros e documentos institucionais publicados entre 2015 e 2025. Os estudos analisados demonstram que o SPD reduz as perdas de solo em mais de 80% em relação ao preparo convencional, com valores inferiores a $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, aumenta a infiltração de água (cerca de 45 mm h^{-1}) e eleva a umidade do solo em 15–20% no Cerrado durante a estação seca. Entretanto, desafios como compactação superficial, dependência de herbicidas e a adoção inadequada dos princípios do sistema (SPD simplificado) ainda limitam sua eficiência plena. Conclui-se que o SPD é uma estratégia fundamental para a sustentabilidade agrícola, mas sua eficácia depende da implementação integral de seus pilares e da adaptação às diferentes realidades regionais.

Palavras-chave: sistema de plantio direto; revolvimento do solo; rotação de culturas; erosão hídrica.

ABSTRACT

NO-TILLAGE SYSTEM AND ITS ROLE IN SOIL AND WATER CONSERVATION: ADVANCES AND CHALLENGES IN BRAZIL: A Literature Review

Water erosion is a major process of agricultural soil degradation, causing significant losses of nutrients, organic matter, and productivity, while also compromising water resource quality. In Brazil, the intensification of agriculture and the use of conventional tillage systems have exacerbated erosion processes, necessitating the adoption of conservationist practices. In this context, the No-Tillage System (NTS) stands out as a key technology for soil and water conservation, based on the absence of soil disturbance, the maintenance of permanent plant cover, and crop rotation. This study aimed to analyze—through a narrative literature review—the advances, benefits, and challenges of the NTS in Brazilian agriculture. The review was based on scientific articles, books, and institutional documents published between 2015 and 2025. The analyzed studies demonstrate that the NTS reduces soil loss by more than 80% compared to conventional tillage—resulting in rates below $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ —increases water infiltration (to approximately 45 mm h^{-1}), and raises soil moisture by 15–20% in the Cerrado region during the dry season. However, challenges such as surface compaction, herbicide dependency, and the improper adoption of the system's principles (simplified NTS) still limit its full efficiency. It is concluded that the NTS is a fundamental strategy for agricultural sustainability, yet its effectiveness depends on the full implementation of its pillars and adaptation to diverse regional realities.

Keywords: no-tillage system; soil disturbance; crop rotation; water erosion.

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro é uma atividade reconhecida mundialmente por sua elevada produtividade, competitividade e relevância estratégica, consolidando o país como uma das principais potências agrícolas globais. Atualmente, quando considerada toda a cadeia do agronegócio, o setor responde por cerca de 29,4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, evidenciando sua expressiva contribuição para a economia nacional (CEPEA, 2024).

Além disso, a agropecuária, segmento primário do setor, representou aproximadamente 7,1% do PIB em 2025, com crescimento de 11,7% no período, sendo o principal responsável pela expansão econômica do país (IBGE, 2025). O Brasil ocupa posição de destaque na produção e exportação de commodities agrícolas, sendo líder global em produtos como soja, café, açúcar, carnes e suco de laranja. Em 2025, a produção de grãos atingiu volumes recordes superiores a 320 milhões de toneladas, reforçando o papel do país na segurança alimentar global (CONAB, 2025). Esse desempenho é impulsionado por fatores como ampla disponibilidade de terras agricultáveis, condições climáticas favoráveis, abundância de recursos hídricos e avanços tecnológicos aplicados à produção agrícola (EMBRAPA, 2018).

Historicamente, o modelo agrícola baseado no preparo convencional do solo, caracterizado pelo uso intensivo de aração, gradagem e, em alguns casos, queimadas, resultou em sérios impactos ambientais. Esse sistema promoveu a degradação do solo, perdas significativas de matéria orgânica e redução da

fertilidade, além de intensificar processos erosivos (LAL, 2015; PIMENTEL et al., 1995). Estudos apontam que as práticas inadequadas de manejo estão diretamente associadas à aceleração da erosão hídrica e à perda da camada superficial do solo, comprometendo a sustentabilidade da produção agrícola. Estima-se que a erosão hídrica remova cerca de 600 milhões de toneladas de solo por ano no Brasil, com perdas de nutrientes associadas que elevam os custos de produção e reduzem a vida útil das áreas agricultáveis (EMBRAPA, 2018; FAO, 2017). Diante da necessidade de conciliar o aumento da produção com a conservação ambiental, torna-se essencial a adoção de sistemas de manejo mais sustentáveis.

Nesse contexto, o Sistema de Plantio Direto (SPD) destaca-se como uma das principais tecnologias conservacionistas adotadas no Brasil. Introduzido no país a partir da década de 1970, consolidou-se como um dos pilares da agricultura sustentável em regiões tropicais (FEBRAPDP, 2020). Atualmente, o Brasil possui uma das maiores áreas sob SPD no mundo, com cerca de 33 milhões de hectares, embora partisse dessa área ainda opere sob formas simplificadas do sistema. O SPD não se limita à ausência de revolvimento do solo, mas engloba um conjunto de práticas conservacionistas: manutenção de cobertura vegetal permanente (palhada), rotação e diversificação de culturas, e mínima mobilização restrita à linha de semeadura (DERPSCH et al., 2014). Essas práticas promovem melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, aumentando a matéria orgânica, a capacidade de troca catiônica e a atividade microbológica (FRANCHINI et al., 2012; REICHERT et al., 2018).

Os benefícios do SPD são amplamente reconhecidos. No controle da erosão hídrica, a cobertura vegetal permanente reduz o impacto das gotas de chuva, diminui o escoamento superficial e aumenta a infiltração de água no solo (PANACHUKI et al., 2011). Estudos quantitativos indicam que o SPD pode reduzir as perdas de solo em mais de 80% em comparação ao preparo convencional, além de aumentar a infiltração de água em até 30% (PANACHUKI et al., 2011). Essa maior infiltração contribui para a recarga de aquíferos, a manutenção da umidade do solo em períodos de estiagem e a mitigação dos efeitos de secas, conferindo maior estabilidade produtiva, especialmente em regiões sujeitas a eventos climáticos extremos. Além disso, o SPD desempenha papel relevante na mitigação das mudanças climáticas: favorece o sequestro de carbono no solo e está inserido em políticas públicas como o Plano ABC+ (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) (BRASIL, 2021). Com o aumento da frequência de chuvas intensas previsto para o Brasil, a capacidade do SPD em reduzir o escoamento superficial e aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas torna-se ainda mais estratégica.

Apesar dos avanços, a adoção plena do SPD ainda enfrenta desafios significativos que a literatura recente tem apontado de forma crítica. Grande parte das áreas agrícolas no Brasil utiliza versões simplificadas do sistema, caracterizadas por baixa diversificação de culturas (monocultura soja-milho), uso insuficiente de plantas de cobertura e produção de palhada abaixo do necessário para proteção eficaz do solo (DERPSCH et al., 2014). Esse “SPD simplificado” limita os benefícios em longo prazo e pode levar à compactação superficial, especialmente em áreas com tráfego intenso de máquinas, resultando em

aumento da resistência à penetração e redução da infiltração (REICHERT et al., 2018). Além disso, o SPD apresenta dependência química expressiva, com maior uso de herbicidas, notadamente o glifosato, para o controle de plantas daninhas na ausência de revolvimento. Essa dependência tem gerado preocupações quanto ao desenvolvimento de resistência e aos impactos ambientais (ARAÚJO et al., 2021). Outros desafios incluem a necessidade de manejo adequado da fertilidade em superfície (correção da acidez sem incorporação), o controle de pragas e doenças associadas à palhada permanente, e a adaptação do sistema às diferentes realidades edafoclimáticas do país.

As respostas do SPD variam conforme a região brasileira. Na região Sul, onde o sistema foi amplamente adotado a partir da década de 1980 em resposta à erosão intensa em relevos declivosos, os ganhos em conservação do solo foram mais pronunciados. No Cerrado, a ênfase do SPD recai sobre a conservação da água e a manutenção da umidade em solos com estação seca definida, sendo fundamental a escolha de plantas de cobertura tolerantes ao déficit hídrico (como braquiárias e milheto). Já em regiões como o MATOPIBA e a Amazônia, os desafios incluem a baixa produção de palhada em condições de alta temperatura e umidade, além da necessidade de integrar o SPD com sistemas florestais ou silvipastoris para garantir sustentabilidade.

Diante desse contexto, este trabalho busca responder à seguinte questão: quais são os principais avanços quantitativos e limitações práticas do SPD na

conservação do solo e da água no Brasil, considerando as diferentes regiões e os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pelo manejo simplificado.

2 METODOLOGIA DA REVISÃO

O presente trabalho constitui uma revisão bibliográfica de caráter narrativo, elaborada com o objetivo de sintetizar e analisar criticamente os avanços e desafios do Sistema de Plantio Direto (SPD) na conservação do solo e da água no Brasil.

A pesquisa bibliográfica foi realizada entre janeiro e maio de 2026 nas bases de dados SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), Scopus (Elsevier), Google Acadêmico e Portal de Periódicos CAPES e as estratégias de busca foram elaboradas utilizando descritores em português e inglês, combinados por operadores booleanos ("AND" e "OR"), respeitando as particularidades de cada base de dados.

As expressões completas utilizadas são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Estratégias de busca utilizadas nas bases de dados

Base de dados	String de busca utilizada
SciELO	("sistema de plantio direto" OR "plantio direto") AND ("erosão hídrica" OR erosão) AND ("conservação do solo" OR "conservação da água")
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("no-tillage" OR "no tillage" OR "no-till system") AND TITLE-ABS-KEY ("soil erosion" OR "water erosion") AND TITLE-ABS-KEY ("soil conservation" OR "water conservation")
Google Acadêmico	"sistema de plantio direto" "erosão hídrica" "conservação do solo" Brasil
Portal CAPES	("no-tillage" OR "sistema de plantio direto") AND ("soil erosion" OR "water erosion") AND ("soil conservation" OR "water conservation")

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para esta pesquisa então, foram empregados os seguintes descritores em português e inglês: "sistema de plantio direto" (*no-tillage system*); "erosão hídrica" (*water erosion*); "conservação do solo" (*soil conservation*); "conservação da água" (*water conservation*); "SPD Brasil" (*no-till Brazil*); "rotação de culturas" (*crop rotation*); "cobertura do solo" (*soil cover*); "compactação do solo" (*soil compaction*); "plantas de cobertura" (*cover crops*). Os operadores booleanos *AND* e *OR* foram utilizados para ampliar ou restringir os resultados das buscas conforme os objetivos da revisão.

O período de publicação priorizado compreendeu os anos de 2015 a 2025, com o objetivo de contemplar os avanços mais recentes relacionados ao Sistema de Plantio Direto. Referências anteriores a esse período foram mantidas apenas quando consideradas clássicas e indispensáveis para a fundamentação dos conceitos abordados.

E as buscas foram realizadas nos idiomas português e inglês, onde após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionadas e analisadas 43 referências, constituídas por 36 artigos científicos, 5 documentos institucionais e 2 livros, que subsidiaram a elaboração desta revisão bibliográfica.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Dinâmica da erosão hídrica no solo

O solo é um recurso natural finito e essencial para a manutenção da vida, desempenhando funções fundamentais como suporte ao desenvolvimento vegetal, habitat para organismos e regulação do ciclo hidrológico. Estudos recentes reforçam que a degradação do solo, especialmente por processos erosivos, compromete diretamente a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e a estabilidade dos ecossistemas (FAO, 2015; BÜNEMANN et al., 2018). Nesse contexto, a conservação do solo depende da adoção de práticas de manejo adequadas, capazes de minimizar processos de degradação como a erosão hídrica.

A erosão hídrica é provocada pela ação da chuva e do escoamento superficial, sendo considerada uma das principais formas de degradação dos solos agrícolas no mundo, especialmente em regiões tropicais (PANAGOS et al., 2015; MONTANARELLA et al., 2016). Globalmente, estima-se que a erosão hídrica afete cerca de 35% das terras agrícolas, com taxas médias de perda de solo que variam de 10 a 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ em áreas sob manejo convencional, valores muito superiores à taxa de formação natural do solo (0,5 a 1,5 t ha⁻¹ ano⁻¹) (LAL, 2020; BORRELLI et al., 2017). No Brasil, perdas anuais de solo podem superar 30 t ha⁻¹ em solos com declividade acentuada e preparo convencional, enquanto sob SPD as perdas caem para menos de 5 t ha⁻¹ (BERTOL et al., 2010; PANACHUKI et al., 2011).

A dinâmica da erosão hídrica ocorre em três estágios: desagregação, transporte e deposição. O impacto das gotas de chuva promove a ruptura dos agregados (*splash erosion*), reduzindo a estabilidade estrutural (NEARING et al., 2017). Chuvas com alta intensidade ($>25 \text{ mm h}^{-1}$) causam maior desagregação. Em seguida, o escoamento superficial transporta partículas, processo influenciado pela declividade e cobertura vegetal. A presença de palhada reduz a velocidade do escoamento em até 60% e a capacidade de transporte de sedimentos em mais de 80% (BLANCO-CANQUI & RUIS, 2020). Por fim, a deposição ocorre em áreas de menor declive ou em corpos d'água, contribuindo para o assoreamento.

Os modelos preditivos de erosão, como a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE), demonstram que a interação entre a erosividade da chuva (fator R) e a erodibilidade do solo (fator K) exerce papel fundamental na estimativa das perdas de solo por erosão hídrica (RENARD et al., 1997; ALEWELL et al., 2019).

No Brasil, estudos baseados em séries históricas de precipitação e em mapeamentos nacionais indicam que os maiores valores de erosividade concentram-se nas regiões Norte, Nordeste e em parte do Sudeste, podendo ultrapassar $10.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em áreas de elevada intensidade pluviométrica, evidenciando elevado potencial erosivo e maior suscetibilidade à degradação quando o solo permanece desprotegido (OLIVEIRA et al., 2013; SILVA et al., 2020).

A ação antrópica intensifica a erosão: áreas sob preparo convencional perdem 5 a 10 vezes mais solo que áreas sob SPD (PIMENTEL et al., 1995; BORRELLI et al., 2020). Contudo, há divergências: em solos mal drenados ou nos primeiros anos de adoção, o SPD pode apresentar infiltração reduzida e perdas de solo comparáveis ao convencional (VOLK et al., 2004; REICHERT et al., 2018).

3.2 Classificação da erosão hídrica do solo

A erosão hídrica classifica-se em laminar, em sulcos, em voçorocas e subsuperficial.

Erosão laminar: caracteriza-se pela remoção uniforme da camada superficial do solo pela ação das gotas de chuva e do escoamento superficial difuso, onde em áreas agrícolas sob manejo inadequado, esse processo pode representar a principal forma de perda de solo, embora sua magnitude varie conforme fatores como clima, declividade, tipo de solo, cobertura vegetal e sistema de manejo (LAL, 2020). A remoção contínua da camada superficial reduz os teores de matéria orgânica, os nutrientes e a capacidade de troca de cátions (CTC), comprometendo a retenção de água e, consequentemente, a produtividade das culturas ao longo do tempo (Figura 1) (PANAGOS et al., 2015; LAL, 2020).

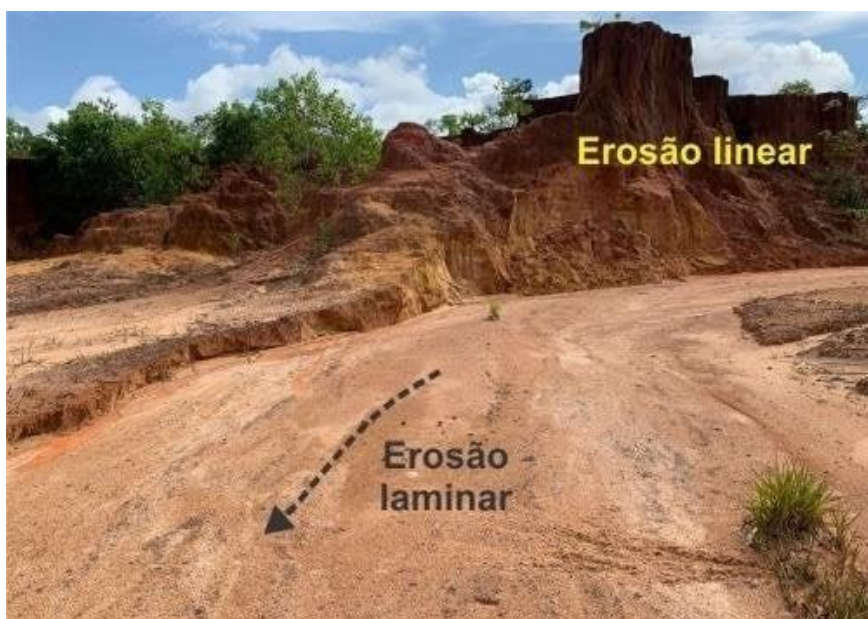


Figura 1 – Erosão Laminar.

Fonte: Fushimi, M. et al.

Erosão em sulcos: caracteriza-se pela concentração do escoamento superficial em pequenos canais, formados quando o volume e a velocidade da enxurrada excedem a capacidade de resistência do solo (CASSOL et al., 2021). Esse processo representa um estágio mais avançado da erosão hídrica em relação à erosão laminar e está diretamente associado à intensidade das chuvas, à declividade do terreno, às propriedades físicas do solo e ao sistema de manejo adotado (CASSOL et al., 2021).

Em áreas agrícolas sob preparo convencional, especialmente em terrenos declivosos e com baixa cobertura vegetal, a erosão em sulcos pode promover perdas de solo significativamente superiores às observadas em sistemas conservacionistas, que em contrapartida, o Sistema Plantio Direto reduz a formação de sulcos ao manter cobertura permanente do solo, aumentar a infiltração de água e diminuir a velocidade do escoamento superficial (Figura 2)

(PANACHUKI et al., 2011; CASSOL et al., 2021; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2020).



Figura 2 – Erosão em sulcos.

Fonte: <https://www.ocpbrasil.com.br/pt-br/erosao-do-solo-um-tema-mais-que-atual>

Voçorocas: constituem o estágio mais avançado da erosão hídrica, caracterizado pela formação de incisões profundas e permanentes no terreno, geralmente superiores a 0,5 m de profundidade, que inviabilizam o uso agrícola e promovem intensa degradação ambiental (BORRELLI et al., 2020).

Sua formação resulta da evolução da erosão em sulcos sob condições de elevada concentração do escoamento superficial, associada à ausência de cobertura vegetal, elevada declividade, solos suscetíveis à erosão e manejo inadequado. Além das perdas expressivas de solo, as voçorocas favorecem o assoreamento de cursos d'água e aumentam os custos de recuperação das áreas degradadas (Figura 3) (BORRELLI et al., 2020; PANAGOS et al., 2017).



Figura 3 – Voçoroca.

Fonte: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/vocoroca-mega-buraco-ameaca-engoliar-cidade-no-maranhao/>

Erosão subsuperficial: transporte de partículas finas e solutos ao longo do perfil, menos visível, mas relevante em solos porosos (Figura 4) (BORRELLI et al., 2017). A transição de laminar para sulcos ocorre quando o escoamento ultrapassa $2\text{--}3 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$.



Figura 4 – Erosão subsuperficial.

Fonte: <https://eos.com/pt/blog/erosao-hidrica/>

A cobertura vegetal eleva o limiar de formação de sulcos e reduz a velocidade do escoamento superficial, contribuindo para o controle da erosão laminar e em sulcos, contudo, o SPD, embora eficaz na prevenção dessas formas de erosão quando adotado com seus princípios integrais (rotação de culturas, cobertura permanente e mínimo revolvimento), não é capaz de reverter voçorocas já instaladas nem de evitar completamente o escoamento concentrado em áreas com declividade acentuada, compactação superficial ou terraceamento inadequado (REICHERT et al., 2018).

Portanto, a erosão hídrica é condicionada pela interação entre erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia e práticas de manejo, sendo o SPD uma ferramenta de mitigação, e não de eliminação total dos processos erosivos (PANAGOS et al., 2017; ALEWELL et al., 2019; REICHERT et al., 2018).

3.3 Fatores determinantes da erosão hídrica

A erosão hídrica é condicionada, fundamentalmente, pela interação entre a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo, fatores amplamente discutidos na literatura recente sobre conservação do solo (PANAGOS et al., 2017; ALEWELL et al., 2019).

A erosividade refere-se ao potencial da precipitação em promover o desprendimento e o transporte de partículas do solo, e esse potencial está diretamente associado à intensidade, à energia cinética, ao volume e à duração dos eventos pluviométricos. Chuvas intensas e concentradas tendem a gerar

maior escoamento superficial e, conseqüentemente, maior capacidade de transporte de sedimentos (PANAGOS et al., 2017; BORRELLI et al., 2017).

A erodibilidade do solo, por sua vez, diz respeito à suscetibilidade intrínseca do solo à erosão, sendo determinada por atributos físicos, químicos e biológicos, como textura, estrutura, estabilidade de agregados, permeabilidade e teor de matéria orgânica. Os solos que possuem maior predominância de silte e areia fina apresentam maior vulnerabilidade ao processo erosivo, enquanto aqueles com maior teor de argila e matéria orgânica tendem a apresentar maior resistência, devido à maior coesão e estabilidade estrutural (ALEWELL et al., 2019; PIMENTEL & BURGESS, 2013).

Além desses fatores, a literatura contemporânea destaca a influência integrada de variáveis ambientais e antrópicas na intensificação da erosão hídrica., que dentre os principais condicionantes estão o clima, o tipo de solo, a topografia e o uso e manejo da terra (BORRELLI et al., 2017; PANAGOS et al., 2016).

O clima, especialmente em regiões tropicais, exerce papel determinante em função da elevada intensidade das chuvas, que favorece o escoamento superficial., portanto, o tipo de solo influencia sua resposta à ação da água, sendo solos rasos, pouco estruturados ou com baixa infiltração mais suscetíveis à degradação ((BORRELLI et al., 2017).

A declividade do terreno é outro fator crucial, pois controla a velocidade do escoamento superficial: quanto maior a inclinação, maior a energia da água e, portanto, maior o potencial erosivo. Além disso, a forma como o relevo se apresenta interfere na dinâmica do fluxo hídrico: áreas côncavas favorecem a

concentração da água e intensificam os processos erosivos, enquanto áreas convexas tendem a dispersar o escoamento (ALEWELL et al., 2019; PIMENTEL & BURGESS, 2013).

Por fim, o manejo do solo e a cobertura vegetal desempenham papel essencial, podendo tanto mitigar quanto agravar a erosão, dependendo das práticas adotadas, como preparo do solo, rotação de culturas e manutenção de resíduos vegetais na superfície.

3.3.1 Influência do clima e das precipitações

O clima, especialmente em regiões tropicais, exerce papel determinante na erosão hídrica em função da elevada intensidade das chuvas, que favorece o escoamento superficial e o desprendimento de partículas do solo (BORRELLI et al., 2020).

Então, as maiores perdas de solo por erosão hídrica ocorrem em regiões com pluviosidade concentrada e de alta intensidade, onde no Brasil, o litoral nordestino e a região Sul apresentam os maiores valores do fator R (erosividade da chuva), indicando elevado potencial erosivo (ALEWELL et al., 2019).

Estudos baseados em modelagem climática projetam aumento da erosividade das chuvas em até 30% para as regiões Sul e Sudeste do Brasil até o ano 2070, como cenário associado às mudanças climáticas globais (BORRELLI et al., 2020). Esse cenário reforça a necessidade de adoção de práticas conservacionistas para aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas frente ao agravamento dos processos erosivos.

3.3.2 Características do solo

O solo é um recurso fundamental para a sustentação das plantas, armazenamento de nutrientes e biodiversidade edáfica, e observa-se no território nacional uma grande diversidade de classes de solos (Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Gleissolos), com variações de textura, estrutura e mineralogia. Quando manejados inadequadamente, tornam-se mais suscetíveis à desagregação (MATEUS et al., 2021; BORRELLI et al., 2017).

Os solos arenosos têm baixa coesão, facilitando a remoção; solos argilosos, quando bem estruturados, oferecem maior resistência. A matéria orgânica desempenha papel central na estabilidade de agregados, aumentando a infiltração e reduzindo a erodibilidade (ALEWELL et al., 2019).

3.3.3 Influência do relevo e da declividade

A topografia controla a velocidade, volume e energia do escoamento onde quanto maior a declividade, maior o potencial erosivo, as superfícies convexas dispersam o escoamento (erosão laminar), enquanto áreas côncavas concentram a água, intensificando sulcos e voçorocas (ALEWELL et al., 2019). Portanto, o comprimento da encosta também é relevante: fluxos mais longos acumulam água e sedimentos, aumentando a capacidade de transporte (BORRELLI et al., 2017).

3.3.4 Uso e práticas de manejo do solo

O preparo e o manejo influenciam diretamente a rugosidade, densidade, porosidade e estabilidade de agregados, condicionando infiltração e escoamento, e a retirada da vegetação natural aumenta a vulnerabilidade à erosão (LAL, 2020; BLANCO-CANQUI & RUIS, 2020).

A cobertura vegetal protege o solo, intercepta gotas de chuva e reduz a velocidade do escoamento, e as práticas inadequadas (preparo intensivo, desmatamento, cultivo contínuo sem rotação) comprometem a estrutura e aumentam a erosão. Portanto, a escolha de espécies com alta produção de biomassa e sistemas radiculares vigorosos favorece a proteção. Práticas conservacionistas como SPD, terraceamento e cultivo em nível são amplamente recomendadas (FAO & ITPS, 2017; LAL, 2020).

3.4 Impactos da erosão hídrica

A erosão hídrica exerce impactos significativos sobre a produtividade agrícola, promovendo a remoção contínua da camada superficial, rica em nutrientes e matéria orgânica, comprometendo a capacidade produtiva (BORRELLI et al., 2020; PANAGOS et al., 2018). Além disso, o transporte de sedimentos contribui para o assoreamento de rios e reservatórios, afetando a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos, especialmente por meio da eutrofização (WITHERS et al., 2014; DOETTERL et al., 2016).

Portanto, os impactos podem ser classificados em efeitos locais (*on-site*) e externos (*off-site*). Nos locais afetados, observam-se perdas de solo, água e insumos, além de danos físicos às culturas, e em longo prazo, ocorre degradação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, redução da profundidade efetiva e da fertilidade (LAL, 2020; DOETTERL et al., 2016).

Os impactos da erosão hídrica podem ser classificados em efeitos locais (*on-site*) e externos (*off-site*), onde nos locais afetados, observam-se perdas de solo, água e insumos, além de danos físicos às culturas. Em longo prazo, ocorre degradação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, redução da profundidade efetiva e da fertilidade (LAL, 2020; DOETTERL et al., 2016).

Os efeitos externos incluem o aumento do risco de enchentes, especialmente quando avaliados em escala de bacia hidrográfica, considerando fatores como impermeabilização do solo, deficiência de drenagem e conectividade hidrológica entre as áreas de produção e os corpos d'água (BORRELLI et al., 2020).

Além disso, o transporte de sedimentos contribui para o assoreamento de rios e reservatórios, afetando a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos, especialmente por meio da eutrofização. Outro aspecto relevante é o transporte de fertilizantes, pesticidas e resíduos orgânicos pela enxurrada, que reduz a eficiência dos insumos e contamina o ambiente (WITHERS et al., 2014).

Por fim, a adoção de práticas conservacionistas, como SPD, cultivo mínimo e rotação de culturas, é fundamental para mitigar esses impactos (LAL, 2020; PANAGOS et al., 2018).

3.5 Sistemas de preparo e manejo do solo

Os sistemas de preparo e manejo do solo constituem um dos principais fatores determinantes da dinâmica da erosão hídrica, influenciando atributos físicos, químicos e biológicos, além de condicionarem infiltração, escoamento e estabilidade estrutural (LAL, 2020; BLANCO-CANQUI & RUIS, 2020). Historicamente, o preparo convencional foi amplamente utilizado, mas práticas intensivas de revolvimento aumentam a suscetibilidade à erosão (PIMENTEL et al., 1995; LAL, 2015).

Os sistemas de preparo podem ser classificados, portanto, em três grandes grupos: preparo convencional, cultivo mínimo e sistema de plantio direto (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2018).

3.5.1 Sistema de preparo convencional

O preparo convencional caracteriza-se pelo intenso revolvimento da camada superficial por meio de aração e gradagem, promovendo inversão e desagregação dos horizontes e historicamente adotado por sua eficiência no controle de plantas daninhas e preparo do leito de semeadura (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2018).

No entanto, esse modelo apresenta limitações conservacionistas: rompe agregados e reduz a estabilidade estrutural, forma selamento superficial, diminui a infiltração e aumenta o escoamento (LAL, 2015; CASSOL et al., 2021), onde a

exposição direta do solo elimina a proteção contra o impacto das gotas de chuva, intensificando a erosão por salpicamento.

Além disso, forma camadas compactadas em subsuperfície ("pé-de-grade"), que reduzem a percolação, e quimicamente, acelera a mineralização da matéria orgânica, reduzindo os estoques de carbono (REICHERT et al., 2018). Biologicamente, afeta negativamente a biota edifica, onde estudos comparativos mostram que o preparo convencional apresenta perdas de solo e água muito superiores ao SPD (PANACHUKI et al., 2011; BERTOL et al., 2007).

Apesar disso, ainda é utilizado em regiões com limitações técnicas. Sua transição para sistemas conservacionistas é essencial (LAL, 2020).

3.5.2 Sistema de plantio direto

O SPD é amplamente reconhecido como uma das principais estratégias conservacionistas para o manejo sustentável do solo, especialmente em regiões tropicais e baseia-se em três princípios: (i) ausência de revolvimento (mobilização restrita à linha de semeadura); (ii) cobertura permanente do solo com resíduos vegetais ou plantas de cobertura; (iii) rotação e diversificação de culturas (DERPSCH et al., 2014; FEBRAPDP, 2020).

Esses princípios promovem melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, reduzindo a erosão e aumentando a eficiência do uso da água (FRANCHINI et al., 2012; REICHERT et al., 2018).

A ausência de revolvimento preserva a estrutura do solo e os agregados, enquanto a palhada atua como barreira física contra o impacto das gotas de chuva, reduzindo a desagregação e o selamento superficial (BERTOL et al., 2010; PANACHUKI et al., 2011).

Em experimento conduzido por Panachuki et al. (2011) em Latossolo Vermelho com declividade de 12%, sob cobertura de palhada de milho e com precipitação natural monitorada, o SPD promoveu a formação de canais biogênicos (por raízes e organismos do solo) que aumentaram a macroporosidade e a infiltração. Nesse estudo, o SPD reduziu as perdas de solo em mais de 90% e o escoamento superficial em até 78% em comparação ao preparo convencional (aração + gradagem). Esses resultados, embora expressivos, são específicos das condições edafoclimáticas e de manejo avaliadas, não devendo ser generalizados para todas as situações sem as devidas ressalvas.

Em Nitossolo Háplico no Sul do Brasil, as perdas de solo no SPD foram inferiores a $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto o preparo convencional ultrapassou $35 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (BERTOL et al., 2010). Quanto à infiltração, valores médios de 45 mm h^{-1} para o SPD e 15 mm h^{-1} para o preparo convencional são reportados em revisão internacional (BLANCO-CANQUI & RUIS, 2020), devendo-se ressaltar que esses números representam compilações de múltiplos estudos e podem variar significativamente conforme o tipo de solo, a cobertura vegetal e as condições climáticas locais.

A Tabela 2 sintetiza a comparação entre sistemas de preparo, especificando as fontes e as condições experimentais de cada dado apresentado.

Tabela 2 – Perdas de solo e infiltração de água em diferentes sistemas de preparo: síntese de estudos selecionados com especificação de fontes e condições experimentais

Sistema de preparo		Perda de solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Infiltração (mm h ⁻¹)	Fonte e condições experimentais / Ressalvas
Preparo convencional (aração + gradagem)	+	~ 35	—	Bertol et al. (2010) – experimento em Nitossolo Háplico, declividade de 10%, precipitação média anual de 1.400 mm, Sul do Brasil, cultivo soja-trigo. Perda de solo específica para essa condição.
Preparo convencional (faixa geral compilada)		20 – 40	—	Panachuki et al. (2011) – compilação de experimentos em Latossolos e Nitossolos brasileiros, com variação conforme textura, declividade (5–15%) e intensidade de chuva.

Sistema de preparo	Perda de solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Infiltração (mm h ⁻¹)	Fonte e condições experimentais / Ressalvas
Cultivo mínimo (escarificação ou subsolagem localizada)	5 – 15	—	Reichert et al. (2018) – estimativa baseada em estudos de manejo reduzido no Sul do Brasil, com cobertura parcial de resíduos e declividade variável de 5 a 12%.
SPD consolidado (palhada + rotação de culturas)	< 2	—	Bertol et al. (2010) – mesma condição experimental do preparo convencional (Nitossolo, 10% de declive, 1.400 mm ano ⁻¹), com cobertura permanente de palhada (soja-trigo) e ausência de revolvimento.
SPD (compilação para condições brasileiras)	< 5	—	Panachuki et al. (2011) – revisão de experimentos em Latossolo Vermelho sob SPD, com diferentes culturas de cobertura (milho, braquiária, crotalaria) e períodos de adoção (> 5 anos).
SPD (infiltração potencial)	—	~ 45	Blanco-Canqui & Ruis (2020) – dado oriundo de revisão internacional (não específico do Brasil). Compilação de múltiplos estudos em condições temperadas e tropicais. Ressalva: em solos compactados, com baixa cobertura (< 30% de palhada) ou tráfego intenso de

Sistema de preparo	Perda de solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Infiltração (mm h ⁻¹)	Fonte e condições experimentais / Ressalvas
Preparo convencional (infiltração)	—	~ 15	máquinas, a infiltração no SPD pode ser inferior (ex.: < 20 mm h ⁻¹). Blanco-Canqui & Ruis (2020) – dado oriundo de revisão internacional. Valor médio reportado para áreas sob aração e gradagem, podendo variar com o tipo de solo e a intensidade de preparo.

Nota da Tabela 2: Os valores de perda de solo referem-se a experimentos conduzidos no Brasil (Bertol et al., 2010; Panachuki et al., 2011; Reichert et al., 2018), com as condições experimentais especificadas na coluna "Fonte e condições". Os valores de infiltração (~ 45 mm h⁻¹ para SPD e ~ 15 mm h⁻¹ para preparo convencional) são provenientes de revisão internacional (Blanco-Canqui & Ruis, 2020) e não devem ser generalizados para todas as regiões brasileiras sem ressalvas, pois dependem de fatores como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, cobertura vegetal e manejo da palhada. As faixas de perda de solo são médias ou intervalos extraídos das referências indicadas, podendo variar conforme as condições edafoclimáticas locais.

Sob o aspecto químico, o SPD promove acúmulo gradual de matéria orgânica na camada superficial, aumentando a CTC, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes (LAL, 2015). E biologicamente, favorece a biota edáfica, incluindo minhocas e microrganismos, que atuam na ciclagem de nutrientes e formação de agregados (BÜNEMANN et al., 2018).

3.5.2.1 Desafios e limitações do SPD no Brasil

Apesar dos benefícios, o SPD enfrenta limitações importantes, pois a compactação superficial é recorrente em áreas com tráfego intenso de máquinas e ausência de rotação de culturas. Evidencia-se que aumento da resistência à

penetração (>2,5 MPa) na camada de 0–0,10 m após anos de SPD sem plantas de cobertura com sistema radicular vigoroso (REICHERT et al., 2018), portanto, essa compactação reduz a infiltração e pode exigir escarificação localizada.

Outro desafio é a dependência química, onde o controle de plantas daninhas no SPD baseia-se fortemente em herbicidas, especialmente glifosato. O uso repetido tem selecionado biótipos resistentes de espécies como *Conyza* spp. e *Digitaria insularis* (ARAÚJO et al., 2021), e, além disso, como a correção da acidez ocorre predominantemente na superfície sem incorporação, fica limitado o desenvolvimento radicular em profundidade.

O "SPD simplificado" (monocultura soja-milho, baixa produção de palhada) é praticado em grande parte da área brasileira, onde nessas condições, a cobertura do solo fica abaixo de 30% entre safras, situação que reduz a proteção contra erosão e o aporte de carbono (DERPSCH et al., 2014), então a falta de rotação também favorece pragas e doenças, como a ferrugem asiática da soja.

Portanto, a escolha de plantas de cobertura é determinante para o sucesso do SPD, onde as espécies como braquiária (*Urochloa ruziziensis*) produzem até 8 t ha⁻¹ de biomassa seca e promovem ciclagem de nutrientes; a Crotalária (*Crotalaria juncea*) fixa nitrogênio e reduz nematoides; o Milheto (*Pennisetum glaucum*) é tolerante à seca e produz palhada persistente.

Por fim, o consórcio de gramíneas com leguminosas aumenta a diversidade funcional e melhora a estabilidade de agregados (FRANCHINI et al., 2012; ARAÚJO et al., 2021).

3.5.2.2 Contribuições do SPD para a conservação da água

O SPD melhora a infiltração e o armazenamento de água no solo. A presença da palhada reduz a evaporação direta da água do solo e aumenta a recarga hídrica. No Cerrado, estudos conduzidos por Franchini et al. (2012) demonstraram que o SPD elevou a umidade do solo em 15–20% durante a estação seca, em comparação ao preparo convencional, favorecendo o desenvolvimento das culturas em períodos de déficit hídrico.

Em relação à produtividade em anos de veranico, Franchini et al. (2012) observaram que áreas cultivadas com soja sob SPD, no Cerrado, mantiveram produtividade até 30% superior em comparação ao preparo convencional durante a safra 2010/2011, que foi caracterizada por estiagem prolongada, e esse resultado, porém, está condicionado a fatores como cultivar utilizada, fertilidade do solo, profundidade radicular e manejo da palhada, não devendo ser generalizado para todas as condições sem as devidas ressalvas.

Além disso, a maior infiltração de água promovida pelo SPD reduz o escoamento superficial, o que pode contribuir para a mitigação de enchentes, especialmente quando avaliado em escala de bacia hidrográfica, considerando a conectividade hidrológica entre as áreas agrícolas e os corpos d'água (LAL, 2020). A redução do escoamento também aumenta a vazão de base dos rios,

favorecendo a recarga de aquíferos e a manutenção dos recursos hídricos em períodos de estiagem (LAL, 2020).

Diante das mudanças climáticas, a erosividade das chuvas tende a aumentar no Brasil, especialmente nas regiões Sul e Sudeste, conforme projeções baseadas em modelagem climática (BORRELLI et al., 2020). Portanto, o SPD confere maior resiliência aos sistemas agrícolas, pois a cobertura permanente do solo reduz o impacto de chuvas extremas, diminui a desagregação das partículas e mantém a capacidade de infiltração.

Além disso, o sequestro de carbono no SPD contribui para a mitigação das mudanças climáticas, estando alinhado às diretrizes do Plano ABC+ (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) (BRASIL, 2021; LAL, 2020).

3.5.3 Sistema de cultivo mínimo

O cultivo mínimo configura-se como alternativa intermediária entre o preparo convencional e o SPD, caracterizado pela redução da intensidade de mobilização e manutenção parcial da cobertura vegetal (HAQUE et al., 2016). Esse sistema restringe o uso de implementos agressivos, adotando escarificação ou subsolagem localizada.

Então, sua cobertura parcial reduz o selamento superficial e aumenta a infiltração, mas sua eficiência no controle da erosão é inferior à do SPD

(PANACHUKI et al., 2011), apresentando um comportamento intermediário também nos atributos químicos e biológicos (LAL, 2015; BÜNEMANN et al., 2018).

Pode ser então vantajoso em áreas com compactação subsuperficial, servindo como estratégia de transição para o SPD (LAL, 2020).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A erosão hídrica representa um grave desafio à sustentabilidade agrícola brasileira, diante disso, este trabalho buscou responder: quais são os avanços quantitativos e as limitações práticas do Sistema de Plantio Direto (SPD) na conservação do solo e da água no Brasil?

Os avanços quantitativos são expressivos., pois o SPD reduz as perdas de solo em mais de 80–90% em relação ao preparo convencional, com valores inferiores a $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, contra perdas superiores a 35 t ha^{-1} no sistema tradicional. Além disso, aumenta a infiltração de água (cerca de 45 mm h^{-1} , ante 15 mm h^{-1}) e eleva a umidade do solo em 15–20% no Cerrado, garantindo maior resiliência em anos de estiagem.

No entanto, o chamado "SPD simplificado", marcado pela monocultura soja-milho, baixa produção de palhada e ausência de rotação de culturas, limita esses benefícios. Essa prática reduz a cobertura do solo (muitas vezes abaixo de 30%), favorece a compactação superficial e aumenta a dependência química, especialmente de herbicidas como o glifosato, além de dificultar a correção da acidez em profundidade.

Conclui-se, portanto, que o SPD é uma ferramenta fundamental para a conservação do solo e da água, mas sua eficácia plena depende da adoção integral de seus três princípios (revolvimento mínimo, cobertura permanente e rotação de culturas). Superar os limites do sistema simplificado e adaptar o manejo às diferentes realidades regionais é essencial para garantir a sustentabilidade e a produtividade da agricultura brasileira frente às mudanças climáticas.

5. REFERÊNCIAS

ALEWELL, C.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; PANAGOS, P. Using the USLE: chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 7, n. 3, p. 203–225, 2019. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004.

ARAÚJO, F. C. et al. Cover crops in the off-season in the weed management at no-tillage area. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 34, n. 1, p. 50–57, 2021. DOI: 10.1590/1983-21252021v34n106rc.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J.; AMARAL, A. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 1, p. 133–142, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000100014.

BERTOL, I.; ENGEL, F.; MAFRA, A.; BERTOL, O.; RITTER, S. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments

under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil and Tillage Research*, v. 94, n. 1, p. 142–150, 2007b. DOI: 10.1016/j.still.2006.07.009.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D. Perdas de solo e água em diferentes sistemas de manejo em Nitossolo Háplico no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 5, p. 1697–1706, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000500025.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2018.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, v. 368, 114259, 2020. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114259.

BORRELLI, P.; PANAGOS, P.; BALLABIO, C.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; ALEWELL, C. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, v. 8, p. 2013, 2017. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; YANG, J. E.; ALEWELL, C. et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, n. 36, p. 21994–22001, 2020. DOI: 10.1073/pnas.2001403117.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano ABC+: Agricultura de Baixa Emissão de Carbono 2020–2030*. Brasília, DF: MAPA, 2021.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 120, p. 105–125, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

CASSOL, E. A. et al. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 56, e02215, 2021. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02215.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. PIB do agronegócio brasileiro. Piracicaba: CEPEA/ESALQ/USP, 2024.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2024/2025. Brasília, DF: CONAB, 2025.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; LI, H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 7, n. 5, p. 1–25, 2014.

DOETTERL, S. et al. Links among warming, carbon and microbial dynamics mediated by soil mineral weathering. *Nature Geoscience*, v. 9, p. 959–964, 2016. DOI: 10.1038/ngeo2851.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas institucionais. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FAO – Food and Agriculture Organization. Status of the World's Soil Resources (SWSR). Rome: FAO, 2015.

FAO & ITPS – Intergovernmental Technical Panel on Soils. Status of the World's Soil Resources. Rome: FAO, 2017.

FEBRAPDP – Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Sistema plantio direto no Brasil: histórico, expansão e desafios. Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2020.

FUSHIMI, M.; OLIVEIRA, R. C. de; LISBOA, G. S.; FERREIRA, B. S.; SILVA, P. Z. F. da; NUNES, J. O. R. Caracterização físico-química de solo raso a desenvolvido (associação Neossolo Quartzarênico) e solo hidromórfico (associação Gleissolo Háptico): o contexto ambiental da bacia hidrográfica do rio dos Cachorros, São Luís-MA. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, Ituiutaba, v. 11, n. 1, p. 4-18, jan./jul. 2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 6 abr. 2026.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca. Londrina: Embrapa Soja, 2012.

HAQUE, M. E.; BELL, R. W.; ISLAM, M. A.; RAHMAN, M. A. Minimum tillage unpuddled transplanting: an alternative crop establishment strategy for rice in conservation agriculture cropping systems. *Field Crops Research*, v. 185, p. 31–39, 2016. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contas nacionais trimestrais: indicadores de volume e valores correntes. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

LAL, R. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research*, v. 126, p. 1–9, 2015. DOI: 10.1016/j.still.2012.07.009.

LAL, R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. *Soil & Tillage Research*, v. 230, 105677, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2020.105677.

MATEUS, G. P.; ARAÚJO, H. S.; MÜLLER, R. do V.; CRUSCIOL, C. A. C.; BORGES, W. L. B. Erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do

solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0200123, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcS20200123.

MONTANARELLA, L. et al. World's soils are under threat. *SOIL*, v. 2, p. 79–82, 2016. DOI: 10.5194/soil-2-79-2016.

NEARING, M. A.; XIE, Y.; LIU, B.; YE, Y. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 5, n. 2, p. 77–84, 2017. DOI: 10.1016/j.iswcr.2017.04.001.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; PANACHUKI, E.; WENDLAND, E.; NEARING, M. Rainfall erosivity in Brazil: A review. *Catena*, v. 100, p. 139–147, 2013. DOI: 10.1016/j.catena.2012.08.006.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1777–1785, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000500031.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; POESEN, J.; BALLABIO, C.; MEUSBURGER, K.; ALEWELL, C. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, v. 54, p. 438–447, 2015. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; VAN DER ZAAG, P.; POESEN, J.; ALEWELL, C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, v. 7, p. 4175, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-04282-8.

PANAGOS, P.; STANDARDI, G.; BORRELLI, P.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; BALLABIO, C. et al. Global soil erosion by water: a

review. *Earth-Science Reviews*, v. 177, p. 348–362, 2018. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.12.007.

PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, v. 3, n. 3, p. 443–463, 2013. DOI: 10.3390/agriculture3030443.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P. et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, v. 267, n. 5201, p. 1117–1123, 1995. DOI: 10.1126/science.267.5201.1117.

REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; RODRIGUES, M. F.; CAVALLI, J. P.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry, organic matter, bulk density and moisture. *Catena*, v. 165, p. 345–357, 2018. DOI: 10.1016/j.catena.2018.02.005.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning. Washington: USDA, 1997. (Agriculture Handbook, 703).

SILVA, M. A. et al. Erosividade da chuva no Brasil: atualização e regionalização. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 8, p. 543–551, 2020. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p543-551.

VOLK, L. B. S.; CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L. F.; COSTA, G. C. Erosão hídrica em plantio direto com diferentes coberturas. *Soil & Tillage Research*, v. 205, 104785, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104785.

VOLK, L. B. S.; CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L. F. Perdas de solo e água por erosão hídrica em plantio direto com diferentes coberturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 5, p. 903–912, 2004.

WITHERS, P. J. A.; JARVIE, H. P.; STOATE, C. Quantifying the impact of agricultural diffuse pollution on water quality. *Journal of Environmental Quality*, v. 43, n. 1, p. 3–17, 2014. DOI: 10.2134/jeq2013.07.0262.