

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

EXPECTATIVAS DE EROSÃO DO SOLO EM ÁREA
CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR EM GUARIBA - SP

Priscila de Miranda Barbosa

Agrônoma e Tecnóloga em Biocombustíveis

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EXPECTATIVAS DE EROSÃO DO SOLO EM ÁREA
CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR EM GUARIBA - SP**

Discente: Priscila de Miranda Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Marcilio Vieira Martins Filho

Coorientadora: Dra. Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia

Coorientador: Dr. Daniel de Bortoli Teixeira

Tese de doutorado, apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo).

B238e Barbosa, Priscila de Miranda
Expectativas de erosão do solo em área cultivada com
cana-de-açúcar em Guariba - SP / Priscila de Miranda Barbosa.
– Jaboticabal, 2024
78 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Centro de Aquicultura da Unesp, Jaboticabal
Orientador: Prof. Dr. Marcilio Vieira Martins Filho
Coorientadora: Dra. Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia

1. Erosão do solo. 2. Valoração do solo. 3. Inteligencia
artificial Processamento de dados. 4. Base de dados. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Centro de Aquicultura da Unesp, Jaboticabal.
Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

REGISTRO DE IMPACTO

A presente tese destaca a importância de conhecer e prever fatores causadores da erosão do solo, tal como a sua erodibilidade. A abordagem integrada de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) nesta pesquisa destaca a relevância da ação climática (Objetivo de desenvolvimento sustentável - ODS 13) ao fornecer visões cruciais para a gestão sustentável do solo, mitigando os impactos da erosão e promovendo práticas agrícolas mais resilientes. Ao valorar a perda de nutrientes e corretivos do solo, esta tese alinha-se visando o desenvolvimento sustentável - ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) ao enfatizar a importância da conservação do solo para garantir a segurança alimentar e promover práticas agrícolas que sejam ecologicamente equilibradas. A visualização espacial da erosão do solo, realizada por meio da associação com um SIG, contribui significativamente para o objetivo de desenvolvimento sustentável - ODS 15 (Vida Terrestre), fornecendo uma base sólida para a conservação da biodiversidade e a promoção de estratégias sustentáveis na gestão dos solos brasileiros.

IMPACT RECORD

This thesis highlights the importance of knowing and predicting factors that cause soil erosion, such as soil erodibility. The integrated Geographic Information Systems (GIS) approach in this research highlights the relevance of climate action (Sustainable Development Goal - SDG 13) by providing crucial insights for sustainable soil management, mitigating the impacts of erosion and promoting more resilient agricultural practices. By valuing the loss of nutrients and soil improvers, this thesis aligns with SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture) by emphasizing the importance of soil conservation to ensure food security and promote agricultural practices that are ecologically balanced. The spatial visualization of soil erosion, carried out through association with a GIS, contributes significantly to Sustainable Development Goal - SDG 15 (Terrestrial Life), providing a solid basis for the conservation of biodiversity and the promotion of sustainable strategies in the management of Brazilian soils.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EXPECTATIVAS DE EROÇÃO DO SOLO EM ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR EM GUARIBA - SP

AUTORA: PRISCILA DE MIRANDA BARBOSA

ORIENTADOR: MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

COORIENTADORA: ANGÉLICA SANTOS RABELO DE SOUZA BAHIA

COORIENTADOR: DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Data: 26/03/2024 18:22:38-0500
Verifique em: <https://validar.br.gov.br/>

Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
JOSÉ MARQUES JUNIOR
Data: 26/03/2024 15:41:34-0500
Verifique em: <https://validar.br.gov.br/>

Prof. Dr. DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA
Data: 26/03/2024 17:03:11-0500
Verifique em: <https://validar.br.gov.br/>

Dr. BRUNO HENRIQUE SILVEIRA MAZARON (Participação Virtual)
Grupo São Martinho S.A. / Araraquara/SP

Documento assinado digitalmente
BRUNO HENRIQUE SILVEIRA MAZARON
Data: 27/03/2024 10:03:14-0500
Verifique em: <https://validar.br.gov.br/>

Prof. Dr. JOSÉ RICARDO MANTOVANI (Participação Virtual)
Fundação de Ensino e Tecnologia de Aflenas / Universidade José do Rosário

Documento assinado digitalmente
JOSÉ RICARDO MANTOVANI
Data: 27/03/2024 09:48:09-0500
Verifique em: <https://validar.br.gov.br/>

Jaboticabal, 23 de fevereiro de 2024

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

PRISCILA DE MIRANDA BARBOSA – nascida em 28 de março de 1988 em Diadema – SP. Filha de Solange Maria Silva de Miranda, Aluizio Vieira Barbosa e Antônio Alves de Lima Filho. Tecnóloga em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal (FATEC), na cidade de Jaboticabal -SP, concluída em 2012. Agrônoma pelo Instituto Taquaritinguense de Ensino Superior (ITES), na cidade de Taquaritinga – SP, concluída em 2017. Em 2018, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia pelo programa Ciência do Solo. No ano de 2020 deu início ao curso de Doutorado em Ciência do Solo na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP.

EPÍGRAFE

“Lembre-se, você aprendeu, só precisa acreditar mais em você.”

Mara Cristina Pessoa da Cruz

DEDICO

Aos meus Pais, Solange Maria e Antônio Alves e meus irmãos Adriano e Jeferson Lima, a minha cunhada Laís Cristina Lima e minha sobrinha Ana Beatriz Lima pela força e compreensão com todo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por amparar-me até aqui e por presentear-me todos os dias.

Ao Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, pela orientação, dedicação e ensinamentos.

Aos amigos do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para Fins de Manejo Específico (CSME), pelo acolhimento, companheirismo e realização deste trabalho.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), pela realização de um sonho em estudar aqui.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar	5
2.2 Perda de nutrientes do solo por erosão	7
2.3 Matéria orgânica e erosão do solo	11
2.4 Desafios da agricultura sustentável: erosão do solo, perdas nutricionais e a necessidade de práticas integradas	13
2.5 Influência da permanência dos resíduos vegetais sobre o solo	15
2.6 Dados legados e inteligência artificial na avaliação da erosão do solo com o modelo RUSLE	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Localização da área de estudos	20
3.2 Análises e softwares	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Fator erosividade (R)	29
4.2 Fator erodibilidade (K)	30
4.3 Fator topográfico (LS)	31
4.4 Potencial natural de erosão (PNE)	33
4.5 Fator cobertura vegetal e manejo do solo (C)	34
4.6 Fator práticas conservacionistas (P)	35
4.7 Expectativa de perdas de solo por erosão hídrica	36
4.8 Perdas de matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica	40
4.9 Taxa de enriquecimento do sedimento erodido	42
4.10 Efeitos de fertilizantes e corretivos no sedimento erodido	45
4.11 Implicações da perda de fertilizantes e corretivos	47
5 CONCLUSÕES	51
6 REFERÊNCIAS	52

EXPECTATIVAS DE EROÇÃO DO SOLO EM ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR EM GUARIBA - SP

RESUMO – Modelos de previsão de erosão como a RUSLE, quando associados a um SIG, constituem uma poderosa ferramenta capaz de auxiliar planos de uso e manejo do solo. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a expectativa de erosão em uma área cultivada com cana-de-açúcar sob três cenários de uso e manejo do solo: OAC, operações agrícolas de contorno; OAC + MRSPC, manejo mecanizado de resíduos superficiais pós-colheita; OAC + MRSPC + CT, controle de tráfego. A pesquisa foi conduzida na região Nordeste do estado de São Paulo, em uma área de aproximadamente 40 hectares na Fazenda São Bento. O solo local foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), de textura muito argilosa, o qual apresenta na camada de 0,00 a 0,20m, teores médios de 653 g kg⁻¹ de argila, 169 g kg⁻¹ de silte e 178 g kg⁻¹ de areia. Os fatores do modelo RUSLE foram estabelecidos, trabalhados com *softwares* (GS+, Surfer11, LS_TOOL, Alos Palsar), e por meio de álgebra cartográfica, foram determinadas as expectativas de erosão. Dados legados de experimentos realizados na área foram utilizados para correlacionar as perdas de solo por erosão com as de matéria orgânica e nutrientes nos sedimentos erodidos. Com o manejo OAC, em 38,6% da Fazenda São Bento, a expectativa de erosão foi superior ao valor tolerável de perdas de solo por erosão (T), igual a 10 t ha⁻¹ ano⁻¹, com o cultivo de cana-de-açúcar na área. Já com o manejo OAC + MRSPC + CT, há em 100% da Fazenda São Bento uma expectativa de erosão abaixo do tolerável de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹. Nos 40 ha da Fazenda São Bento, os resultados indicaram que o custo total foi de U\$ 259,970.80 em insumos perdidos por erosão (N, P, K, Ca e Mg) com o manejo OAC, o que representou 14,63% do custo de implantação da cultura de cana-de-açúcar na Fazenda São Bento (U\$ 1,777,523.60). Para o manejo OAC + MRSPC, o custo com os insumos foi avaliado em U\$ 198,578.80 correspondendo a 11,17% do custo de implantação, enquanto o manejo OAC + MRSPC + CT teve um custo de US\$ 113,451.20, representando 6,38%. A prática da valoração das perdas de solo e nutrientes identifica as áreas mais vulneráveis à erosão, o que permite estimativas em dólar (US\$) relativas ao uso de fertilizantes e corretivos, possibilitando adoção de práticas conservacionistas para diminuição da erosão e custos associados. O estudo reforça a importância das práticas conservacionistas na preservação do solo e destaca a relevância de integrar considerações econômicas na gestão sustentável da agricultura.

Palavras-chave: erosão do solo, valoração do solo, inteligência artificial processamento de dados, base de dados

SOIL EROSION EXPECTATIONS IN AN AREA CULTIVATED WITH SUGAR CANE IN GUARIBA – SP

ABSTRACT – Erosion prediction models such as RUSLE, when associated with a GIS, are a powerful tool capable of assisting land use and management plans. Therefore, the aim of this study was to evaluate the expectation of erosion in an area cultivated with sugarcane under three scenarios of land use and management: OAC, contour agricultural operations; OAC + MRSPC, mechanized management of post-harvest surface residues; OAC + MRSPC + CT, traffic control. The research was conducted in the northeast of the state of São Paulo, on an area of approximately 40 hectares at São Bento farm. The soil was eutrudox Red Latosol with a very clayey texture, which in the 0.00 to 0.20m layer has average contents of 653 g kg⁻¹ of clay, 169 g kg⁻¹ of silt and 178 g kg⁻¹ of sand. The factors of the RUSLE model were established, worked with software (GS+, Surfer11, LS_TOOL, Alos Palsar), and the erosion expectations were determined using cartographic algebra. Legacy data from experiments carried out in the area was used to correlate soil loss through erosion with organic matter and nutrients in the eroded sediments. With OAC management, in 38.6% of São Bento farm, the erosion expectation was higher than the tolerable value of soil loss by erosion (T), equal to 10 t ha⁻¹ year⁻¹, with sugarcane cultivation in the area. With OAC + MRSPC + CT management, 100% of São Bento farm is expected to suffer erosion below the tolerable value (T). On the 40 ha of São Bento farm, the results indicated that the total cost was US\$ 259,970.80 in inputs lost to erosion (N, P, K, Ca and Mg) with OAC management, which represented 14.63% of the cost of establishing the sugarcane crop on São Bento farm (US\$ 1,777,523.60). For OAC + MRSPC management, the cost of inputs was valued at US\$ 198,578.80, corresponding to 11.17% of the implementation cost, while OAC + MRSPC + CT management had a cost of US\$ 113,451.20, representing 6.38%. The practice of valuing soil and nutrient losses identifies the areas most vulnerable to erosion, which allows estimates to be made in dollars (US\$) regarding the use of fertilizers and correctives, making it possible to adopt conservation practices to reduce erosion and the associated costs. The study reinforces the importance of conservation practices in soil preservation and highlights the importance of integrating economic considerations into sustainable agricultural management.

Keywords: soil erosion, soil valuation, artificial intelligence data processing, database

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de atender à demanda crescente de alimentos e de produzir culturas industriais nas melhores terras agrícolas está levando a agricultura a se expandir em solos propensos à erosão e com baixa aptidão agrícola.

A produtividade da terra agrícola dobrou nos últimos anos (Embrapa, 2018). No entanto, o aumento da produção agrícola muitas vezes leva ao esgotamento dos recursos do solo e à degradação do ecossistema.

Avançar para uma abordagem integrada com vários cenários visando aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas é explanar os riscos para as práticas agrícolas, por meio de altos níveis de abordagens de adaptação e mitigação às práticas conservacionistas. Essas práticas devem aumentar a saúde do solo, melhorando e controlando a erosão do solo, gerenciando a matéria orgânica do solo e impulsionando o manejo de nutrientes (Embrapa, 2018).

A erosão do solo é particularmente relevante em culturas como a cana-de-açúcar, onde práticas agrícolas intensivas podem aumentar o risco de perdas de solo. Além dos impactos ambientais, a erosão do solo na produção de cana-de-açúcar pode ter consequências significativas na esfera econômica.

A remoção do solo superficial compromete não apenas a estabilidade estrutural do solo, mas também a produtividade das plantações, influenciando diretamente os custos de produção.

Em regiões áridas, semiáridas e em campos desprotegidos, a mobilização do solo e a realocação de terras agrícolas devido à erosão podem aumentar os custos com a aplicação de fertilizantes e outros insumos agrícolas, impactando negativamente a rentabilidade. De acordo com Scherr (1999), a erosão do solo pode reduzir a produção global em uma faixa significativa, entre 15-30%.

Os impactos da erosão do solo na produção agrícola variam entre os solos e as regiões, dependendo do manejo do solo, sistemas de cultivo, medidas de conservação do solo e insumos tecnológicos. A resistência dos solos à degradação e o grau de degradação dos solos (erodibilidade do solo) também diferem conforme o tipo de solo (Scherr, 1999). De acordo com Wocat (2007), a adoção de um manejo sustentável da terra é fundamental para preservar a saúde do solo.

A erosão do solo é uma preocupação significativa no manejo da cultura da cana-de-açúcar, especialmente numa topografia em declive comumente associada às áreas de plantio (Scarpinella et al., 2019). O cultivo extensivo da cana-de-açúcar, muitas vezes em largas áreas, expõe o solo a condições propícias para a erosão hídrica, onde as chuvas intensas podem resultar em escoamento superficial excessivo (Bernardi, 2022). As práticas de manejo inadequadas, como a remoção da palha após a colheita da cana-de-açúcar, reduzem a proteção natural do solo, aumentando a vulnerabilidade à erosão, comprometem a qualidade do solo, afetam negativamente a produtividade da cultura.

A erosão do solo, a gestão e a posse da terra afetam toda a governança do solo, a disponibilidade, o acesso, a segurança e a estabilidade. A tecnologia pode fornecer iniciativas para reduzir a erosão do solo e atender à crescente demanda do uso do solo, ela representa melhorias na qualidade do solo, especialmente em terras aráveis com baixa aptidão agrícola (Scherr, 1999; Telles, 2015; Bernardi, 2022).

Os desafios econômicos e ambientais associados à erosão do solo enfatizam a necessidade de uma abordagem integrada. Neste contexto, é crucial considerar dados legados de pesquisas anteriores, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, como os estudos de Souza et al. (2004) e Izidorio et al. (2005). Esses trabalhos forneceram perspectivas valiosas sobre os padrões de erosão, impactos econômicos e práticas de manejo em contextos específicos. Souza et al. (2004), por exemplo, abordaram aspectos específicos relacionados à erosão em culturas tropicais, enquanto Izidorio et al. (2005) contribuíram com análises sobre formas de erosão e as perdas de matéria orgânica e nutrientes por processos erosivos do solo.

Portanto, integrar esses dados à pesquisa atual oferece uma base sólida para avaliar o impacto das práticas de manejo propostas na preservação do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Esse enfoque holístico, considerando tanto a perspectiva econômica quanto a ambiental, é essencial para desenvolver estratégias sustentáveis de manejo do solo e promover a resiliência dos sistemas agrícolas.

Avaliar o solo é um grande desafio, pois varia espacial e temporalmente, sendo afetado pelas práticas de manejo do uso da terra. Além disso, o solo deve ser expresso por indicadores quantificáveis e mapeáveis.

Todavia, informações sobre os solos mais precisas e atualizadas são necessárias para informar com precisão as decisões críticas relativas a eles ao nível global e regional. A utilização de modelos para estimar as perdas de solo por erosão desempenha um papel crucial na gestão sustentável dos recursos naturais, especialmente em contextos agrícolas como plantações de cana-de-açúcar (Izidorio et al., 2005).

Os modelos são ferramentas valiosas para prever e quantificar os impactos da erosão do solo, permitindo aos agricultores e pesquisadores adotarem estratégias preventivas e de manejo adequadas.

A importância das estimativas geradas por modelos de previsão da erosão reside na capacidade de avaliar o risco de erosão em diferentes condições climáticas e práticas agrícolas, facilitando a implementação de medidas preventivas específicas. A avaliação do estado, propriedades e funções dos recursos globais do solo é um primeiro passo importante na avaliação de decisões relativas à gestão sustentável da terra.

Além das práticas de conservação tradicionais, a integração de tecnologias emergentes, como a inteligência artificial (IA), tem se mostrado uma abordagem promissora na gestão sustentável do solo em culturas como a cana-de-açúcar. A utilização de algoritmos avançados e sistemas de aprendizado de máquina podem contribuir significativamente para a previsão e monitoramento da erosão do solo, permitindo uma resposta proativa às condições ambientais variáveis.

Sistemas de sensores equipados com IA podem analisar dados em tempo real, identificar padrões de erosão e permitir otimizar estratégias de manejo do solo. Além disso, a modelagem preditiva impulsionada por IA pode oferecer introspecções valiosas sobre os impactos econômicos potenciais da erosão do solo em plantações de cana-de-açúcar, permitindo uma tomada de decisão mais robusta (De Barros e Freitas, 2023).

Estudos como os de Xue et al. (2018) e Zhang et al. (2020) destacam o papel crucial da inteligência artificial na transformação da agricultura, proporcionando eficiência no manejo do solo e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. Incorporar essa abordagem inovadora em pesquisas sobre conservação do solo é essencial para avançar em direção a uma agricultura mais resiliente e eficaz.

A presente pesquisa busca confirmar a viabilidade da preservação do solo por meio da implementação de diferentes práticas de manejo. A hipótese central é que a combinação específica dessas abordagens de manejo pode permitir o cultivo integral da área, ao mesmo tempo, em que mantém a saúde do solo por meio de práticas conservacionistas.

Neste sentido, o objetivo do presente estudo foi avaliar a expectativa de erosão, quantificar o efeito do manejo sobre as perdas de fertilizantes e corretivos por processos erosivos no solo em área cultivada com cana-de-açúcar em três cenários de uso e manejo do solo: 1) OAC, Operações agrícolas realizadas em contorno; 2) OAC + MRSPC, Operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada; 3) OAC + MRSPC + CT, Operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada + controle de tráfego.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande expressão para a agricultura brasileira, devido à utilização intensiva de seus produtos e subprodutos. Pesquisas nessa área, realizadas por instituições, empresas do setor e produtores, têm sido intensificadas visando o aumento da eficiência produtiva.

A produção de cana-de-açúcar na safra 2022/23 apresentou um crescimento de 5,4% em relação à temporada anterior, totalizando 610,1 milhões de toneladas (Conab, 2023). Esse aumento é atribuído à recuperação da produtividade nos principais estados produtores, impulsionada por condições climáticas mais favoráveis no ciclo atual (Conab, 2023). Apesar dos desafios como baixos índices pluviométricos e baixas temperaturas na Região Centro-Sul, a produtividade nacional estimada é 6,1% superior à safra anterior, atingindo 73.609 kg/ha (Conab, 2023).

O boletim técnico da safra da cana-de-açúcar fornecido pela Conab (2023), apresenta que no Brasil, a região Sudeste, líder na produção de cana, registrou um aumento de 5,8% no volume colhido durante a safra 2022/23, enquanto a região Centro-Oeste experimentou um crescimento de 5,7% na produtividade, devido à melhora nas condições climáticas, para a mesma safra. No Nordeste, além do desempenho aprimorado das lavouras, houve um aumento na área plantada, resultando em uma produção de aproximadamente 56 milhões de toneladas, um incremento de 12,5% em comparação à safra anterior (Conab, 2023). Já na região Sul, a área destinada à cultura teve uma redução, resultando na terceira menor colheita da série histórica da Conab, estimada em 30,95 milhões de toneladas (Conab, 2023).

O sucesso ou insucesso para a implantação de uma cultura se torna determinante na operação de plantio, uma vez que as demais atividades serão reflexos do plantio, tais como a produtividade, qualidade e custos envolvidos e, dessa maneira, garantindo ou não um bom desenvolvimento da cultura e lucratividade (Oliveira, 2012).

O objetivo do preparo de solo é proporcionar condições adequadas de plantio e desenvolvimento das plantas, facilitando a absorção de água e nutrientes pelo seu sistema radicular. Os diferentes equipamentos agrícolas que podem ser utilizados para o preparo do solo podem acarretar alterações nas suas propriedades químicas, físicas e biológicas, sendo que cada um deles trabalha o solo de maneira própria, modificando estas propriedades diretamente (Paye et al., 2012).

Independente do sistema de preparo do solo e da forma de plantio, estudos da viabilidade econômica das atividades envolvidas tornam-se importantes para o produtor verificar a rentabilidade do processo de produção e, conseqüentemente, obter lucro, em condições favoráveis do solo para o desenvolvimento da cultura (Amorim, 2019).

Com a diversidade de solos, clima, culturas e máquinas, vários tipos de preparo de solo podem ser utilizados, dificultando a escolha por um específico sistema de preparo do solo (Embrapa 2022). Compreender os diversos tipos de preparo de solo disponíveis é essencial para tomar decisões confiáveis e otimizar a produtividade agrícola. Entre os métodos comuns de preparo de solo, incluem-se:

- 1) Preparo Convencional, o qual envolve o uso de arados e grades para revolver e descompactar o solo. Sendo adequado para solos compactados, mas pode resultar em maior perda de estrutura do solo.
- 2) Plantio Direto, caracteriza-se por mínima perturbação do solo, onde as sementes são plantadas sem aração. Sua implantação conserva a estrutura do solo, reduzindo a erosão e a perda de umidade. Em verdade o produtor também deve adotar outras práticas conservacionistas, como a rotação de culturas, adubação verde, ausência ou mínimo revolvimento do solo e cobertura com palhada. Deste modo, os produtos constituem o que se denomina Sistema de Plantio Direto (SPD).
- 3) Preparo mínimo, caracterizado pelo uso de técnicas que reduzem a perturbação do solo. O processo pode ser feito com a passagem de grade leve ou arado escarificador. Visa combinar os benefícios do preparo convencional e do plantio direto.

A escolha do método de preparo de solo dependerá das características específicas da área, das condições climáticas, do tipo de cultura e dos objetivos de manejo sustentável. Cada método tem suas vantagens e desvantagens, e a seleção cuidadosa pode resultar em benefícios a longo prazo para a saúde do solo e a produtividade agrícola.

2.2 Perda de nutrientes do solo por erosão

Após uma chuva intensa, ou seja, com elevado potencial erosivo, pesquisadores e até mesmo os agricultores se perguntam o que aconteceu com os nutrientes nos solos devido à erosão hídrica (Meena et al., 2017). Esta é uma questão importante, mas não é fácil de ser respondida prontamente, quando se deseja quantificar as perdas de nutrientes com os processos erosivos, pois muitas são as variáveis envolvidas em tais processos como (Meena et al., 2017): a cultura, o estágio de desenvolvimento da cultura, o fertilizante e como foi aplicado, a textura e a capacidade de retenção de água do solo, a intensidade e a duração das chuvas.

A erosão hídrica causa o empobrecimento dos solos, devido ao transporte de nutrientes, os quais são transportados tanto adsorvidos aos colóides do solo quanto solubilizados na água do escoamento superficial, podendo variar com o sistema de manejo do solo (Bertol et al., 2003).

Perdas de nutrientes por erosão hídrica são fortemente influenciadas pelo manejo do solo. O uso de sistemas de manejo inadequados pode aumentar os custos com adubação e provocar a degradação dos agroecossistemas.

Em geral, os sistemas conservacionistas do solo são caracterizados pela presença de cobertura do solo e/ou rugosidade da superfície mais extensa do que em sistemas tradicionais, frequentemente denominados por sistemas convencionais. É, portanto, conhecido que os métodos de preparo do solo variam em extensão de superfície trabalhada, em profundidade de preparo e em volume de solo mobilizado, variando quanto à percentagem de cobertura por resíduos culturais e grau de rugosidade superficial do solo (Kochann e Denardin, 2000).

A mobilização do solo pelo seu preparo melhora as condições físicas a critério de auxiliar na infiltração de água da chuva e assim, diminuir a sua saída das áreas agrícolas na forma de enxurrada (Cogo e Streck, 2003). Contudo, deixar a superfície do solo descoberta e solta faz com que o sistema solo sofra variações que, com o tempo, desfavorecem tanto a sua conservação quanto a da água (Gilles et al., 2009).

As perdas de nutrientes podem ser expressas como concentração na água ou no sedimento e como quantidades perdidas por unidade de área (Bertol et al., 2003; Martins Filho et al., 2009). Como mencionado, os nutrientes que se encontram no solo, podem ser removidos também no processo de erosão hídrica, essencialmente de dois modos: adsorvidos às partículas sólidas (minerais e orgânicas) e dissolvidos na água do escoamento superficial.

As suas concentrações no material erodido (partículas de solo + água de escoamento superficial), entretanto, variam com o regime de chuva, com o tipo de solo e com os seus teores originais no solo. Para um mesmo local e tipo de solo, os teores de nutrientes presentes, variam com as práticas de manejo agrícola empregadas, como os diferentes sistemas de cultivo, métodos de preparo do solo, semeadura das culturas, tipos, quantidades, frequências e formas de aplicação de adubos e corretivos (Barrows e Kilmer, 1963).

Agrava a situação a ausência, na lavoura, de práticas de controle da erosão ou práticas conservacionistas de suporte (práticas complementares de controle da erosão), como o preparo mínimo do solo, o cultivo em contorno e o cultivo em faixas e em contorno, os quais têm por função auxiliar na redução do volume e na velocidade da enxurrada, desse modo diminuindo significativamente as perdas de água e nutrientes por erosão (Muniz Júnior, 2006).

Devido a não mobilização da camada arável do solo, Schick et al. (2000), ressaltaram que a técnica do cultivo mínimo normalmente resulta em acúmulo de nutrientes na superfície do solo, causado pela aplicação superficial de fertilizantes, corretivos ou pela pequena profundidade no solo e, também pela decomposição dos restos culturais que se encontram em superfície. Esses aspectos favorecem a alta concentração de nutrientes nas águas da enxurrada (Bertol et al., 2007).

No método convencional de preparo do solo, por mobilizar a superfície do solo, instantaneamente cria-se elevada rugosidade superficial e acentuado microrrelevo, reduzindo substancialmente o escoamento superficial e as perdas por erosão no curto prazo (Alberts e Moldenhauer, 1981; Cogo et al., 1983; Schwarz, 1997). Contudo, a superfície do solo fica totalmente pré-disposta à formação de selamento, restringindo muito a infiltração de água e, assim, favorecendo a formação de grandes volumes de enxurrada e originando perdas de solo e de nutrientes por erosão hídrica em quantidades elevadas (Duley, 1939; Macedo et al., 1998).

As concentrações de Ca, P e matéria orgânica foram superiores no sedimento erodido, segundo Hernani et al. (1999), quando o solo havia sido preparado de modo convencional (aração e gradagem), enquanto as concentrações de K foram superiores na água da enxurrada no cultivo mínimo, corroborando outros resultados que demonstraram também a forte influência do preparo do solo na remoção dos nutrientes pelo processo de erosão.

Em termos financeiros, Sartori et al. (2019) apontaram que a erosão hídrica gerou um custo de cerca de 8 bilhões de dólares anuais, concomitante à redução de aproximadamente 33,7 milhões de toneladas de alimentos. Nesse sentido, a FAO (2015) destacou que os nutrientes perdidos por erosão precisam ser repostos ao solo. Este processo gera gastos consideráveis com fertilizantes, somente a erosão do solo induz perdas de 23 a 42 milhões de toneladas de nitrogênio (N) e 14,6 a 26,4 milhões de toneladas de fósforo (P) em terras agrícolas.

A Embrapa (2018) destacou que um dos grandes desafios, para as atividades agrícolas, consistia na diminuição das perdas de solo por erosão, pois essas perdas anuais somente no Brasil seriam de aproximadamente 500 milhões de toneladas, refletindo e intensificando assim no uso de fertilizantes, adubos e corretivos para se manter a produtividade das lavouras.

O desafio da sustentabilidade agrícola, o desafio da sustentabilidade agrícola, imposto pelo processo de erosão e degradação dos solos, para Sartori et al. (2019) e De Oliveira et al.(2023) foram abordados em inúmeros estudos como estratégia sustentável na agricultura para recuperação e a conservação do solo e de sua fertilidade.

Os nutrientes aplicados por meio das adubações ficam concentrados na superfície do solo, o que facilita suas perdas, porque a aplicação de corretivos e fertilizantes em superfície irá favorecer a dissolução dos mesmos na água que se encontra retida em pequenas depressões de armazenamento superficial e nos resíduos culturais, bem como o seu transporte via escoamento superficial, o que, favorece a perda de nutrientes por erosão, mais do que se eles tivessem sido incorporados ao solo (Bertol et al., 2007).

Existe, portanto, uma necessidade da utilização de práticas de manejo do solo que visem minimizar a sua perda física por erosão e também a perda de água da chuva na forma de enxurrada e, com ela, os nutrientes, reduzindo os custos de reposição por meio das adubações, o que irá refletir em maior lucratividade da lavoura.

Reavaliar as métricas de perdas ambientais e econômicas, relacioná-las as escolhas de atividades agrícolas mais sustentáveis dos solos nos diferentes sistemas, são atitudes importantes, pois a valoração econômica dos nutrientes perdidos por erosão reflete diretamente nos serviços ecossistêmicos ofertados pelo solo.

Logo é fato, o conhecimento da perda de solo, de água e de nutrientes por erosão constitui uma necessidade básica e permanente na agricultura, uma vez que ele possibilitará a elaboração de planejamentos de uso do solo na propriedade agrícola de forma quantitativa e mais bem sustentada, em base verdadeiramente conservacionista, propiciando melhorias na capacidade produtiva do solo para as culturas e resultando em melhor preservação do ambiente. Este aspecto aponta para a necessidade de replanejamento do uso do solo, marcando o desenvolvimento de atividades agrícolas com maior grau de sustentabilidade socioeconômica e ambiental (Azevedo Junior e Santana, 2022; Costa, 2015; Santana, 2022, Silva et al., 2020).

2.3 Matéria orgânica e erosão do solo

A matéria orgânica desempenha papel fundamental na sustentabilidade, influenciando diretamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com reflexo na estabilidade e produtividade dos solos agrícolas.

A quantidade de matéria orgânica no solo (MOS) depende da entrada de material orgânico, da sua taxa de mineralização, da textura do solo e do clima, entre outros fatores (Lail, 2004). Esses fatores interagem de modo que o teor de matéria orgânica tende em direção a um equilíbrio em áreas vegetadas (Khorramdel et al., 2013).

Em áreas agrícolas, o manejo praticado tem grande influência nos estoques de matéria orgânica, podendo diminuir, manter ou aumentar os acúmulos em uma mesma área (Bayer et al., 2000; Liu et al., 2010; Khorramdel et al., 2013).

A mineralização da matéria orgânica do solo, quando em sistemas não agrícolas, é compensada pela deposição natural de folhas na superfície do solo. Esse material é decomposto por microrganismos, que também produzem substâncias orgânicas incorporadas ao solo por meio da água da chuva, promovendo o restabelecimento do estoque de matéria orgânica (Cerri et al., 2017).

A atividade agrícola pode alterar esse equilíbrio dinâmico e comprometer qualitativa e quantitativamente os teores de matéria orgânica no solo (Cardoso et al., 2010). Neste sentido, Adimassu et al. (2017), advertiram sobre as perdas de estoque de carbono e da fertilidade do solo devido à erosão como um grave problema econômico nas terras agrícolas.

Nesse contexto, segundo Guimarães et al. (2021), o estudo da MOS tem se mostrado eficiente para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo na qualidade ambiental do solo, especialmente quando da análise de frações físicas da MOS como carbono lábil e carbono complexado. O índice de mobilidade de carbono (IMC), que reflete o aumento do carbono orgânico do solo (SOC) e o aumento do carbono complexo do solo, é um índice que indica a proporção de carbono lábil em relação ao solo de referência (Oliveira et al., 1999), o qual pode ser utilizado para indicar os efeitos do processo de erosão sobre a estabilidade dos estoques de carbono do solo.

A remediação de solos degradados pela erosão é lenta e atribulada. A necessidade de aumentar o uso de insumos químicos externos para recuperar a fertilidade e melhorar o rendimento do solo erodido pode afetar a sustentabilidade do já sensível do solo (Novara et al., 2018).

Devido aos seus efeitos diretos e indiretos sobre as propriedades do solo, a matéria orgânica exerce forte influência sobre a capacidade produtiva do solo. O uso de práticas conservacionistas que promovam a descompactação do solo e o aumento da biodiversidade do sistema produtivo através da diversidade do processo de rotação e sucessão de culturas. Com isso, o sistema de plantio auxilia no aumento da fertilidade natural do solo pela decomposição da matéria orgânica e pelo consórcio com plantas que aumentam o estoque de matéria orgânica no solo (Salomão et al., 2020).

A biomassa proveniente das gramíneas apresenta efeitos na agregação do solo, pois possui alta relação C/N e uma decomposição lenta e gradativa da matéria orgânica (Salomão et al., 2020). Além disso, há a incorporação de macro e micronutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, boro, molibdênio, entre outros, através da reciclagem dos nutrientes proporcionada pela decomposição da cobertura de restos culturais.

A mobilização da camada arável do solo acelera a oxidação da matéria orgânica e promove o desarranjo dos agregados, tornando-os menos estáveis. Perante isso, a exposição do solo durante o seu revolvimento possibilita maior atuação do processo erosivo nas áreas agrícolas.

Uma observação interessante, mencionada por Barrows e Kilmer (1963), é que a utilização de adubos orgânicos, como dejetos de animais, favorece a perda de nutrientes por erosão hídrica, mais do que a utilização de adubos minerais, em virtude da maior facilidade de transporte dos constituintes orgânicos pela enxurrada, motivada pela sua menor densidade e maior concentração em superfície. Entretanto, Kleinman e Sharpley (2003) observaram que, por pouco tempo após a aplicação de altas doses de esterco, este serviu de proteção física ao impacto das gotas da chuva, diminuindo a desagregação inicial de suas partículas, enquanto, no médio ou longo prazo, a aplicação do referido material proporcionou aumento no teor de matéria orgânica do solo, influenciando as propriedades do solo, estabilidade de

agregados e capacidade de infiltração de água, reduzindo assim as perdas por erosão hídrica.

2.4 Desafios da agricultura sustentável: erosão do solo, perdas nutricionais e a necessidade de práticas integradas

O controle da erosão do solo é um desafio significativo na agricultura contemporânea por estar ligado à sustentabilidade e produtividade dos solos agrícolas. A crescente demanda por alimentos e o cultivo extensivo em áreas propensas à erosão exacerbam os desafios enfrentados pelos agricultores (FAO, 2015). O manejo do solo desempenha um papel crucial na conservação desse recurso, mediante práticas sustentáveis que visam a redução da erosão e asseguram a resiliência do solo (Lail, 2004).

A perda de nutrientes do solo devido à erosão hídrica é um aspecto crítico, influenciado diretamente pelo manejo do solo. Métodos inadequados de preparo do solo aumentam os custos com adubação e contribuem para a degradação dos agroecossistemas (Kochann e Denardin, 2000). Diferentes práticas de preparo do solo, como o cultivo mínimo e o convencional, impactam as perdas de nutrientes e água por erosão, destacando a importância de estratégias conservacionistas (Schwarz, 1997; Schick et al., 2000).

Além do exposto, a matéria orgânica exerce um papel crucial na sustentabilidade do solo, influenciando seus atributos físicos, químicos e biológicos. O manejo agrícola afeta diretamente os estoques de matéria orgânica, podendo comprometer a fertilidade e estabilidade do solo (Cardoso et al., 2010; Novara et al., 2018). Práticas conservacionistas, como o uso de adubos orgânicos e rotação de culturas, são essenciais para preservar a matéria orgânica e promover a saúde do solo (Salomão et al., 2020).

As perdas de solo, água, nutrientes e matéria orgânica por erosão não apenas representam desafios econômicos, mas também ambientais. O replanejamento do uso do solo, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis e a

avaliação econômica das perdas são fundamentais para garantir a segurança do solo e a preservação ambiental (Azevedo Junior e Santana, 2022; Salomão et al., 2020). Em um cenário global de aumento na produção de alimentos, a gestão sustentável do solo torna-se imperativa para enfrentar os desafios futuros (FAO, 2012).

Em resumo, a erosão do solo e as perdas associadas de nutrientes e matéria orgânica exigem uma abordagem integrada e sustentável na agricultura moderna. O equilíbrio entre práticas conservacionistas, manejo eficiente do solo e a compreensão dos impactos ambientais são cruciais para garantir a produtividade agrícola a longo prazo, preservando os recursos naturais.

Os impactos da erosão do solo e das perdas de nutrientes vão além dos aspectos agrícolas, afetando diretamente a qualidade da água. A contaminação de cursos d'água por sedimentos enriquecidos com nutrientes provenientes das terras cultivadas é identificada como um grave problema ambiental (Bispo et al., 2017). Isso destaca a necessidade urgente de implementar práticas agrícolas mais sustentáveis que não apenas conservem os solos, mas também evitem a degradação da qualidade da água.

A avaliação precisa do solo é um desafio contínuo, pois sua qualidade varia espacial e temporalmente, sendo influenciada pelas práticas de manejo do uso da terra. A busca por indicadores quantificáveis e mapeáveis é crucial para informar decisões críticas relativas à gestão sustentável do solo em níveis global e regional (FAO, 2013). Informações precisas sobre o estado e as propriedades dos recursos globais do solo são fundamentais para orientar estratégias conservacionistas, visando à melhoria da capacidade produtiva do solo e à preservação do ambiente.

Os desafios mencionados ressaltam a importância de uma abordagem holística na agricultura, que considere não apenas a produtividade imediata, mas também a sustentabilidade a longo prazo. A implementação de diretrizes de governança do solo e a promoção de práticas de manejo integrado são passos essenciais para enfrentar a erosão do solo, a perda de nutrientes e a degradação da matéria orgânica, garantindo a saúde do solo e a segurança alimentar no futuro.

2.5 Influência da permanência dos resíduos vegetais sobre o solo

O Brasil cultiva cana-de-açúcar desde o período colonial, cultivando cerca de 10 milhões de ha principalmente em duas regiões tradicionais: o centro-sul e o nordeste (Carvalho et al., 2019; Cherubin et al., 2021). Na região centro-sul, o Estado de São Paulo concentra 55% da produção nacional de cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2022; Valente e Laurini et al., 2021).

Embora a cana-de-açúcar seja considerada uma cultura sustentável, durante sua expansão no Brasil, foram relatados alguns problemas relacionados ao manejo do solo: degradação da estrutura, compactação, uso excessivo preparo convencional e erosão (Martini et al., 2021; Canisares et al., 2020; Dos Santos et al., 2022).

A erosão do solo pode causar menor produtividade da cana-de-açúcar, devido à diminuição do acúmulo e transformação da matéria orgânica do solo, fornecimento de nutrientes, infiltração, retenção e abastecimento de água. Além disso, carregam sedimentos e nutrientes para corpos hídricos (Melland et al., 2022; Portinho et al., 2021; Santos et al., 2021).

Manter o solo descoberto é considerado uma das principais causas da erosão. A manutenção da cobertura do solo, ou seja, palha mantida nas áreas de cana-de-açúcar reduz a erosão do solo ao dissipar a energia cinética das gotas de chuva, diminuindo a velocidade do fluxo e reduz a pressão das máquinas agrícolas no solo, atenuando o aumento da compactação (Bordonal et al., 2018; Li et al., 2021; Martini et al., 2021).

A manutenção de 50 e 100% cobertura pela palha da cana-de-açúcar na superfície do solo, comparativamente ao solo nú, reduz a erosão do solo em 68 e 89%, respectivamente (Martins Filho et al., 2009). Assim, são necessárias técnicas eficientes para monitorar o solo, prevenir e minimizar ameaças ao solo e promover a segurança do solo na produção de cana-de-açúcar.

Os sistemas de produção de cana-de-açúcar passaram por adaptações ao longo dos anos, motivadas principalmente pelo avanço da colheita mecanizada nos canaviais (Vitti e Prado, 2012; Demattê e Demattê, 2009). Com isto houve um incremento na manutenção de resíduos culturais de cana-de-açúcar no campo, o

que originou benefícios para a conservação e qualidade do solo. Segundo Bezerra e Cantalice (2006) e Valim et al.(2016), a palha promove redução do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial, resultando em menor desagregação das partículas do solo e redução dos processos erosivos.

Em áreas com 50% e 100% de cobertura por resíduos vegetais de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, Martins Filho et al.(2009) constataram que a taxa de infiltração de água é maior que em áreas com ausência desta cobertura.

Outro ponto a ser observado, na presença de palhada em superfície, é a redução na temperatura máxima do solo e maior conservação da umidade do solo (Gmach et al., 2020; Corrêa et al., 2018). Além disso, ao longo dos ciclos ocorre o aumento dos teores de carbono orgânico e CTC do solo, melhorando assim a qualidade química do solo (Correia e Alleoni, 2011; Santos et al., 2022).

Além das alterações apresentadas em decorrência do avanço da mecanização nos canaviais, a variação anual da área e percentual de solo descoberto é afetada por momentos climáticos e econômicos ocorridos no período. A época de plantio é considerada a mais impactante para a conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar (Machado et al., 2022).

Relativo aos momentos climáticos, Teixeira et al. (2022) ressaltou a importância das informações sobre erosividade no planejamento de conservação do solo para a atividade canavieira no estado de São Paulo. As reformas de áreas acontecem principalmente nos meses de dezembro e janeiro, os quais proporcionam chuvas intensas e em grandes volumes, exigindo um correto planejamento devido à alta propensão à erosão.

Tradicionalmente, na reforma de uma área de cana-de-açúcar, o primeiro passo é o revolvimento do solo (aragem, subsolagem e gradagem) devido a problemas físicos, químicos ou biológicos (preparo convencional), o que promove a quebra das partículas do solo (Bolonhezi, 2019; Da Luz et al., 2020).

É necessário considerar que a presença de solo descoberto na estação chuvosa pode aumentar a perda de solo pela erosão. Deve-se considerar o plantio mínimo ou localizado (preparar o solo apenas na linha de plantio, promovendo maior manutenção da palhada) e utilização de plantas de cobertura (Corrêa et al., 2018,

Carneiro et al., 2020). De acordo com estudos de Prove et al. (1995), a perda média de solo para sistemas de preparo convencional foi de $148 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto no sistema plantio direto foi inferior a $15 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Contudo, alguns autores relatam que o setor ainda resiste à adoção de metodologias de preparo do solo mais conservacionistas (Fuentes-Llanillo et al., 2021).

Em estudo desenvolvido por Panagos et al. (2017) ficou demonstrado que a ocorrência de valores de erosividade acima de $4.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em áreas com clima temperado chuvoso, como no sul de Minas Gerais, enfatizam a necessidade de manejo conservacionista e a manutenção dos resíduos vegetais.

Estudos têm apontado, como os de Amorim et al. (2019) e Amorim et al. (2021), a importância das práticas conservacionistas do solo na cultura da cana-de-açúcar, principalmente pela produção de sedimentos e transporte de poluentes pelo escoamento superficial.

Estudo desenvolvido por Amorim et al. (2021), quanto a origem dos sedimentos produzidos numa bacia hidrográfica no nordeste do Brasil, detectou que a segunda maior fonte de sedimentos foi a cultura da cana-de-açúcar. A variação do coeficiente de escoamento superficial em uma bacia hidrográfica da região de Piracicaba, em grande parte ocupada com cana-de-açúcar, apontou o impacto do manejo do solo no escoamento superficial produzido (Machado et al., 2022).

Na Austrália, há grande preocupação com as práticas de manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar, principalmente devido ao potencial impacto de sedimentos e compostos poluentes para com uma Grande Barreira de Corais (Vilas et al., 2022).

A tendência de redução da frequência de solo descoberto na época das chuvas é de grande importância para a sua conservação e segurança do solo. Esta redução demonstra um melhor planejamento e compreensão do setor em que as terras podem ficar desnudas em determinadas épocas do ano. Isso pode estar relacionado ao avanço do conceito de “Ambientes de Produção”, que considera a interação entre solo, clima e planta, uso de culturas de cobertura migração do plantio de cana-de-açúcar de 12 meses para cana de 18 meses, adoção do sistema de plantio Meiosi quando possível (Barbosa et al., 2021; Catelan et al., 2022; Carneiro et al., 2020; Demattê e Demattê, 2009).

De acordo com Landell et al.(2003), para um conhecimento adequado do ambiente de produção na cultura da cana-de-açúcar é necessário, primeiramente, classificar o solo. Além disso, há a importância de um mapeamento adequado dos solos de área agrícola para classificação dos ambientes de produção e grupos de solos para o manejo agrícola (Donzelli et al., 2018).

Manter os solos descobertos promove aumento da temperatura, o que leva à aceleração da decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, afeta a biota do solo (Demattê et al., 2020). O avanço da colheita mecanizada, na cultura de cana-de-açúcar, tem demonstrado melhoria nas condições biológicas e químicas dos solos que o setor agrícola pode propiciar e, principalmente, no que contribui também do solo e da água.

2.6 Dados legados e inteligência artificial na avaliação da erosão do solo com o modelo RUSLE

A modelagem da erosão do solo na cultura da cana-de-açúcar utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE, *Revised Soil Loss Equation*) tem se beneficiado significativamente do uso de dados legados e avanços em inteligência artificial (IA). A RUSLE é uma ferramenta amplamente utilizada para prever as perdas de solo, integrando fatores como erosividade da chuva, erodibilidade do solo, comprimento e inclinação do terreno, práticas de manejo e cobertura vegetal. O acesso a dados históricos, como os fornecidos por Souza et al. (2004), Souza et al. (2005) e Izidorio et al. (2005), tem sido crucial para calibrar e validar modelos, melhorando a precisão das previsões de erosão em áreas com cultivo de cana-de-açúcar.

O uso de inteligência artificial nesse contexto proporciona avanços significativos na modelagem da erosão do solo. Algoritmos de aprendizado de máquina podem analisar grandes conjuntos de dados, identificar padrões complexos e otimizar a precisão do modelo RUSLE. Estudos recentes, como os de Zhang et al. (2020), demonstraram a eficácia de abordagens baseadas em IA na melhoria da

previsão da erosão do solo em diferentes culturas. A capacidade desses modelos de aprender e se adaptar às condições variáveis do solo e do clima fortalece a capacidade de antecipar e mitigar os impactos da erosão na produção de cana-de-açúcar (Xue et al., 2018).

O aprimoramento do modelo RUSLE na avaliação da erosão do solo na cultura da cana-de-açúcar também se beneficia da integração de dados legados provenientes de pesquisas específicas sobre o manejo do solo. Estudos como o de Bernardi (2022) fornecem informações valiosas sobre práticas conservacionistas e seu impacto na erosão em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Ao incorporar esses dados históricos ao modelo RUSLE, é possível melhorar a precisão das previsões, considerando variações nas práticas agrícolas ao longo do tempo.

Além disso, a implementação de tecnologias de sensoriamento remoto e imagens de satélite pode fornecer dados atualizados para alimentar os modelos, contribuindo para uma avaliação mais dinâmica e em tempo real da erosão do solo. A combinação de dados legados, inteligência artificial e tecnologias de sensoriamento remoto oferece uma abordagem holística e avançada para compreender e gerenciar os desafios relacionados à erosão do solo na cultura da cana-de-açúcar (Novais 2021).

A aplicação de inteligência artificial no contexto da erosão do solo em plantações de cana-de-açúcar vai além da mera otimização dos parâmetros do modelo RUSLE. Algoritmos de aprendizado de máquina podem ser treinados para identificar padrões específicos associados à erosão, levando a uma compreensão mais profunda das interações entre variáveis do solo, práticas de manejo e erosão.

Em um estudo, Dechen et al. (2015) destacaram o potencial das abordagens baseadas em inteligência artificial para antever áreas de risco e direcionar estratégias de conservação de maneira mais precisa. Ao explorar essa interseção entre dados legados, inteligência artificial e o modelo RUSLE, a pesquisa na área da erosão do solo na cultura da cana-de-açúcar avança em direção a metodologias mais refinadas e adaptáveis às condições vigentes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área de estudos

O trabalho foi conduzido em área da Fazenda São Bento, cultivada há mais de 30 anos com cana-de-açúcar, no município de Guariba – SP, nas coordenadas geográficas de 21°19' a 21°20' S e 48°13' a 48°14' W (Figura 1). O solo local foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), de textura muito argilosa (Embrapa, 2013).

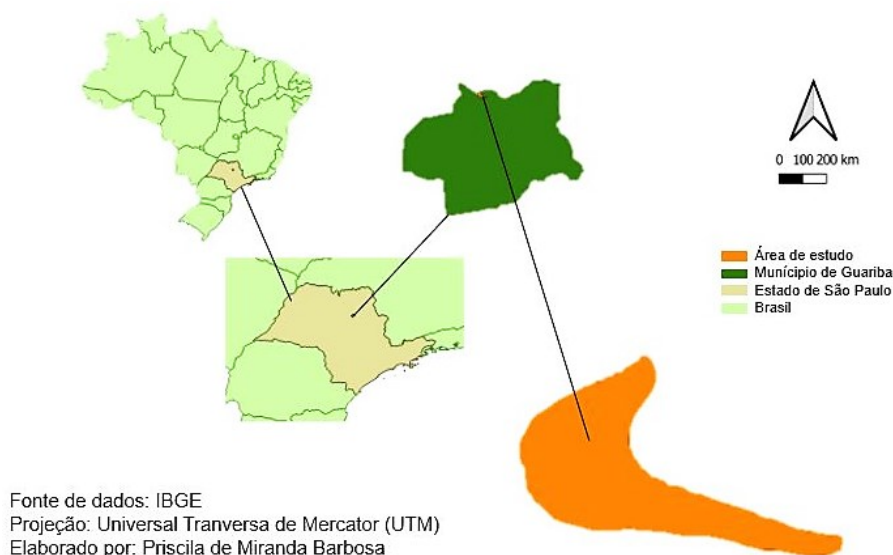


Figura 1. Localização da área da Fazenda São Bento.

O solo foi amostrado numa posição de sopé, nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 50 m, num total de 206 pontos ($\approx$ 42 ha) georreferenciados com GPS, Datum/elipsóide WGS-84 (Figura 2).

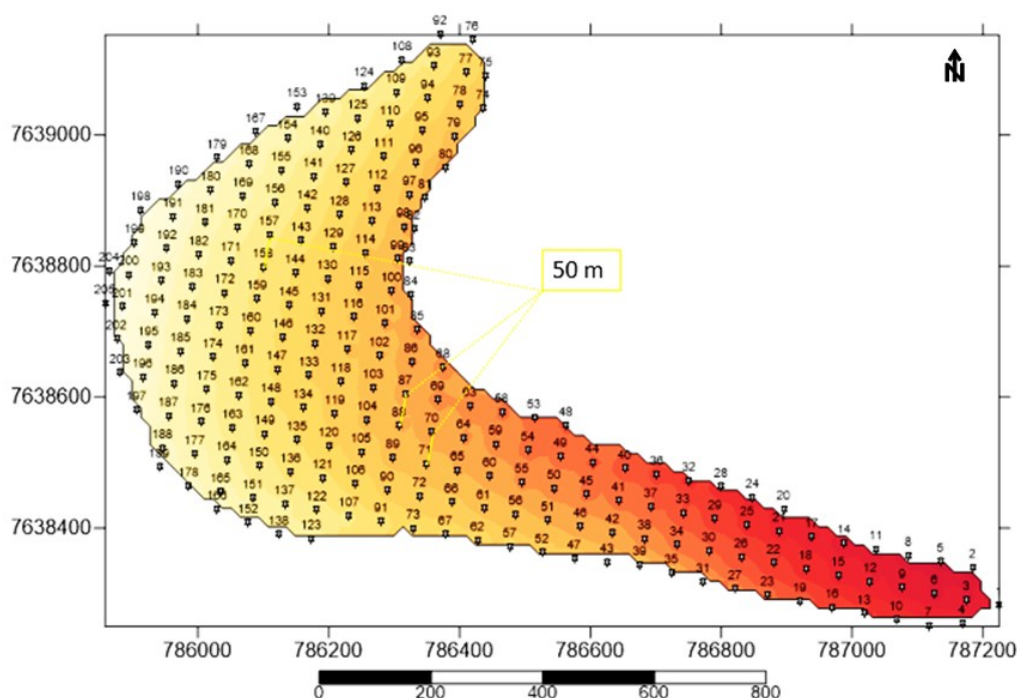


Figura 2. Malha dos pontos amostrais distanciados de 50 m entre si e georreferenciados na área da Fazenda São Bento.

Este trabalho foi conduzido a partir de dados legados, gerados por Souza et al. (2004) e Izidorio et al. (2005). Na caracterização química do solo, a acidez ativa (pH em CaCl_2) foi determinada pelo método potenciométrico utilizando-se a relação 1:2,5 de solo: CaCl_2 . As bases trocáveis cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram extraídas utilizando o método da resina trocadora de íons proposto por Raij et al. (2001). Com base nos resultados das análises químicas, foi calculada a porcentagem de saturação por bases do solo (V%).

Dados legados de Izidorio et al. (2005), Marcari (2010), Sousa et al. (2012), Silva et al. (2012) e Gomes (2019) compuseram um banco de dados, o qual foi utilizado para correlacionar as perdas de solo com as de matéria orgânica e nutrientes nos sedimentos erodidos. Os experimentos citados foram conduzidos em parcelas experimentais, com preparo do solo alinhadas no sentido da declividade do terreno, com média igual à 8,1%, as quais foram instaladas com as seguintes dimensões: a) em entressulcos - 0,50 m de largura e 0,75 m de comprimento totalizando 0,38 m²; b) em sulcos - 0,20 m de largura, 0,20 m de profundidade e 9,00 m de comprimento, pré-formados com uma enxada; c) erosão global - 3,50 m de

largura e 11,00 m de comprimento totalizando 38,5 m² (Izidório et al., 2005). As parcelas em entressulcos e macro parcelas foram delimitadas com chapas metálicas nas laterais e na parte superior. Todas as parcelas apresentavam calhas coletoras metálicas, em seus limites inferiores, convergentes para uma saída de 0,11 m de diâmetro (Izidório et al., 2005).

A análise granulométrica do solo foi realizada por Izidório et al. (2005), com o método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação com aparato de alta rotação de 12.000 rpm (Gee e Bauder, 1986). O LVef, na camada de 0,00 a 0,20 m, apresentou teores médios de, 653 g kg⁻¹ de argila, 169 g kg⁻¹ de silte e 178 g kg⁻¹ de areia (Izidório et al., 2005). Nas análises químicas do solo e dos sedimentos erodidos, o cálcio, o magnésio, o potássio e o fósforo, foram extraídos pelo método da resina trocadora de íons (Raij et al., 1987).

O pH foi determinado potenciométricamente em solução de CaCl₂ 0,01M (Izidório et al., 2005). Atributos químicos do solo são apresentados na Tabela 1, os quais foram utilizados para estabelecer as taxas de enriquecimento do sedimento erodido por MO, P, K, Ca e Mg.

Tabela 1. Concentrações médias de matéria orgânica (MO) e nutrientes (P, K, Ca e Mg) no solo original na profundidade de 0,0 a 0,20 m.

Profundidade	N	MO	P	K	Ca	Mg
m	g kg ⁻¹	g dm ³	mg dm ⁻³	-----	mmol _c dm ⁻³	-----
0,0 a 0,20	206	27,8	26,5	5,1	37,8	12,4

Os resultados obtidos foram submetidos ao Teste F da análise da variância de um delineamento inteiramente casualizado. Nas comparações múltiplas das médias, utilizou-se do teste de Duncan a 5% de probabilidade (Izidório et al., 2005). Análises de correlações foram conduzidas entre os dados de perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes obtidos por erosão em entressulcos, em sulcos e global. Para essas análises, foi utilizado o programa estatístico Statistica (Statsoft, 1994). Os modelos ajustados foram utilizados em estimativas das perdas de solo, MO e nutrientes para fins de análise geoestatística da variabilidade espacial das mesmas. Nessa análise, utilizou-se de um banco de dados de atributos físicos e químicos da camada superficial do solo (0,00 a 0,20 m) estabelecido por Souza

(2004). O solo como já descrito foi amostrado numa posição de sopé, nos pontos de cruzamento de uma malha.

3.2 Análises e softwares

O modelo de elevação digital do terreno (MEDT) foi obtido de imagens do sensor PALSAR (a bordo do satélite ALOS) ano 2011, com resolução espacial de 12,5 x 12,5 metros, e georreferenciadas no sistema de coordenadas Datum SIRGAS 2000, no sistema de projeção UTM na zona 22K, hemisfério sul (ALOS PALSAR, 2022-<https://search.asf.alaska.edu/#/>). Com o MEDT foi obtida a declividade média da área e caracterizado o relevo da Fazenda São Bento (Figura 3). Declividade média da área foi classificada conforme o relevo: 1) 0-3% plano em 13,5% da área, 2) 3-8% suave ondulado, em 54,5% da área da fazenda, 3) de 8 a 20% como ondulado em 31,9% da área total e 4) >20% forte ondulado em 0,1% da Fazenda São Bento.

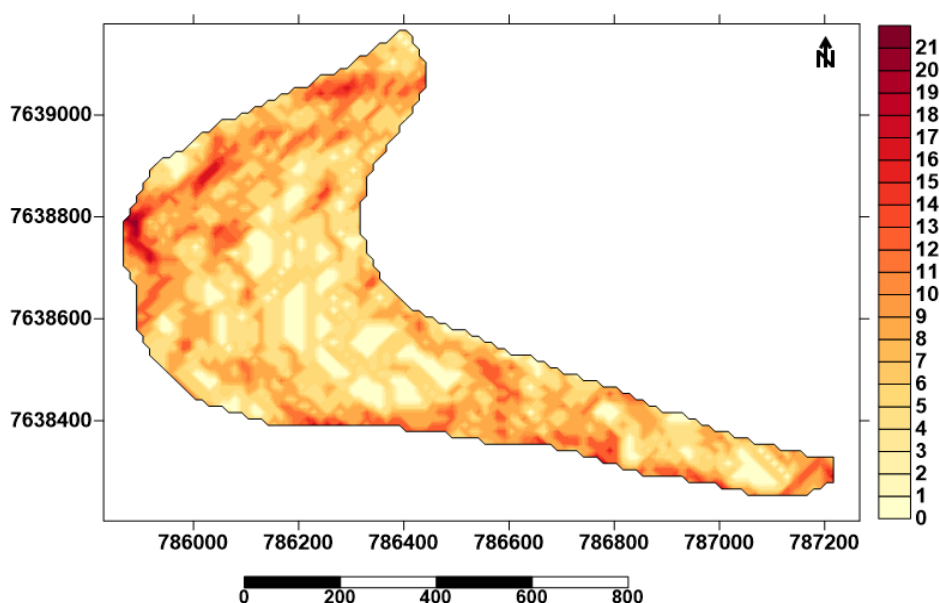


Figura 3. Declividade média da área da Fazenda São Bento.

As perdas de solo (A) por erosão, na área toda, ponto a ponto, foram estimadas com a equação universal de perdas de solo revisada (RUSLE), descrita por Renard et al. (1997) como:

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

em que, A é a Perda de solo por unidade de área, $t\ ha^{-1}$; R é a erosividade da chuva, $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$; K é a Erodibilidade do solo, $t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha\ h$; LS é o Fator para o efeito combinado do declive e do comprimento da rampa; C é o Fator cobertura vegetal e manejo do solo, e P é o Fator práticas conservacionistas.

Para a determinação do fator erosividade da chuva (Fator R) da RUSLE, foi utilizado o *software* netErosividade SP. O programa netErosividade informatizado é uma rede neural artificial (RNA), desenvolvida por Moreira et al. (2006), para estimar o valor de R em qualquer localidade do Estado de São Paulo. As coordenadas principais, latitude e longitude, para os 206 pontos amostrais da Fazenda São Bento, foram inseridas no programa netErosividade SP para estimar o fator R. A interface do usuário no programa computacional netErosividade SP pode ser observada na Figura 4.

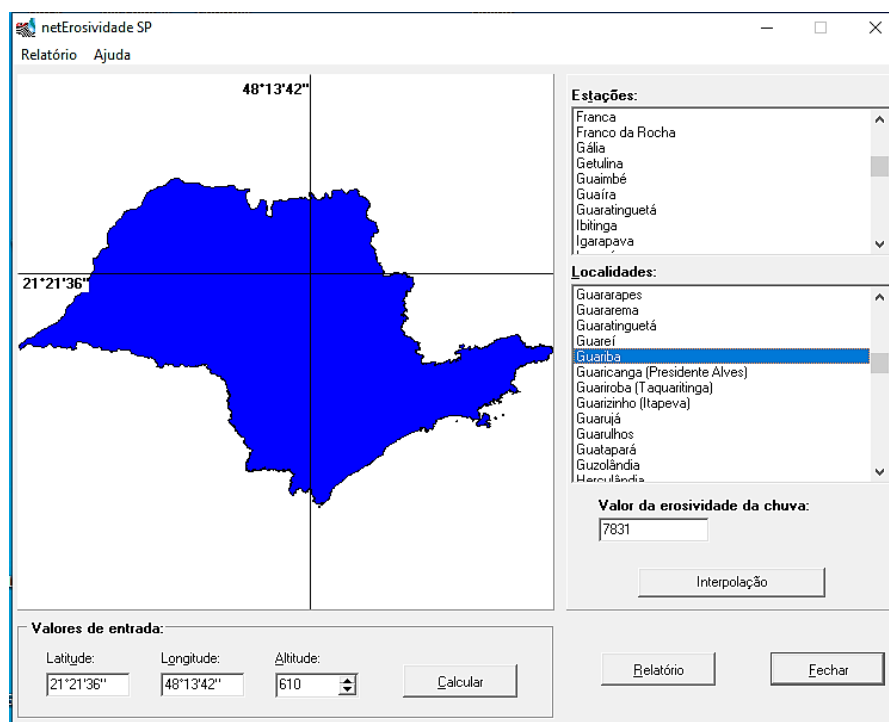


Figura 4. Programa computacional para estimativa da erosividade da chuva no estado de São Paulo.

A erodibilidade do solo (Fator K), em $Mg\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$, foi determinada de acordo com a equação proposta por Denardin (1990):

$$K = 0,00000748 \times M + 0,004448059 \times p - 0,06631175 \times DMP + 0,01039567 \times X_{32} \quad (2)$$

em que, M é o Novo silte (Novo silte + Nova areia); p é a permeabilidade codificada segundo Wischmeier et al. (1971); DMP é o diâmetro médio ponderado das partículas do solo inferiores a 2,00 mm, mm; X_{32} é a nova areia (MO/100); Novo silte = silte + areia muito fina, %; Nova areia = areia muito grossa + areia grossa + areia média + areia fina, %.

O fator Relevo (LS) foi obtido com o programa computacional LS_TOOL versão 3.1 2019, desenvolvido por Remortel et al. (2001), o qual foi revisado por (Zhang et al., 2017). Para o cálculo do Fator LS os seguintes procedimentos foram adotados:

1° Download do Digital Elevation Model (DEM) da área de estudo no site do ALOS PALSAR com resolução espacial 12,5 × 12,5 m;

2° Transformação do arquivo DEM para ASCII no Arcamp, de modo a inserir no programa LS_TOOL (Zhang et al., 2017);

3° Inserção do arquivo ASCII no programa LS-TOOL e sua configuração conforme ilustra (Figura 5).

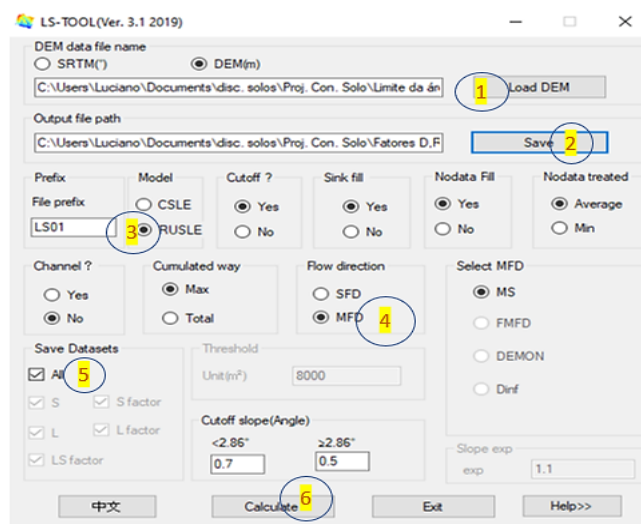


Figura 5. Tela do LS_TOOL e comandos ativados para o cálculo do fator LS.

O arquivo gerado pelo LS_TOOL com os valores ASCII foi convertido num arquivo Surfer com extensão grd. Posteriormente, o arquivo foi ajustado quanto ao número de linhas e colunas para serem iguais aos dos arquivos relativos aos fatores

R, K e P. Esta última operação foi necessária para realizar a álgebra de mapas no Surfer 11 e obter o mapa de estimativa de erosão.

O fator C é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto e cultivado (Bertoni e Lombardi Neto, 1993). A cobertura vegetal predominante na área de estudo foi a cana-de-açúcar, e o valor correspondente ao seu fator C foi o valor médio dos apresentados por (Bertoni e Lombardi Neto 1990; Amaral, 2006; Souza et al., 2005). Em termos de manejo do solo, considerou-se o efeito da manutenção de resíduos em superfície no período pós-colheita da cultura de cana-de-açúcar e o controle de tráfego na área no aumento da rugosidade superficial (Tabela 1), conforme McKague (2023).

O produto de $C_1 \times C_2 \times C_3$, os quais são apresentados na Tabela 2, foi utilizado para estabelecer o valor do Fator C, para cada sistema de cobertura vegetal e manejo do solo considerado na Fazenda São Bento. As estimativas de erosão foram obtidas para três cenários de cultivo de cana-de-açúcar considerando: 1) OAC, Operações agrícolas realizadas em contorno (Fator C = C_1); 2) OAC + MRSPC, Operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada (Fator C = $C_1 \times C_2$); 3) OAC + MRSPC + CT, Operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada + controle de tráfego (Fator C = $C_1 \times C_2 \times C_3$). Seguindo a literatura, na ausência de determinado uso, o valor correspondente do fator C seria considerado unitário, ou seja, 1,00.

Tabela 2. Valores do fator cobertura vegetal e manejo do solo (Fator C).

Uso predominante	Fator C	Fonte
Cultura Cana-de-açúcar (C_1)	0,115	Bertoni e Lombardi Neto (1993), De Maria et al. (1994) e Amaral (2006)
Manejo de resíduos (C_2)	0,60	McKague (2023)
Rugosidade (C_3)	0,35	McKague (2023)

Para o fator P foram adotados valores propostos por Wischmeier e Smith (1978), em função da declividade do terreno (d) para áreas cultivadas em contorno:

0,60 ($1\% \leq d \leq 2\%$); 0,50 ($3\% \leq d \leq 8\%$); 0,60 ($9\% \leq d \leq 12\%$) ; 0,70 ($13\% \leq d \leq 16\%$); 0,80 ($17\% \leq d \leq 20\%$); 0,90 ($21\% \leq d \leq 25\%$). Para a ausência de conservação do solo, o fator P foi considerado igual a 1,0.

O potencial natural de erosão fator (PNE), em $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$, foi calculado pela equação:

$$PNE = R \times K \times LS \quad (3)$$

Os fatores R, K e LS dependem das condições naturais de clima, solo e relevo, enquanto os fatores C e P relacionam-se a ações antrópicas, por meio da forma de ocupação e uso-manejo das áreas. O PNE foi classificado como apresentado por Perusi et al. (2022) fraco ($0 - 400 t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$), moderado ($400 - 800 t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$), forte ($800 - 1.600 t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$) e muito forte ($>1.600 t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).

O valor de tolerável de perdas de solo por erosão (T) foi estabelecido como (Mannigel et al., 2002):

$$T = 11,6420 e^{-0,1968 RT} \quad (4)$$

em que, RT é a relação textural do solo.

A taxa de enriquecimento (ER) por matéria orgânica (ER_{MO}) e nutrientes (ERP, ERK, ERCa e ER Mg) nos sedimentos erodidos, coletados por Izidorio et al. (2004), foi determinada como:

$$ER_x = \frac{CX_{sed}}{CX_{solo}} \quad (5)$$

em que, CX_{sed} é a concentração de um elemento X no sedimento e CX_{solo} é a concentração de X no solo.

A análise geoestatística dos fatores de erosão da RUSLE (R, K e P) foi realizada seguindo-se metodologia descrita em Vieira et al., (1983) e Robertson (1998) em três etapas: 1) análise espacial para obter o semivariograma; 2) escolha de modelo para ajustar o semivariograma, e 3) obtenção de valores das variáveis

em estudo em local não amostrado, para interpolação por meio da krigagem ordinária.

Para determinar a existência ou não da dependência espacial, ajustaram-se semivariogramas com o programa GS⁺ (Robertson, 1998). No caso de dirimir dúvidas na escolha do melhor modelo, para um mesmo semivariograma, adotaram-se como critérios o melhor coeficiente de determinação (R^2) e a menor soma de quadrados do resíduo (SQR). Na elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fator erosividade (R)

O fator erosividade (R) representa a capacidade da chuva em causar erosão. É influenciado pela intensidade e frequência das chuvas. Regiões com chuvas intensas e frequentes têm valores de R mais altos, indicando maior potencial erosivo.

Na área da Fazenda São Bento, os valores do fator R variaram na faixa de 7785 a 7890 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Figura 6). Os maiores valores do fator R ocorrem na região sudeste e os menores na região oeste da área. Os valores de R obtidos na área são classificados como de alto potencial erosivo, pois estão no intervalo 7357 a 9810 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Ricardi e Lima, 2021).

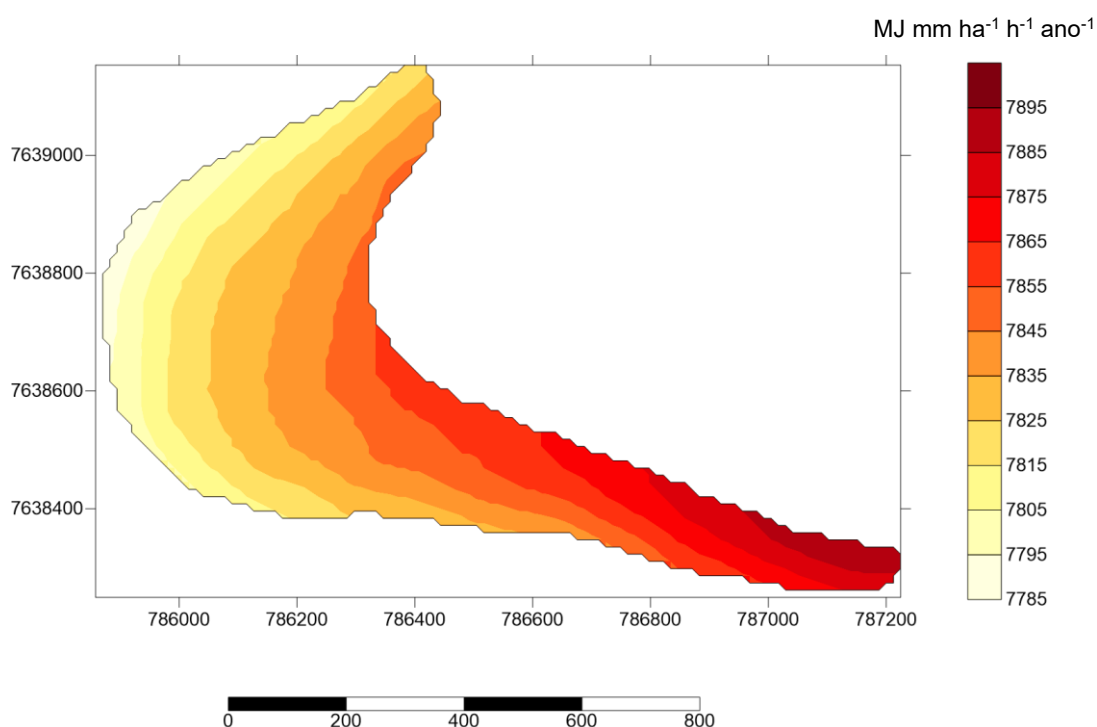


Figura 6. Erosividade da chuva na Fazenda São Bento.

Na Mesorregião de Ribeirão Preto, na qual se insere a área estudada, Rodrigues et al., (2015) verificaram que os valores extremos superiores de R ocorrem na porção leste com índices que variam aproximadamente entre 7000 e

7490 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, os quais afirmaram que estes seguem os padrões de distribuição da precipitação na Mesorregião.

Os valores apresentados na Figura 5 são da mesma ordem de magnitude dos apresentados por Ricardi e Lima (2021) os quais corroboram também valores de erosividade da chuva para o estado de São Paulo, de acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2010) que variam de 5750 a 8000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. Outros resultados de estudos realizados, no município de Monte Alto – SP, na Mesorregião de Ribeirão Preto, por Damasceno (2014) e Costa (2014) apresentaram erosividades de 7911 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e 7664 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, nesta ordem, corroborando os valores estimados neste estudo.

4.2 Fator erodibilidade (K)

O fator erodibilidade indica a susceptibilidade do solo à erosão. Solos com maior erodibilidade (K mais alto) são mais propensos a serem erodidos. A textura do solo, o conteúdo de matéria orgânica e a estrutura do solo são fatores que afetam o valor de K.

O solo na Fazenda São Bento, classificado como Latossolo Vermelho, é pedogeneticamente evoluído, profundo e com baixa erodibilidade (Figura 7). Seus valores se encontram no intervalo de 0,0172 a 0,0128 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, os quais se enquadram no padrão de baixo valor de erodibilidade (0,010 a 0,020 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹) estabelecido por Bertoni e Lombardi Neto (2010).

No município de Monte Alto - SP, na Mesorregião de Ribeirão Preto, Miqueloni e Bueno (2011) e Damasceno (2014) observaram valores de erodibilidade iguais a 0,036 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ e 0,0300 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. Tais valores de erodibilidade são considerados como altos quando $K > 0,030$ Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ (Bertoni e Lombardi Neto, 2010). Há um predomínio de Argissolos no município de Monte Alto, o que influencia a erodibilidade e a determinação das perdas de solo por erosão em áreas de solos com acúmulo de argila no horizonte subsuperficial (Oliveira et al., 1999; Bertoni e Lombardi Neto, 2010). Portanto, a

combinação de valores elevados de R e K pode ser preocupante, quando ambos valores são altos, mas não é o que se verificou na área do presente trabalho. Isto não se refletiu dentro da Fazenda São Bento para a combinação $R \times K$, o que será discutido mais adiante no presente trabalho.

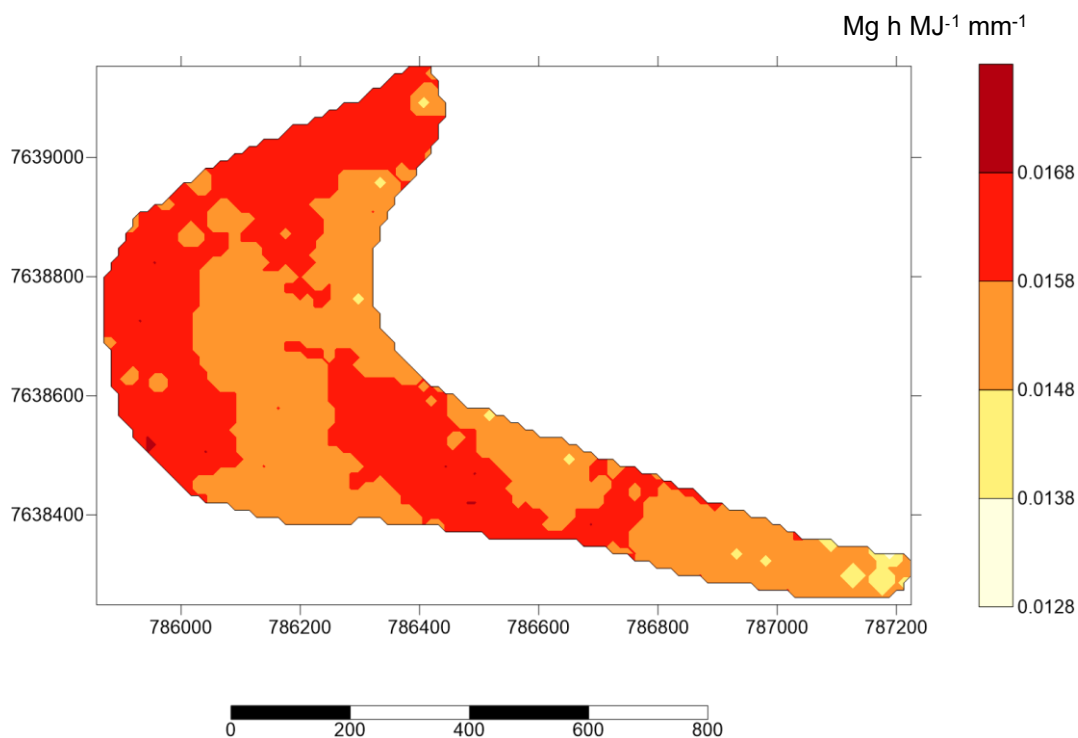


Figura 7. Erodibilidade da chuva na fazenda São Bento.

4.3 Fator topográfico (LS)

Esse fator reflete como a topografia influencia a erosão. Leva em consideração o comprimento do declive e a inclinação do terreno. Áreas com maior comprimento e declive possuem valores de LS mais altos, indicando maior potencial erosivo.

O fator LS apresenta uma distribuição bem desuniforme na Fazenda São Bento (Figura 8). A distribuição de LS tem valores variando de 0 a 5,6. O LS interfere na dinâmica do processo de erosão, uma vez que o efeito combinado do fator comprimento da rampa (L) e do fator declividade do terreno (S) interfere no

escoamento superficial (Pinheiro e Cunha, 2011). Quanto maior o valor de LS mais intenso pode ser o processo de erosão do solo (Wischmeier e Smith, 1978).

A análise da Figura 8 mostra que os maiores valores de LS ocorrem majoritariamente na porção oeste e norte da Fazenda São Bento. Quando se consideram classes de LS, segundo critérios de Bertoni e Lombardi Neto (2010) a Fazenda São Bento apresenta, em relação à sua área, $\approx 50\%$ de classe muito baixa ($LS < 1$); $\approx 40\%$ baixa ($LS, 1 - 2$); $\approx 9,998\%$ moderada ($LS, 2 - 5$); $\approx 0,002\%$ alta ($LS, 5 - 10$).

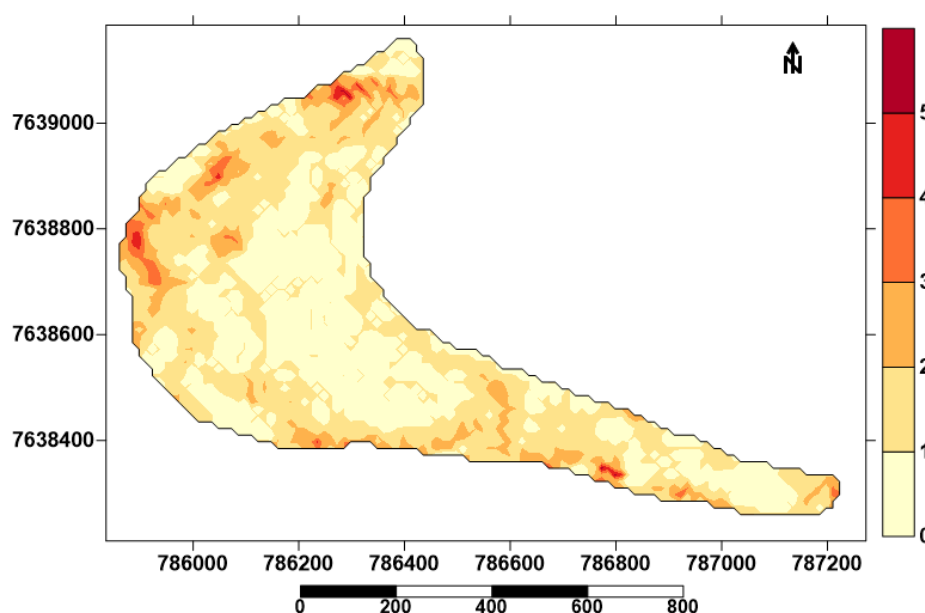


Figura 8. Fator topográfico (LS) na Fazenda São Bento.

Quando o Fator LS é considerado muito baixo ou baixo, isso sugere que o terreno tem uma topografia mais favorável, com menor inclinação e comprimento de rampa. Isso implica em menor potencial erosivo relativo ao relevo, o benéfico para a conservação do solo. Áreas com LS baixo estão menos suscetíveis à erosão em função do relevo, promovendo a estabilidade do solo e preservando os nutrientes. Em resumo, a consideração de valores de LS como muito baixos ou baixos é positiva, indicando uma menor predisposição à erosão do solo pelo fator relevo local e contribuindo para práticas sustentáveis de manejo de terras.

4.4 Potencial natural de erosão (PNE)

O Potencial Natural de Erosão é uma medida que representa a predisposição intrínseca de uma determinada área ou solo à erosão, considerando as características naturais do ambiente. O Potencial Natural de Erosão (PNE) é influenciado por fatores como a textura do solo, inclinação do terreno, tipo de vegetação e clima regional. Em essência, o PNE fornece uma estimativa do quanto um determinado local seria propenso à erosão se não fossem implementadas práticas de conservação do solo ou outras intervenções humanas. Quanto mais alto o valor de PNE, maior é o potencial natural da área para perder solo devido a processos erosivos naturais.

A associação dos fatores naturais como erosividade das chuvas (R), erodibilidade do solo (K) e fator topográfico (LS) influencia a ocorrência da erosão, os quais representam a perda de solo sem a interferência antrópica. Especificamente na Fazenda São Bento, o PNE pode ser observado na Figura 9.

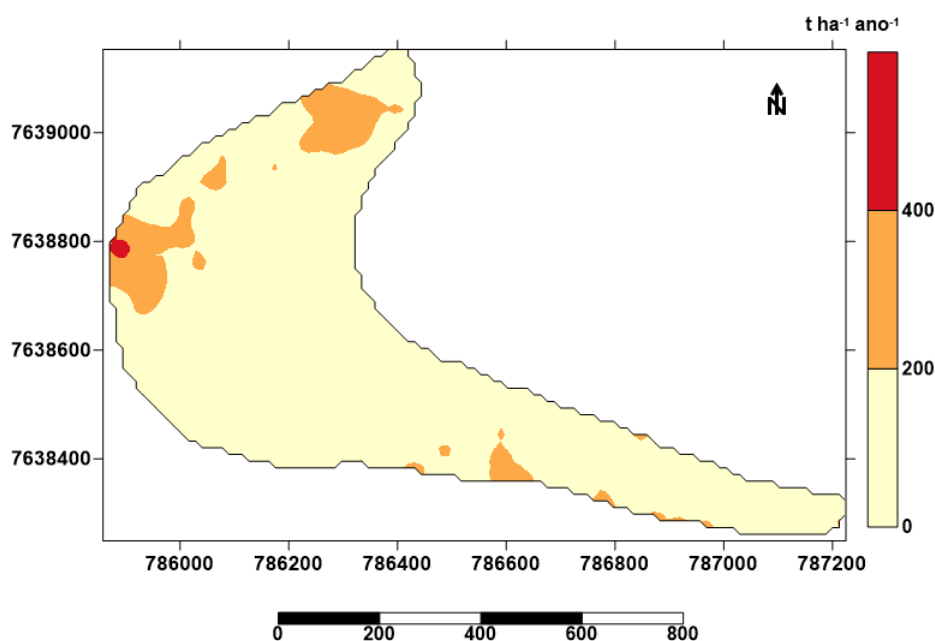


Figura 9. Potencial natural de erosão (PNE) na Fazenda São Bento.

O PNE pode ser considerado fraco em 99,7% e moderado em 0,3% da área da fazenda São Bento, com base em critério apresentado por Perusi et al., (2022).

Logo, a combinação de fatores naturais de erosão $R \times K \times LS$, na Fazenda São Bento, não é preocupante, mesmo com valores expressivos de erosividade (Figura 6).

A combinação dos fatores naturais erosividade (R), erodibilidade (K) e o LS não é uma preocupação significativa na Fazenda São Bento, mesmo quando há valores expressivos de Erosividade, acima de $7000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, conforme evidenciado na Figura 6. Isso demonstra que a conservação do solo na fazenda será, provavelmente, facilitada devido às condições naturais presentes.

Por exemplo, embora a erosividade (K) possa ter valores mais altos, os fatores de erodibilidade (R) e o Fator LS podem compensar esse impacto. Se os valores de R indicarem que o solo tem resistência à erosão e o Fator LS refletir uma topografia favorável, a combinação global desses fatores pode resultar em um PNE geralmente baixo. A fazenda se beneficia das características naturais do terreno, facilitando a implementação de práticas eficazes de conservação do solo e da água, promovendo assim a preservação e a gestão consciente dos recursos naturais.

4.5 Fator cobertura vegetal e manejo do solo (C)

Este fator reflete o efeito da cobertura vegetal e das práticas de manejo do solo na redução da erosão. Áreas com boa cobertura vegetal e práticas de manejo adequadas têm valores de C mais altos, indicando menor potencial erosivo.

Para os três sistemas de cobertura vegetal e manejo do solo avaliados os valores estabelecidos foram: 1) OAC, $C = 0,115$ - operações agrícolas realizadas em contorno; 2) OAC + MRSPC, $C = 0,069$ - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada; 3) OAC + MRSPC + CT, $C = 0,024$ - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada + controle de tráfego.

Quanto menor o valor do fator C, maior será o controle da erosão. Esses resultados reforçam a ideia de que a implementação conjunta de práticas específicas resulta em um aumento expressivo na eficiência do controle da erosão, contribuindo para a sustentabilidade e preservação dos recursos avaliados.

Em resumo, a progressiva melhoria nos valores de C em cada cenário reflete a eficácia cumulativa das práticas adotadas, destacando a importância de uma abordagem integrada para o manejo do solo e controle da erosão.

4.6 Fator práticas conservacionistas (P)

O fator P considera a eficácia das práticas de conservação do solo em reduzir a erosão. Práticas conservacionistas como terraceamento, cobertura do solo por resíduos vegetais e rotação de culturas podem aumentar o valor de P, indicando uma menor taxa de perda de solo.

Os valores do fator P foram estabelecidos, como proposto por Wishmeier e Smith (1978), considerando cultivo em contorno. A distribuição espacial dos valores do fator P é apresentada na Figura 10. Os resultados demonstram que o Fator P na Fazenda São Bento varia no intervalo 0,50 a 0,71, os quais são concordantes com resultados apresentados por Panagos et al., (2015).

Valores típicos do fator P variam de 0,2 para cultivos e terraceamento em contorno até 1,0 quando não há práticas de controle de erosão (Panagos et al., 2015). A efetividade da condição de cultivo em contorno foi considerada, para se obter P no presente trabalho, que o mesmo foi dependente da declividade do terreno.

A variação nos valores desse fator, na Fazenda São Bento, reflete a implementação eficaz de práticas conservacionistas, especialmente aquelas relacionadas a cultivos em contorno. Ao correlacionarmos os resultados do Fator P com os fatores previamente mencionados (R, K, LS e C), podemos perceber a sinergia entre essas variáveis.

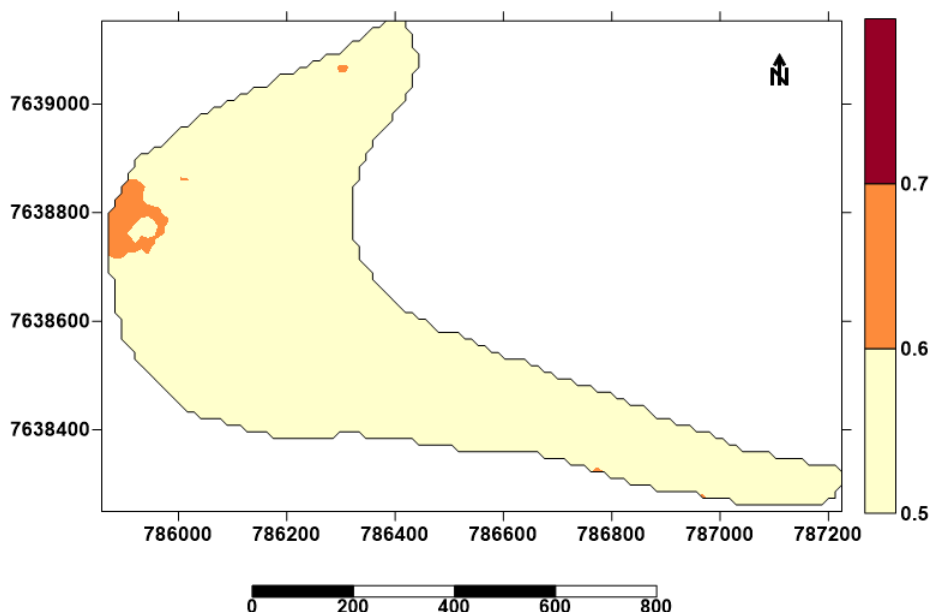


Figura 10. Fator práticas conservacionistas (P) na Fazenda São Bento.

Valores mais baixos de P, combinados com valores otimizados de R, K, LS e C (como discutido nos cenários anteriores), contribuem para uma abordagem holística e eficaz na conservação do solo.

Essa combinação estratégica de práticas conservacionistas, aliada à compreensão da variação espacial do Fator P, fortalece ainda mais a sustentabilidade do manejo de terras na fazenda São Bento, proporcionando resultados positivos na preservação do solo e na redução da erosão.

4.7 Expectativa de perdas de solo por erosão hídrica

As expectativas de perdas médias anuais de solo por erosão (A), considerando-se a interferência antrópica na Fazenda São Bento, quanto aos três sistemas de cobertura vegetal e manejo do solo (Fator C) e, ainda, as práticas conservacionistas ou de suporte (Fator P), podem ser observadas nas Figuras 11a, 11b e 11c.

Na Figura 11a 61,4% da tem $A \leq T$, ou seja, apresenta expectativa de erosão igual ou inferior à tolerância que é $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Já em 34,6%, 3,5% e 0,5% da há

expectativa de erosão 10 a 20 t ha⁻¹ ano⁻¹, 20 a 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ e > 40 t ha⁻¹ ano⁻¹, o que permite identificar zonas específicas de manejo, nas quais há necessidade de outras práticas adicionais de controle da erosão, que não só o cultivo com operações agrícolas em contorno, como sugerido por Wischmeier e Smith (1978).

Tais valores permitiram identificar zonas específicas de manejo, nas quais há necessidade de implementação de práticas conservacionistas adicionais. Essa identificação de zonas específicas com maiores expectativas de erosão indica a necessidade da adoção de novas estratégias de manejo do solo, que requerem atenção adicional e intervenções específicas para mitigar as perdas de solo.

Quando se considerou para a Fazenda São Bento operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada, ou seja, com o incremento de outra prática de conservação do solo e da água, as expectativas de erosão foram reduzidas (Figura 11b). Em 91,6% da área, há expectativas de $A \leq T$ (0 a 10 t ha⁻¹ ano⁻¹). Já em 8,1% e 0,3% da Fazenda São Bento há expectativas de erosão de 10 a 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ e > 20 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Essa redução nas expectativas de erosão está diretamente relacionada à implementação bem-sucedida dos sistemas de cobertura vegetal, manejo do solo e práticas conservacionistas.

Já no caso da adoção do sistema mais atual de cultivo da cultura da cana-de-açúcar, com operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada + controle de tráfego (OAC + MRSPC + CT), há em 100% da Fazenda São Bento uma expectativa de erosão abaixo do tolerável de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 11c).

Os valores de expectativa de erosão, principalmente os apresentados na Figura 11a, são compatíveis com valores observados na Mesorregião de Ribeirão Preto – SP visto que representa o sistema de manejo mais comumente empregado na região.

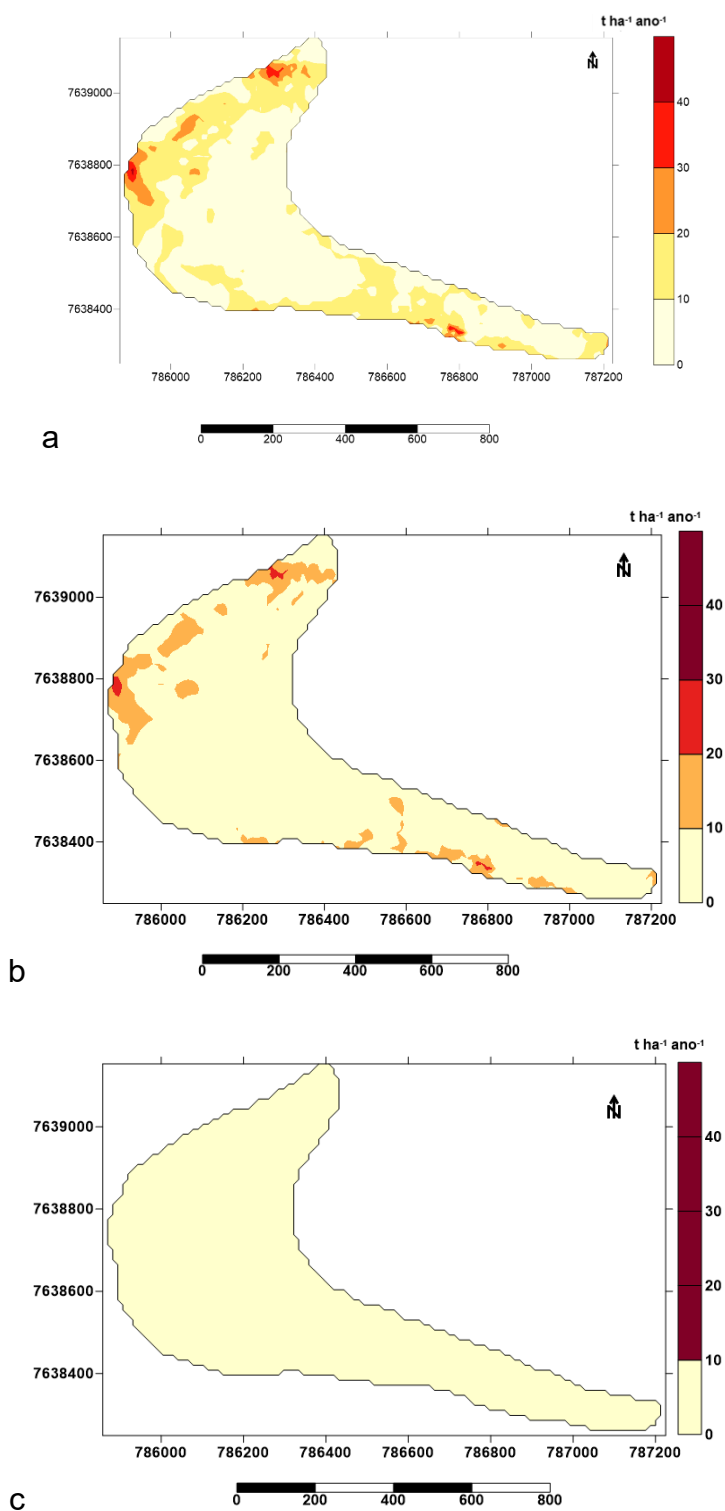


Figura 11. Perda de solo por erosão na Fazenda São Bento: a) OAC - operações agrícolas em contorno; b) OAC + MRSPC - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada; c) OAC + MRSPC + CT - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada + controle de tráfego.

Em 38,6% da Fazenda São Bento (Figura 11a), a expectativa de erosão é superior a $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o que corrobora resultados de Rodrigues et al. (2015) que estimaram que ao redor de 40% da área da Mesorregião de Ribeirão Preto – SP tem estimativas de perdas de solo por erosão superiores a $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Em comparação com os outros cenários, a combinação de OAC + MRSPC + CT demonstra uma eficiência superior na preservação do solo, indicando um controle extremamente eficaz das perdas de solo por erosão.

Na Fazenda São Bento, Izidório et al. (2005) obtiveram perdas médias de solo por erosão de $19,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ com chuva artificial, o que é compatível com os valores estimados no presente trabalho (Figura 11a).

Num Latossolo Vermelho eutroférico textura muito argilosa, Marcari (2010) demonstrou na fase de reforma do canavial, em condições de chuva artificial, que o sistema de OAC + MRSPC + CT apresentou perdas em relação ao OAC 100 vezes menor, ou seja, $4,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ contra $0,045 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, demonstrando a eficiência deste sistema de manejo.

No estado de São Paulo, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, Corrêa et al. (2018) obtiveram perdas da ordem de $12,30 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em área cultivada com cana-de-açúcar. Num cambissolo háplico, perdas de solo por erosão de $49,04$ e $84,85 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em duas parcelas cultivadas com cana-de-açúcar, foram obtidas por Corrêa et al., (2018). Valores como estes podem ser considerados de moderados a muito altos, quando comparados com o valor tolerável de erosão de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ estimado no presente trabalho, o qual, segundo Morgan (1998), é o limite anual de perdas de solo para uso sustentável das terras agrícolas. Perdas superiores a $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ não podem ser repostas ou revertidas num período de 50 a 100 anos (Yesuph e Dagneu, 2019).

Os resultados apresentados nas Figuras 11a a 11c demonstram que estimativas de erosão por modelos de predição, como a RUSLE, são importantes, para decisões de planejamento na aplicação e uso de práticas de conservação do solo e da água. É preciso considerar que o solo é um recurso finito, limitado e não renovável, o qual deve ser o princípio de políticas de utilização deste recurso natural (Rodrigues et al., 2015).

Vale ressaltar a eficiência máxima do sistema e reforçar de maneira impactante a relevância das predições de modelos, como a RUSLE, para orientar decisões de planejamento e conservação do solo. Essas previsões não apenas fornecem entendimentos cruciais, mas também apontam diretamente para soluções práticas que podem revolucionar a sustentabilidade do manejo de terras.

A implementação de práticas avançadas, representadas pelo sistema OAC + MRSPC + CT, não apenas atinge, mas supera as expectativas na conservação do solo, sublinhando a importância de investir em estratégias inovadoras e baseadas em modelos preditivos para enfrentar desafios ambientais complexos.

4.8 Perdas de matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica

O efeito dos manejos sobre as perdas de solo, concentrações de matéria orgânica e nutrientes no sedimento erodido são exibidos na tabela 3. O manejo operações agrícolas em contorno (OAC), apresenta-se como o manejo menos eficiente, em controlar as perdas de nutrientes e matéria orgânica no sedimento devido aos valores expressivos para todos os elementos, sendo respectivamente $P > MO > A > Ca > Mg$, quando comparado aos demais manejos estudados.

O transporte de nutrientes e do solo através do escoamento superficial representa um risco não somente para a produção agrícola, mas ambiental e também para a saúde humana (Blanco e Villarroya, 2002). Os processos de transporte de nutrientes e erosão hídrica são acompanhados pela degradação do solo e esgotamento do solo (Lu et al., 2004; Sadegh, 2023).

Tabela 3. Perdas de solo, concentrações de matéria orgânica e nutrientes no sedimento erodido.

Manejos	A	MO	P	K	Ca	Mg
	t ha ⁻¹ ano ⁻¹	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----		
OAC	8,925 a	11,488 a	21,489 a	1,504 a	6,613 a	2,796 a
OAC + MRSPC	5,355 b	8,059 b	16,167 b	1,208 b	3,933 b	1,697 b
OAC + MRSPC + CT	1,862 c	3,871 c	8,978 c	0,769 c	1,343 c	0,604 c

OAC - operações agrícolas em contorno; 2) OAC + MRSPC - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada; 3) OAC + MRSPC + CT, em que CT é o controle de tráfego. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

Assim, a perda de nutrientes do solo causada pela erosão do solo tornar-se uma preocupação e está a estimular novas abordagens ao controle da poluição e à gestão dos ecossistemas (Sadeghi et al., 2017). Na mesma linha, a perda de nutrientes e matéria orgânica, é tida como uma das principais características da degradação do solo, podendo aumentar o declínio na produtividade da área e nos valores investidos com adubação e correção do solo (Haregeweyn et al., 2017; Samsom et.al, 2017; Alabi et al., 2021).

Quando combinadas às operações agrícolas em contorno com o manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada, isto resultou em mudanças significativas na quantidade de nutrientes e matéria orgânica no sedimento erodido (Tabela 3).

A cobertura vegetal ajuda a controlar a erosão e a perda de nutrientes e matéria orgânica, pois intercepta as gotas das chuvas e o escoamento superficial, aumentando e melhorando as características físico-químicas do solo, o que, pois reduz a velocidade do escoamento superficial, sedimentos e perda de nutrientes (Mohammad e Adam, 2010).

Martínez-Mena et al., (2002) em uma investigação sobre os efeitos da erosão do solo nas Montanhas Azuis da Jamaica, indicou que a falta de cobertura vegetal no solo, levou a um declínio de 31% na MO, um declínio de 38% no N total, um declínio de 47% em K trocável, declínio de 43% em Ca e declínio de 56% em Mg em

cinco anos. Kothyari et al., (2004) ao monitorarem mensalmente o escoamento superficial, a perda de solo e a perda de nutrientes em parcelas experimentais com diferentes coberturas de solo na bacia hidrográfica. Descobriram que a perda de matéria orgânica e nutrientes era mínima em parcelas aonde existiam coberturas totais do solo.

O manejo OAC + MRSPC + CT ressalta a importância da combinação entre os manejos para obter perdas menos alarmantes de nutrientes e matéria orgânica dentro da área de cultivo (Tabela 3). A falta de manejos combinados do solo influenciam negativamente os recursos do solo e hídricos, pois, através da remoção seletiva e transporte de nutrientes, os quais podem ter efeitos adversos na qualidade do solo refletindo na produtividade das áreas agrícolas, como apontado em algumas outras partes do mundo (Kothyari et al., 2004).

As concentrações de nutrientes nos sedimentos erodidos são geralmente mais elevadas do que em áreas originais (Sadeghi, 2023). Essa diferença é caracterizada pela razão de enriquecimento de nutrientes (ER), (Martinez-Mena et al., 2002; Zhu et.al, 2011).

4.9 Taxa de enriquecimento do sedimento erodido

Os manejos não propiciaram taxas de enriquecimento (ER) do sedimento erodido superiores a 1 ($ER > 1$) por MO, P, K, Ca e Mg (Tabela 4). As ER diferiram significativamente entre os manejos na seguinte ordem: OAC > OAC + MRSPC > OAC + MRSPC + CT (Tabela 4).

A taxa de enriquecimento (ER) representa um valor numérico, o qual é resultante da relação entre o conteúdo de um determinado elemento químico nos sedimentos da erosão e o conteúdo no solo antes de ser erodido (Langdale e Lowrance, 1984; Bagio et al., 2017). Quando há o enriquecimento com MO e nutrientes, este fato é atribuído em parte aos sedimentos transportados pela enxurrada de pequeno diâmetro e/ou baixa densidade (argila e matéria orgânica) em relação ao tamanho e/ou densidade dos sedimentos que permanecem no solo (silte

e areia) no local erodido, ou seja, há uma seletividade com a ocorrência do fenômeno de erosão (Bagio et al., 2017).

Tabela 4. Taxas de enriquecimento do sedimento erodido por matéria orgânica e nutrientes.

Manejos	ER _{MO}	ER _P	ER _K	ER _{Ca}	ER _{Mg}
OAC	0.42 a	0.84 a	0.35 a	0.18 a	0.24 a
OAC + MRSPC	0.29 b	0.63 b	0.29 b	0.11 b	0.14 b
OAC + MRSPC + CT	0.14 c	0.35 c	0.19 c	0.04 c	0.05 c

OAC - operações agrícolas em contorno; 2) OAC + MRSPC - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada; 3) OAC + MRSPC + CT, em que CT é o controle de tráfego; ER – taxa de enriquecimento. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

A $ER > 1$ para MO e nutrientes é um indicador do potencial de contaminação que a erosão tem nos ambientes de deposição. Ela pode, portanto, ser utilizada na identificação de fontes de poluição. Apesar dessa importância, há poucos estudos realizados no Brasil visando determinar a ER de nutrientes em áreas agrícolas (Barbosa et al., 2021; Bagio et al., 2017).

Quando $ER < 1$ não há enriquecimento do sedimento erodido, ou seja, o solo não está ficando empobrecido por MO, P, K, Ca e Mg (Tabela 4), o que indica que os manejos OAC, OAC + MRSPC e OAC + MRSPC + CT permitem boa conservação do solo quanto a perdas de MO e nutrientes por erosão. Ressalta-se aqui que, em média, o manejo OAC propiciou perdas de solo por erosão acima do tolerável de $8,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, indicando que tal manejo careceria de ajustes para ser uma prática eficiente para a conservação do solo e da água. O contrário se verificou com os manejos OAC + MRSPC e OAC + MRSPC + CT (Tabela 4).

No sistema de manejo OAC, na fase de preparo do solo, Izidorio et al. (2005), determinou, na mesma área experimental do presente trabalho, com chuva simulada de 80 mmh^{-1} aplicada por 65 minutos, taxas de enriquecimento para MO, P, K, Ca e Mg da ordem de 1,62, 3,87, 0,73, 1,27 e 1,24, respectivamente. Os resultados da Tabela 4 refletem perdas médias ao longo de um ano agrícola, não especificamente de uma fase, como analisado por Izidorio et al., (2005). Talvez aqui fique uma

grande evidência: há fases do ano agrícola sensíveis aos processos erosivos e com chuvas mais críticas, portanto, que podem ser altamente impactantes ao meio ambiente.

Uma explicação para as ER observadas (Tabela 4) é que ao longo do ano agrícola, no cultivo da cana-de-açúcar, o solo vai obtendo maior proteção com o desenvolvimento da cultura e produção de palhada que o protege da ação direta e erosiva das gotas da água da chuva.

Solos descobertos, a remoção de agregados pela desagregação imposta pelas gotas de chuva e, ainda, pela ação da enxurrada constituem um mecanismo de transporte preferencial de partículas finas, com altas concentrações de carbono orgânico e nutrientes, resultando em sedimentos enriquecidos com MO, P, K, Ca e Mg como observado por vários pesquisadores (Izidorio et al., 2005; Martins Filho et al., 2009; Silva et al., 2020).

Os resultados do presente trabalho também evidenciam algumas das limitações do emprego da RUSLE, o fato dela permitir análises em termos médios anuais para eventos de chuvas erosivas e não para eventos críticos individuais em termos de processos erosivos do solo.

Solos com alta resistência à erosão (K), menor erosividade (R), e topografia favorável (LS) contribuem significativamente para a redução das taxas de enriquecimento por MO e nutrientes.

Embora os resultados sejam promissores, a complexidade do solo e a variabilidade das práticas agrícolas sugerem a necessidade de abordagens complementares.

Este estudo reforça que o controle eficaz do enriquecimento nos sedimentos erodidos erosivos depende da compreensão profunda e integrada dos fatores que influenciam o processo erosivo.

4.10 Efeitos de fertilizantes e corretivos no sedimento erodido

As concentrações dos fertilizantes e corretivos presentes no sedimento erodido diferiram significativamente entre os manejos (Tabela 5). A incorporação de manejos com maior complexidade dentro na Fazenda São Bento exhibe maior possibilidade de eficácia nas decisões tomadas.

Tabela 5. Concentrações médias em termos de fertilizantes minerais e corretivos do solo presentes no sedimento erodido.

Manejos	P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	K ₂ O kg ha ⁻¹	CaO kg ha ⁻¹	MgO kg ha ⁻¹
OAC	98,48 a	141,65 a	371,07 a	113,27 a
OAC + MRSPC	74,09 b	113,82 b	220,68 b	68,75 b
OAC + MRSPC + CT	41,14 c	72,42 c	75,37 c	24,49 c

OAC - operações agrícolas em contorno; 2) OAC + MRSPC - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada; 3) OAC + MRSPC + CT, em que CT é o controle de tráfego. P₂O₅ - pentóxido de difósforo; K₂O - óxido de Potássio, CaO - óxido de cálcio; MgO - óxido de magnésio. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

O efeito somatório das OAC + MRSPC + CT proporciona queda significativa na perda de 2,5 a 5 vezes menor para os fertilizantes e corretivos aplicados na Fazenda São Bento, quando comparado aos demais manejos OAC e OAC + MRSPC. Este efeito já era o esperado, pois quanto maior o número de práticas conservacionistas adotadas numa mesma área, menos ela sofrerá com danos e exposição à erosão hídrica, o que reduz o transporte dos sedimentos, pois o solo estará protegido das ações que contribuem com a sua degradação.

Cerca de 20% dos solos agrícolas são afetados intensamente pela erosão, resultando na redução da fertilidade do solo, da produtividade das culturas e da segurança alimentar (Prăvălie et al., 2021). Isto é causado não apenas pela transferência de matéria orgânica e nutrientes do solo, mas também pela formação de padrões de pequena escala dentro das áreas de cultivo que diferem muito umas das outras devido à erosão do solo e/ou deposição dos sedimentos (Vaidya et al., 2023).

A baixa fertilidade do solo em terras agrícolas erodidas pode ser exacerbada pelas operações de preparo do solo (Berhe et al., 2018; Doetterl et al., 2016; Nie et al., 2019).

Para Rodrigues et al. (2022), ao estudarem Latossolos, a quantidade de fertilizantes requeridos na reposição de nutrientes perdidos por erosão, em uma estimativa média de perda de solo, os valores de fertilizantes podem variar de 0,16 t para o fosfato simples até 11,87 t para o calcário dolomítico. Outras classes, como lavoura perene e temporária, ganham destaque pela requisição de fertilizantes, variando de 0,01 t para fosfato simples e 1,37 t para calcário dolomítico.

Autores como Amado et al. (1998) e Bertol e Almeida (2000) demonstraram e comprovaram que um solo com aproximadamente 20% de sua superfície coberta pode reduzir em até 60% as perdas por erosão, em comparação às perdas de um solo descoberto. A manutenção da palhada da cana-de-açúcar na superfície do solo contribui efetivamente para o controle da erosão hídrica, conforme mencionaram Thompson et al. (2001) e Bezerra e Cantalice (2006).

Seitz et al., (2019) ao avaliarem as perdas de fertilizantes e corretivos em área de cultivo de cana-de-açúcar mecanizada, obtiveram perdas para cálcio e magnésio (Ca + Mg) igual a 95,60 t ano⁻¹ sendo este valor pelo menos 15 vezes superior às perdas de fósforo 2,66 t ano⁻¹ e potássio 10,13 t ano⁻¹. Estes resultados ressaltam não somente os danos e prejuízos econômicos causados pela erosão do solo, como a perdas acentuadas de nutrientes, contudo em especial a necessidade de reposição, a fim de evitar a redução da produção e produtividade das culturas, diminuição da renda do produtor e possível esgotamento do solo.

Os resultados apontam para a necessidade de avaliação contínua dos impactos dos manejos na fertilidade do solo e na perda de nutrientes. Decisões futuras de manejo devem considerar a eficácia dessas práticas na redução da erosão e na preservação dos recursos do solo. Essas certezas ajudam a orientar escolhas práticas de manejo, enfatizando a importância de estratégias conservacionistas para garantir a sustentabilidade a longo prazo da produção agrícola na Fazenda São Bento.

4.11 Implicações da perda de fertilizantes e corretivos

A valoração das perdas de nutrientes do solo por erosão é necessária, pois é importante precificar o volume de fertilizantes e corretivos perdidos por erosão, bem como considerar os custos embutidos na depreciação do solo. Seguindo esta linha de raciocínio, são apresentados os custos de forma dinâmica para evidenciar as perdas destes nutrientes na Fazenda São Bento (Tabela 6).

Tabela 6. Perdas médias por erosão hídrica de fertilizantes e seus custos relativos.

Fertilizantes / Corretivos	Perdas (kg ha ⁻¹) por manejos			Custos das perdas (US\$ ha ⁻¹) por manejos		
	OAC	OAC+ MRSPC	OAC+ MRSPC+ CT	OAC	OAC+ MRSPC	OAC+ MRSPC+ CT
Super simples (SS)	492,4	370,4	205,7	4,546.53	3,417.06	1,899.28
Cloreto de potássio (KCl)	236,1	189,7	120,7	1,677.18	1,383.15	880.14
Calcário Dolomítico (Ca)*	1236,9	735,6	251,2	210.92	125.38	42.77
Calcário Dolomítico (Mg)*	566,4	343,8	122,5	64.64	38.88	14.09
Total	-	-	-	6,499.27	4,964.47	2,836.28

OAC - operações agrícolas em contorno; OAC + MRSPC - operações agrícolas em contorno + manejo dos resíduos em superfície no pós-colheita mecanizada; OAC + MRSPC + CT, em que CT é o controle de tráfego. * Calcário com 30% de CaO e 20% de MgO. Custo do SS, KCl e calcário dolomítico em tonelada, na data de 07/11/2023: US\$9,234.00; US\$12,150.00; US\$568.62, respectivamente. Levando em consideração o dólar UU\$ 4.86 na mesma data.

As perdas de fertilizantes e corretivos na Fazenda São Bento ocorreram de formas distintas, conforme o manejo associado. Quando avaliada a perda de SS, o manejo OAC + MRSPC e OAC + MRSPC + CT permitiram uma economia de aproximadamente 122 e 287 kg ha⁻¹, respectivamente em comparação ao manejo

OAC. Isso representa uma economia de 25% e 58% ao associar as práticas em vez do manejo OAC (Tabela 6).

Quando avaliada a perda de KCl, o manejo OAC apresenta maior perda deste fertilizante em comparação ao manejo OAC + MRSPC (46,4 kg ha⁻¹) e ao manejo OAC + MRSPC + CT (115,4 kg ha⁻¹). Tais perdas representam um aumento de 20% em comparação ao manejo OAC + MRSPC e 49% em comparação ao manejo OAC + MRSPC + CT, quando a prática operações agrícolas em contorno é implementada (Tabela 6).

A perda de Ca quando aplicado calcário dolomítico é menor com o manejo OAC + MRSPC + CT. Em comparação ao manejo OAC, há redução de 80% dos custos quando o manejo OAC + MRSPC + CT é implementado (Tabela 6). Já para a perda de Mg, o manejo OAC apresentou perda de 443,9 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico e custos 78% maior, se comparado à utilização do manejo OAC + MRSPC + CT.

Numa análise geral da área de estudo, que compreende 40 hectares, observou-se que o manejo OAC acarretou a perda de 8,925 t ha⁻¹ ano⁻¹ de solo, o manejo OAC + MRSPC 5,355 t ha⁻¹ ano⁻¹ e o manejo OAC + MRSPC + CT 1,862 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 3). Esses valores permitiram estimar para a área total de 40 ha que o manejo OAC resultou em uma perda total de solo de 375,00 t ano⁻¹, o manejo OAC + MRSPC numa perda total de 214,2 t ano⁻¹ e o manejo OAC + MRSPC + CT apresentou uma perda total de 74,48 t ano⁻¹.

As perdas de fertilizante e corretivos foram respectivamente de 2,5318 t ha⁻¹ ano⁻¹ para o manejo OAC, perda de 1,6395 t ha⁻¹ ano⁻¹ manejo OAC + MRSPC e de 0,7001 t ha⁻¹ ano⁻¹ para o manejo OAC + MRSPC + CT. Ao considerar a área total, os custos relacionados às perdas de fertilizantes e corretivos foram aproximadamente US\$ 272,969.34 para o manejo OAC, U\$ 208,507.74 para o manejo OAC + MRSPC e U\$ 119,123.76 para o manejo OAC + MRSPC + CT.

Com base nessas análises, é possível inferir que a adoção das práticas de manejo estudadas, como o manejo OAC + MRSPC e o manejo OAC + MRSPC + CT em relação ao manejo OAC, desempenharam um papel significativo na prevenção de perdas substanciais de solo, fertilizantes e corretivos. Esses resultados indicam que a combinação de práticas conservacionistas e manejos da cobertura vegetal,

podem contribuir para a conservação desses recursos importantes, destacando a eficácia das estratégias adotadas nos manejos OAC + MRSPC e OAC + MRSPC + CT.

A quantidade perdida de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) é maior em áreas que realizam apenas uma prática de manejo relativa à conservação do solo e da água. A combinação de práticas conservacionistas, as quais resultaram nos manejos OAC e OAC + MRSPC, possibilitaram o aumento do volume de resíduos sobre o solo, proporcionando um menor potencial de arraste de sedimentos.

A permanência do resíduo vegetal sobre o solo reduz a energia cinética do transporte de sedimentos pela enxurrada, formando uma barreira física, dificultando o escoamento superficial e a ruptura dos agregados do solo (Carvalho et al., 2009). Aumentando a rugosidade da superfície do solo, reduzindo a velocidade da enxurrada e conseqüentemente o volume do escoamento superficial (Ragassi et al., 2013). A combinação dessa prática com o terraceamento agrícola refletiu nas menores perdas de solo e nutrientes por erosão ao empregar os manejos OAC + MRSPC e OAC + MRSPC + CT como apresentado na Tabela 3.

Para implantação da cultura de cana-de-açúcar, Moraes Filho (2022) apresentou os custos em torno de U\$ 44,438.09 por ha, sendo o custo com insumos agrícolas de US\$ 22,970.30 por ha. Nesta perspectiva os insumos referem-se a 50% dos custos finais para produção de um ciclo da cultura. Considerando essa premissa, a análise dos manejos estudados para os 40 ha da Fazenda São Bento indica que o custo total foi de U\$ 259,970.80 em insumos perdidos para o manejo OAC, representando 14,63% do custo de implantação da cultura na Fazenda São Bento (U\$ 1,777,523.60). Para o manejo OAC + MRSPC, o custo com os insumos foi avaliado em U\$ 198,578.80 correspondendo a 11,17% do custo de implantação, enquanto o manejo OAC + MRSPC + CT teve um custo de U\$ 113,451.20, representando 6,38%. Esses dados sugerem que a adoção dos manejos estudados pode influenciar significativamente os custos totais, destacando a variação percentual em relação ao custo total para a produção de cana-de-açúcar.

A valoração da perda de solo surge para atribuir o equilíbrio entre a produtividade e o poder econômico das tomadas de decisões. Já o conhecimento

dos valores com fertilizantes e corretivos deve ser considerado no processo produtivo, servindo como uma estratégia de promover a melhoria da gestão e a conservação do solo e, ao mesmo tempo, propiciando aumento da produtividade (Farley e Costanza, 2010).

É importante destacar que, em todas as classes de solo, a perda de fertilizantes e corretivos não é prevista na maioria dos planejamentos agrícolas das áreas. Neste estudo, a grande vantagem da realização do levantamento dos custos da perda dos insumos agrícolas foi conseguir identificar as áreas mais vulneráveis (Figura 11). Com essas informações, é possível planejar a adoção e associação de práticas conservacionistas e futuros investimentos na tomada de decisão por parte do produtor, principalmente quanto à aplicação de insumos.

O conhecimento desses custos é vital para a tomada de decisões na elaboração e execução de um planejamento agrícola sustentável. Os resultados sugerem que a adoção de práticas conservacionistas não apenas preserva recursos naturais, mas também contribui para a viabilidade econômica da produção agrícola. Quanto maior a intensidade de práticas visando a conservação do solo e da água, menores são as perdas e os custos com nutrientes.

5 CONCLUSÕES

A Fazenda São Bento, dedicada ao cultivo de cana-de-açúcar, é intensamente explorada. O atual sistema de manejo mostra que é possível cultivar toda a área, ao contrário do cultivo das operações agrícolas em contorno, onde apenas 61,4% teriam perdas de solo aceitáveis.

O uso de um modelo de previsão de erosão com um Sistema de Informação Geográfica (SIG) permite entender os fatores de erosão e identificar áreas específicas para conservação do solo e água.

Os processos de transporte de nutrientes e erosão hídrica causam degradação do solo, mas o cultivo de cana-de-açúcar, com seu desenvolvimento e produção de palhada, protege o solo contra erosão.

As práticas combinadas de operações agrícolas de contorno, manejo mecanizado de resíduos após a colheita e controle de tráfego reduzem significativamente as perdas de solo e enriquecimento do sedimento erodido, resultando em até 5 vezes menos perdas de fertilizantes e corretivos na Fazenda São Bento.

A avaliação dos custos relacionados a essas perdas destaca a importância de considerar esses aspectos no planejamento agrícola.

Valorizar as perdas de solo e entender os custos associados aos insumos não apenas revela áreas vulneráveis, mas também permite um planejamento mais eficiente para futuras decisões de manejo e investimentos.

O estudo reforça a importância das práticas conservacionistas na preservação do solo e destaca a relevância de integrar considerações econômicas na gestão sustentável da agricultura.

A combinação de práticas eficazes não só melhora a produtividade, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental e econômica a longo prazo.

6 REFERÊNCIAS

- Adimassu Z, Langan S, Johnston R, Mekuria W, Amede T (2017) Impacts of Soil and Water Conservation Practices on Crop Yield, Run-off, Soil Loss and Nutrient Loss in Ethiopia: Review and Synthesis. *Environmental Management* 59:87–101.
- Alabi KO (2021) “Effect of Slope Positions on Properties of Soils of some Forest reserves in South-West Nigeria”, *Nigerian Journal of Soil Science*, 18–24. doi: 10.36265/njss.2021.310303.
- Alberts EE, Moldanauer WC (1981) Nitrogen and phosphorus transported by eroded soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*. 45:391-396.
- Amado TJC, Fernandez SB, Mielniczuk J (1998). Nitrogen availability as affected by ten years of cover crop and tillage systems in southern Brazil. *Journal of soil and water conservation*. 53:268-271.
- Amaral AJ do (2006) Fator cobertura e manejo da equação universal de perda de solo para soja e trigo em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de manejo [dissertação]. Lages. Univeridade do estado de Santa Catarina Centro de Ciência agroveterinárias.
- Amorim FF, da Silva YJAB, Nascimento RC, da Silva YJAB, Tiecher T, do Nascimento CWA, Collins AL (2021). Sediment source distribution using composite optical property signatures in a rural watershed, Brazil. *Catena*, 202:105208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105208>.
- Amorim FR de (2019) A competitividade dos sistemas de preparo do solo e plantio de cana-de-açúcar: uma análise dos sistemas utilizados por fornecedores e usinas no Estado de São Paulo. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Unicamp, Campinas.
- Azevedo Junior WC, Santana AC (2022). O produto interno bruto do Brasil ajustado pela depreciação do solo agrícola. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60:1–29, doi.org/10.1590/1806-9479.2021.228505.
- Bagio B, Bertol I, Wolschick NH, Schneiders D, Santos MADND (2017). Water erosion in different slope lengths on bare soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41:1-15.
- Blanco, M., Villarroya, I., (2002). NIR spectroscopy: a rapid-response analytical tool. *Trends Anal. Chem.* 21 (4), 240–250.
- Barbosa LC, Magalhães PSG, Bordonal RO, Cherubin MR, Castioni GA, Rossi Neto J, Carvalho JLN (2021). Canteiro sulcado e não traficado mantém a qualidade física do solo em lavouras mecanizadas de cana-de-açúcar. *Jornal Europeu de Ciência do Solo*, 72:2150-2164. <https://doi.org/10.1111/ejss.13107>.

Barrows HL, Kilmer VJ (1963) Plant nutrient losses from soils by water erosion. *Adv. Agron.*, 15:303-316.

Bayer C, Mielniczuk J, Martin-Neto L (2000) Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 24:599-607.

Berhe AA, Barnes RT, Six J, Marín-Spiotta E (2018). Role of soil erosion in biogeochemical cycling of essential elements: carbon, nitrogen, and phosphorus. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 46, 521-548. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-082517-010018>.

Bernardi AC de C (2022). Tecnologias aumentam eficiência do uso de nutrientes no campo. Brasília - DF Available from: URL. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/76221949/artigo-tecnologias-aumentam-eficiencia-do-uso-de-nutrientes-no-campo>.

Bertol I, Almeida JA, (2000) Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 24, 657–668. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832000000300018>.

Bertol I, González AP, Vázquez EV (2007) Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 42:103110.

Bertoni J, Lombardi Neto F (2010). *Conservação do solo*. 7. ed. São Paulo: Editora Ícone.

Bertoni J, Lombardi Neto F (1990) *Conservação do Solo*. 3ª edição, São Paulo; Ícone Editora.

Bertoni J, Lombardi Neto F (1993) *Conservação do Solo*. 3ª edição, São Paulo: Ícone Editora.

Bertol I, Mello EM Guadagnin JC, Zapparoli ALV, Carrafa MR (2003). Nutrient losses by water erosion. *Scientia Agricola* 60: 581-586.

Bezerra AS, Cantalice JRB (2006). Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:565-573. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300016>

Bispo DFA, Silva MLN, Marques JJGdeSeM, Bechmann M, Batista PVG, Curi N (2017) Phosphorus transfer at a small catchment in southeastern Brazil: distributed modelling in different land use scenarios. *Ciência e Agrotecnologia*. 41:565–579.

Bolonhezi D (2019) Manejo e conservação do solo em cana-de-açúcar. *Manejo e Conservação Do Solo e Da Água*, 1029-1080.

Bordonal R de O, Carvalho JLN, Lal R, de Figueiredo EB, de Oliveira BG, La Scala N (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 38:13. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>

Canisares LP, Cherubin MR, Da Silva LFS, Franco ALC, Cooper M, Mooney SJ, Cerri CEP (2020) Soil microstructure alterations induced by land use change for sugarcane expansion in Brazil. *Soil Use and Management*. 36:189–199.

Cardoso EL, Silva MLN, Silva CA, Curi N, De Freitas DAF (2010) Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 45:1028–1035.

Carneiro LF, Oliveira RAD, Weber H, Daros E, Berton GS, Rodrigues FV (2020). Produção alternativa de cana-de-açúcar para conservação de solos arenosos: palha de cana, consórcio e nitrogênio. *Ciência e Agrotecnologia*, 44. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044009920>.

Carvalho JLN, Menandro LMS, De Castro SGQ, Cherubin MR, Bordonal RdeO, Barbosa LC, Gonzaga, LC, Tenelli S, Franco HCJ, Kolln OT, Castioni GAF (2019). Multilocation Straw Removal Effects on Sugarcane Yield in South-Central Brazil. *Bioenergy Research*.12:813–829.

Carvalho MAR. (2009). Efeito da cobertura do solo e de práticas de controle de erosão nas perdas de água e solo por escoamento superficial. Tese de Doutorado. São Paulo: USP.

Catelan MG, Marques Júnior J, Siqueira DS, Gomes RP, Bahia, ASRDS (2021). Produtividade e qualidade da cana-de-açúcar utilizando a suscetibilidade magnética do solo. *Ciência Agrícola*, 79. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0329>

Cerri CC, Moreira CS, Alves PA, Barrozo Toledo FHR, De Almeida Castigioni B, De Andrade Rodrigues GA, Pellegrino Cerri DG, Pellegrino Cerri CE, Teixeira AA, Candiano CAC, Reis MR, D'Alessandro SC, Turello L (2017). Soil carbon and nitrogen stocks due to land use change in coffee areas at Minas Gerais state. *Coffee Science*. 12:30–41.

Cherubin MR, Bordonal RO, Castioni GA, Guimarães EM, Lisboa IP, Moraes LAA, Menandro LMS, Tenelli S, Cerri CEP, Karlen DL, Carvalho JLN (2021). Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*. 163.

Cogo NP, Moldenhauer WC, Foster GR (1983) Effect of residue cover, tillage-induced roughness, and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 47:1005-1008.

Cogo NP, Streck EV (2003) Surface and subsurface decomposition of a desiccated grass pasture biomass related to erosion and its prediction with RUSLE. *Revista brasileira de ciência do solo*. 27:153-164.

Conab (2023) CONAB. Acomp. safra brasileira de cana-de-açúcar. Boletim da Safra 2023/2024. 2023;11(Segundo levantamento):1–59. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>

Corrêa EA, Moraes IC, Lupinacci CM, Dos Anjos FPS (2018). Influence of sugarcane cultivation on soil losses by water erosion in Inceptisols in São Paulo State. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 19:231–43. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1303>

Correia BL, Alleoni LRF (2011) Conteúdo de carbono e atributos químicos de Latossolo sob cana-de-açúcar colhida com e sem queima. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 46:944-952. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000800022>

Costa FA (2015). Notas sobre uma economia importante, (Super) Verde e (Ancestralmente) inclusiva na Amazônia. In: Azevedo, A.A., Campanili, M., Pereira, C. (Org.). Caminhos para uma agricultura familiar sob bases ecológicas: produzindo com Baixa Emissão de Carbono. Brasília, DF: IPAM. 51-72.

Costa JA de A, Amado TJC, da Silva LS, Santi A, Weber MA (2014) Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*. 44:801–9. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014005000002>.

Da Luz B, Carvalho ML, Borba DA, Schiebelbein BE, Lima RPde, Cherubin MR (2020) Linking soil water changes to soil physical quality in sugarcane expansion areas in Brazil. *Water*, 12:3156. <https://doi.org/10.3390/w12113156>

Damasceno G (2014). Estimativa da erosão na microbacia do Córrego do Gambá no município de Monte Alto, SP. Dissertação (Mestrado em agronomia ciência do solo) 106f .Unesp - Jaboticabal.

de Barros PHB, de Freitas AM. (2023) Combinando Inteligência Artificial e imagens de satélite para a previsão de sinistros agrícolas: Uma nota. *Revista Brasileira de Economia*. 77:1–14. doi:10.5935/0034-7140.20230001

De Maria IC, Lombardi Neto F, Dechen SCF, Castro OM (1994) Fator da equação universal de perdas de solo (EUPS) para a cultura de cana-de-açúcar. *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*. 10:148-149.

De Oliveira GMT da S, De Oliveira ES, De Santana, AC, Santos, DN (2023) O passivo ambiental da perda de nutrientes causado por erosão de solos nos usos múltiplos de uma propriedade rural na Amazônia Oriental. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*.16:7812–7837.

Dechen SCF, Telles TS, Guimarães MdeF, Maria ICde (2015) Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. *Bragantia*, 74:224–233, 2015.

Demattê JA, Safanelli JL, Poppiel RR, Rizzo R, Silvero NEQ, Mendes WDS, Lisboa CJDS (2020). Espectros de superfície da Terra nua como proxy para monitoramento

de recursos do solo. Relatórios científicos , 10:4461. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61408-1>.

Demattê JLI, Demattê JAM (2009). Ambientes de produção como estratégia de manejo na cultura de cana-de-açúcar. *Informações Agrônomicas*. 127:10-18. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.047>.

Denardin JE (1990) Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

Doetterl S, Berhe AA, Nadeu E, Wang Z, Sommer M, Fiener P (2016). Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews*, 154:102-122. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.12.005>.

Donzelli JL, Bertolani FC, Trombeta NdeC, (2018) Chapter 1 - Sugarcane Cultivation: Soil Mapping, Environmental Effects, and New Sugarcane Varieties, Editor(s): Anuj Kumar Chandel, Marcos Henrique Luciano Silveira, *Advances in Sugarcane Biorefinery*, Elsevier, 1-15, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804534-3.00001-X>.

Dos Santos AKB, Popin GV, Gmach MR, Cherubin MR, Neto MS, Cerri CEP (2022) Changes in soil temperature and moisture due to sugarcane straw removal in central-southern Brazil. *Scientia Agricola*. 79:1–12.

Duley FL (1939) Surface factor affecting the rate of intake of water by soils. *Proceedings Soil Science Society of America*. 4:60-64.

Embrapa (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. 5a. Brasília, DF: Embrapa.

Embrapa (2022) Preparo do solo. Autores: Santiago AD - Embrapa Tabuleiros Costeiros e Rossetto R - Consultora Autônoma. [Http://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/preparo-do-solo](http://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/preparo-do-solo).

Embrapa 2018 Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. – Brasília, DF: Embrapa, 2018;214.

Fao - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015) Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy.

Fao (2012). Voluntary guidelines on the responsible governance of tenure of land, fisheries and forests in the context of national food security. FAO rome.

Farley J, Costanza R (2010) Payments for ecosystem services: from local to global. *Ecological economics*, 69: 2060-2068.

Fuentes-Llanillo R, Telles TS, Junior DS, de Melo TR, Friedrich T, Kassam A (2021) Expansão da prática do plantio direto na agricultura de conservação no Brasil. *Pesquisa de Solo e Cultivo*, 208:104877. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104877>

Gee GW, Bauder JW. Análise de Tamanho de Partícula. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry 2017; SP1: 1009-1011 Madison, WI, 1986; 383-411.

Gilles L, Cogo N P, Bissani CA, Bagatini T, Portela JC (2009). Water, soil, organic matter, and nutrient losses by rainfall erosion from an area of native pasture cropped with corn, influenced by tillage methods and fertilization types. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 1427–1440.

Gmach MR, Kaiser K, Cherubin MR, Cerri CEP, Lisboa IP, Vasconcelos ALS, Siqueira-neto M (2020) Respostas do carbono orgânico dissolvido no solo à remoção da palha da cana-de-açúcar. *Uso e Manejo do Solo*, v. 1, pág. 126-137, 2021. <https://doi.org/10.1111/sum.12663>

Gomes, MGS (2019) Perdas de solo, nutrientes e água por erosão eo subfator Cill em Argissolo e Latossolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar 42 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do solo) - Unesp, Jaboticabal.

Guimarães DV, Silva MLN, Beniaich A, Pio R, Gonzaga MIS, Avanzi JC, Bispo DFA, Curi N (2021) Dynamics and losses of soil organic matter and nutrients by water erosion in cover crop management systems in olive groves, in tropical regions. *Soil and Tillage Research* 209 (2021) 104863. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104863>.

Haregeweyn N, Tsunekawa A, Poesen J, Tsubo M, Meshesha DT, Fenta AA, Adgo E (2017). Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. *Science of the Total Environment*, 574:95-108.

Hernani LC, Kurihara CH, Silva WA (1999) Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. *Revista Brasileira de ciência do solo*. 23:145-154.

Izidorio R, Martins Filho MV, Marques Júnior J, Souza ZM de, Pereira GT (2005). Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*. 25:660–70. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162005000300011>.

Khorramdel S, Koochehi A, Mahallati MN, Khorasani R, Ghorbani R (2013) Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil & Tillage Research*. 133:25-31.

Kleinman PJA, Sharpley AN (2003). Effect of broadcast manure on runoff phosphorus concentrations over successive rainfall events. *Journal of Environmental Quality*. 32:1072-1081.

Kochhann RA, Denardin JE (2000) Implantação e manejo do sistema plantio direto. Embrapa Trigo.

Kothyari BP, Verma PK, Joshi BK, Kothyari UC (2004). Rainfall–runoff-soil and nutrient loss relationships for plot size areas of Bhetagad watershed in Central Himalaya, India. *Journal of hydrology*, 293:137-150.

Lail R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*. 1623-1627. <http://doi.org/10.1126/ciencia.1097396>.

Landell MGDA, Prado HD, Vasconcelos ACMD, Perecin D, Rossetto R, Bidoia MAP, Xavier MA (2003) Chemical attributes of the subsoil of Oxisols related to sugarcane productivity. *Scientia Agrícola*, 60, 741-745. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000400020>.

Langdale GW, Lowrance R (1984) Effects of soil erosion on agroecosystems of the humid United States. In: Lowrance, R., Stineer, B. R., and House, G. J., Eds. *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*, John Wiley & Sons, NY: 133–144.

Li Y, Mo Y qi, Are KS, Huang Z, Guo H, Tang C, Abegunrin TP, Qin Z, Kang Z, Wang X (2021). Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: Evidence from hillslope observation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 309. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107289>.

Liu XB, Zhang XY, Wang YX, Sui YY, Zhang SL, Herbert SJ, Ding G (2010). Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China. *Plant, Soil and Environment*. 56:87–97.

Lu Z, Rykhus R, Masterlark T, Dean KG (2004) Mapping recent lava flows at Westdahl Volcano, Alaska, using radar and optical satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 9:345-353.

Macedo A, Crestana S, Vaz CMP (1998) X ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. *Soil Tillage Research*. 49:249-253.

Machado RE, Cardoso TO, Mortene MH (2022). Determinação do coeficiente de escoamento superficial (C) em bacias hidrográficas com base na análise de eventos de precipitação e vazão. *Pesquisa Internacional sobre Conservação do Solo e da Água*, 10:208-216. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.001>

Mannigel AR, E Carvalho MDP, Moreti D, Medeiros LDR (2002). Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum Agronomy*. 24:1335. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374>.

Marcari MA (2010) Perdas de solo, água e nutrientes em três sistemas de preparo de solo em cana-de-açúcar Ribeirão Preto. 00 f. TCC (Bacharel em Agronomia). Centro Universitário Moura Lacerda.

Martínez-Mena M, Alvarez Rogel J, Castillo, V, Albaladejo J (2002). Organic carbon and nitrogen losses influenced by vegetation removal in a semiarid Mediterranean soil. *Biogeochemistry*, 61, 309-321.

Martíni AF, Valani GP, Da Silva LFS, Bolonhezi D, DI Prima S, Cooper M (2021) Long-term trial of tillage systems for sugarcane: Effect on topsoil hydrophysical attributes. *Sustainability (Switzerland)*. 13.

Martins Filho M V., Liccioti TT, Pereira GT, Marques Júnior J, Sanchez RB (2009). Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*. 29:8–18. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000100002>.

McKague k. Eng P (2023) Factsheet. Ministry, Ontario Affairs, Rural. 006:7.

Meena NK, Gautam R, Tiwari, P, Sharma, P (2017). Nutrient losses in soil due to erosion. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry SP1*: 1009-1011

Melland AR, Bosomworth B, Cook FJ, Silburn DM, Eyles M (2022) Impacts of sugarcane (*Saccharum* sp.) soil and fertiliser management practices on nutrients and sediment in plot-scale runoff from simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*. 216:105259. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105259>

Miqueloni DP, Bueno CRP (2011) Análise multivariada e variabilidade espacial na estimativa da erodibilidade de um argissolo vermelho-amarelo. *Revista brasileira e ciencia do solo*. 35:2175–82. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600032>.

Mohammad AG, Adam MA (2010) The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena* 81:97–103.

Moraes Filho LCdeB (2022) Custo de implantação de um hectare de cana-de-açúcar para um produtor de atalaia-al custo de implantação de um hectare de cana-de-açúcar Rio Largo (AL). 32 f. TCC (Bacharel em Agronomia). Universidade Federal de Alagoas.

Moreira MC, Cecílio RA, Pinto F de A de C, Pruski FF (2006) Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de ciência do Solo*. 30:1069–76. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832006000600016>.

Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, Govers G, Poesen JWA, Auerswald K, Chisci G, Torri D, Styczen ME (1998) The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 23:527-544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527).

Muniz Júnior AS (2006) Formas de aplicação e eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados acidulados. São Paulo, Serrana Fertilizantes. Não paginado. (Boletim Informativo).

Nie Xiao-Jun, Zhang He-Bing, SU Yan-Yan (2019) Soil carbon and nitrogen fraction dynamics affected by tillage erosion. *Scientific Reports*, 9:16601. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53077-6>.

Novais J de J. (2021) Modelagem de dados de sensoriamento remoto para o mapeamento digital de solos e índice relativo de umidade dos solos do distrito federal remote. 251 F. Tese (Doutorado em agronomia). Universidade De Brasília Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária.

Novara A, Pisciotta A, Minacapilli M, Maltese A, Capodici F, Cerdà A, Gristina L (2018) The impact of soil erosion on soil fertility and vine vigor. A multidisciplinary approach based on field, laboratory and remote sensing approaches. *Science of the Total Environment*. 6:474–480.

Oliveira JB, Camargo MN, Rossi M, Calderano Filho B (1999). Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. Campinas: Embrapa Solos.

Oliveira LA de (2012) Análise da qualidade de obtenção de classes de solos, no município de Uberlândia/MG, utilizando-se sistema de informação geográfica – sig. *Caminhos de Geografia* 13:113–127.

Panagos P, Borrelli P, Meusburger K (2015) A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences (Switzerland)*. 5:117–26. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>.

Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, YU B, Klik A, Lim KJ, Yang JE, NI J, Miao C, Chattopadhyay N, Sadeghi SH, Hazbavi Z, Zabihi M, Larionov GA, Krasnov SF, Gorobets AV, Levi Y, Erpul G, Birkel C, Hoyos N, Naipal V, Oliveira PTS, Bonilla, C. A, Meddi M, Nel W, AL Dashti H, Boni M, Diodato N, Van Oost K, Nearing M, Ballabio C (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7:1–12.

Paye H de S, de Mello JWV, de Melo SB (2012) Métodos de Análise Multivariada no Estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade para Elementos-Traço em Solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36:1031–1041. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300033>.

Perusi MC, Demarchi JC, Geografia D, Paulista UE, Geografia M, Paulista UE, De F, Doutora P, Paulista UE, Fernanda D, Fernanda D (2022) Determinação do Potencial Natural de Erosão (PNE) e degradação do solo associada a rodovias no município de Ourinhos/SP. 25:357–86 <https://doi.org/10.33081/formacao.v29i54.8934>.

Pinheiro L de S, Cunha CML da. (2011) A importância da geração do fator topográfico (Is) da eups para modelagem erosiva de bacia hidrográfica. *Revista Geográfica da América Central*. 2:1–13.

Portinho JL, Gomes ACC, Koga-Vicente A, Milani FCC, Pentean RB, Manzatto CV, Spinelli-Araujo L, Vicente LE (2021) The pathways influence of agricultural expansion on water quality of fish farming in Ilha Solteira reservoir, São Paulo, Brazil. *Aquaculture*. 536:736405. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736405>.

Prăvălie R, Patriche C, Borrelli P, Panagos P, Roșca B, Dumitrașcu M, Bândoc G (2021). Arable lands under the pressure of multiple land degradation processes. A global perspective. *Environmental Research*, 194:110697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110697>.

Prove BG, Doogan VJ, Truong PNV (1995) Natureza e magnitude da erosão do solo em terras de cana-de-açúcar na costa tropical úmida do nordeste de Queensland. *Jornal Australiano de Agricultura Experimental*, 35:641-649.

Ragassi CF, Pedrosa AW, Favarin JL (2013) Aspectos positivos e riscos no consórcio cafeeiro e braquiária. *Visão Agrícola* 12:29-32.

Raij B van, Andrade JCde, Cantarella H, Quaggio JA (2001). *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*. Campinas, Instituto Agronômico, 285p.

Raij Bvan, Quaggio JA, Cantarella H, Ferreira ME, Lopes AS, Bataglia OC (1987). *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Campinas: Fundação Cargill, 170 p.

Remortel R, Hamilton M, Hickey Robert (2001) Estimating the LS factor for RUSLE the slope length processing of DEM elevation data. *Cartography*. 30: 27-35.

Renard, KG., Foster, GR., Weesies, GA., McCool, DK., Yoder, DC. (1997). *Predicting soil erosion by water - A guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington, US Gov. Print Office, (Agricultural Handbook, 703)

Ricardi AdeM, Lima CGdaR (2021) “Variabilidade Espacial E Temporal Da Erosividade Das Chuvas (Ei 30) No Estado De São Paulo, Brasil”, *Revista Geociências*, 4:965–985.

Robertson GP (1998). *GS+: Geostatistics for the environmental sciences – GS+ User’s Guide*. Plainwell: Gamma Design Software, 152.

Rodrigues G de O, Giarolla A, Sampaio G, Lea KRD (2015). 23. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 25-29:4852–4859.

Rodrigues GdeP, Ferreira R, Resende M, Tôsto SG (2022) Valoração econômica do uso de fertilizantes a partir da perda de solo na área de estudo da bacia hidrográfica do rio Iquiri (Ituxi) em Acrelândia-ac, in: XXX Congresso de Iniciação Científica da Unicamp. p. 1–5.

Sadeghi SH, Jafarpour A, Homae M, Gharemahmudli S (2023) “Controllability of soil loss and runoff using soil microorganisms: A review”, *Ecohydrology and Hydrobiology*. Elsevier B.V., (xxxx). doi: 10.1016/j.ecohyd.2023.11.006.

Sadeghi SHR, Moghadam ES, Darvishan AK (2017). Efeitos de chuvas subsequentes sobre os componentes do escoamento superficial e da erosão do solo em pequenas parcelas tratadas com vinhaça. *Catena*, 138:1-12.

Salomão PEA, Kriebel W, Santos AA Dos, Martins ACE (2020). A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. *Research, Society and Development*. 9:154911870.

Samsom SA, Auanlade A, Alabi O, Alaga AT, Oloko-Oba MO, Ogunyemi S A, Badru RA (2017). Soil erosion vulnerability mapping and implication on vegetation in parts of Oshun River Basin, Nigeria. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 3:82-91.

Santana AC (2022). O agronegócio na perspectiva do crescimento econômico, com inclusão social e sustentabilidade ambiental na Amazônia. Piracanjuba-GO: Editora Conhecimento Livre. Doi: 10.37423/2021.edcl393.

Santos AKB, Popin GV, Gmach MR, Cherubin MR, Siqueira-Neto M, Cerri CEP (2022) Changes in soil temperature and moisture due to sugarcane straw removal in central-southern Brazil. *Scientia Agricola*, v. 79, p. e20200309, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0309>

Santos JYG dos, Montenegro SMGL, Silva RM da, Santos CAG, Quinn NW, Dantas APX, Ribeiro Neto A (2021). Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil. *Catena*. 203: 105308. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105308>

Sartori M, Philippidis G, Ferrari E, Borrelli P, Lugato E, Montanarella L, Panagos (2019) A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. *Land Use Policy*. 86, 299-312, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.014>

Scarpinella, G. D., de Miranda, R. B., Mauad, F. F. (2019). Estimation of erosion in earth roads of sugar cane using universal soil loss equation. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(5), 959–963. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019134567>

Scherr SJ (1999) Soil degradation a Threat to developing-country food security by 2020. Food, agriculture, and the environment discussion paper, international food Policy research institute. Washington, dC.

Schick J, Bertol I, Batistela O, Balbinot Jr AA (2000) Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminoso submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:427-436.

Schwarz RA (1997). Perdas por erosão hídrica em diferentes classes de declividade, sistemas de preparo e níveis de fertilidade do solo na Região das Missões - RS. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul .131 f. Tese (Mestrado).

Seitz S, Goebes P, Puerta VL, Pereira EIP, Wittwer R, Six J, Scholten T (2019) A lavoura de conservação e a agricultura biológica reduzem a erosão do solo. *Agro. Sustentar. Dev.* 39, 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0545-z>.

Silva DCC, Sales JCA, Simonetti VW, Lourenço RW (2020). Análise espacial do custo de reposição de nutrientes do solo em uma bacia hidrográfica. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente.* 13:189-212. DOI:10.17765/2176-9168.2020v13n1p189-212.

Silva GRV da, Souza ZM de, Martins Filho MV, Barbosa RS, Souza GS de.(2012) Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. *Rev Bras Ciênc Solo.* 36:963–70. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300026>.

Sousa GB, Martins Filho MV, Matias SSR (2012) Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba – SP. *Engenharia Agrícola* 32: 490-500.

Souza ZMde, Marques Júnior J, Pereira G T, Moreira LF (2004) Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, 34;1763–1771.

Souza ZMde, Martins Filho MV, Marques Júnior J, Pereira GT (2005) Variabilidade espacial de fatores de erosão em latossolo vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Engenharia Rural.* 25:105–114. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000100012>.

Statsoft (1994). *Statistica: quick reference*. Tulsa: StatSoft. 148 p.

Teixeira DBdeS, Cecílio RA, Oliveira JPDe, Almeida LT De, Pires G F (2022). Rainfall erosivity and erosivity density through rainfall synthetic series for São Paulo State, Brazil: Assessment, regionalization and modeling. *International Soil and Water Conservation Research.* 10:355–370.

Telles TS (2015) *Conservação dos solos e preços de terras agrícolas no Brasil.* 155 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Econômico) - Unicamp Campinas.

Thompson AL, Regmi TP, Ghidry F, Gantzer CJ, Hjelmfelt AT (2001). Influence of kinetic energy on infiltration and erosion. In *Soil Erosion*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.151-154. doi:10.13031/2013.3359

Vaidya S, Hoffmann M, Holz M, Macagga R, Monzon O, Thalmann M, Augustin J (2023). Similar strong impact of N fertilizer form and soil erosion status on N₂O emissions from farmland. *Geoderma*, 429, 116243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116243>

Valente F, Laurini M (2021) Pre-harvest sugarcane burning: A statistical analysis of the environmental impacts of a regulatory change in the energy sector. *Cleaner Engineering and Technology.* 4:100255.

Valim WC, Panachuki E, Pavei DS, Alves Sobrinho T, Almeida WS (2016). Efeito de resíduos vegetais de cana-de-açúcar no controle da erosão hídrica entressulcos. *Semina: Ciências Agrárias*, 37:1155–1164. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n3p1155>.

Vieira SR, Hatfield JL, Nielsen DR, Biggar JW (1993). Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*. 51:1–75. <https://doi.org/10.3733/hilg.v51n03p075>.

Vilas MP, Shaw M, Rohde K, Power B, Donaldson S, Foley J, Silburn M (2022). Dez anos de monitoramento do nitrogênio inorgânico dissolvido no escoamento superficial da cana-de-açúcar informam o desenvolvimento de um algoritmo de modelagem para priorizar o manejo de nutrientes orgânicos e inorgânicos. *Ciência do Meio Ambiente Total*, 803:150019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150019>.

Vitti AC, Prado H. do (2012). Produtividade da cana-de-açúcar em função do ambiente e Disponibilidade hídrica. *Pesquisa Tecnologia* 9.2.

Wischmeier WH, Johnson CB, Cross BV (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, 26:183-189.

Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: U.S. Department of Agriculture. 58. (Handbook, 537).

Wocat (2007) Where the land is greener. Case studies and analysis of soil and water conservation initiatives worldwide. In Liniger H, Critchley (EDS) *World overview of conservation approaches and technologies*. ISBN 978-92-9081-339-2.

Xue J, Lyu D, Wang D, Yongmin W, Yin D, Zhao Z, Mu Z. (2018). Assessment of Soil Erosion Dynamics Using the GIS-Based RUSLE Model: A Case Study of Wangjiagou Watershed from the Three Gorges Reservoir Region, Southwestern China. *Water*. [http://doi.org/10.1817. 10.3390/w10121817](http://doi.org/10.1817/10.3390/w10121817).

Yesuph AY (2019) Dagneu AB. Land use/cover spatiotemporal dynamics, driving forces and implications at the Beshillo catchment of the Blue Nile Basin, North Eastern Highlands of Ethiopia. *Environmental Systems Research*. 8. <https://doi.org/10.1186/s40068-019-0148-y>.

Zhang C, Zhang W, Ren H, Li Y. (2020). A review of artificial intelligence applications in precision agriculture. *Agriculture*. 10- 267.

Zhang H, Wei J, Yang Q, Baartman JEM, Gai L, Yang X, Li SQ, Yu J, Ritsema CJ, Geissen V (2017) An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma*. 308:36–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.006>.

Zhu Y, Weindorf DC, Zhang W (2011). Characterizing soils using a portable x-ray fluorescence spectrometer: 1. Soil texture. *Geoderma* 167–168:167–177. doi:10.1016/j.geoderma.2011.08.010.