

Documentos

407

Colombo, PR / Novembro, 2025

Protocolo de valoração dos serviços ecossistêmicos de controle da erosão do solo em áreas de produção agrícola

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL



OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL



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

ISSN 1517-526X / e-ISSN 1980-3958

Documentos 407

Novembro, 2025

Protocolo de valoração dos serviços
ecossistêmicos de controle da erosão do
solo em áreas de produção agrícola

*Junior Ruiz Garcia
Jailane Delmaschio
Lucília Maria Parron
Adonnay Martins Barbosa
Dafne Godoy*

Embrapa Florestas
Colombo, PR
2025

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, Km 111, Guaraituba
Caixa Postal 319
83411-000 Colombo, PR
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-presidente

José Elidney Pinto Júnior

Secretária-executiva

Elisabete Marques Oaida

Membros

Annete Bonnet

Cristiane Aparecida Fioravante Reis

Elene Yamazaki Lau

Guilherme Schnell e Schühli

Luis Claudio Maranhão Froufe

Marina Moura Morales

Paulo Marcelo Veras de Paiva

Sandra Bos Mikich

Edição executiva e revisão de texto

José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica

Francisca Rasche

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Elisabeth

Celso Alexandre de Oliveira Eduardo

Foto da capa

Claudio Lucas Capeche

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Florestas

Protocolo de valoração dos serviços ecossistêmicos de controle da erosão do solo em áreas de
produção agrícola. [recurso eletrônico] / Junior Ruiz Garcia ... [et al.]. - Colombo : Embrapa
Florestas, 2025.

PDF (30 p.) : il. color. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1517-526X : e-ISSN 1980-
3958 ; 407)

1. Conservação do solo. 2. Manejo do solo. 3. Valoração ambiental. 4. Gestão agrícola. I.
Garcia, J. R. II. Delmaschio, J. III. Parron, L. M. IV. Barbosa, A. M. V. Godoy, D. VI. França, C. A. S.
S. de M. VII. Monteiro, J. M. G. VIII. Oliveira, A. P. de. IX. Fidalgo, E. C. C. X. Prado, R. B. XI. Série.

CDD (21. ed) 333.7

Francisca Rasche (CRB-9/1204)

© 2025 Embrapa

Autores

Junior Ruiz Garcia

Economista, doutor em Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente, Professor Associado da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

Jailane Delmaschio

Economista, mestre em Desenvolvimento Regional e Agronegócio, Bolsista do Projeto PronaSolos – Embrapa, Curitiba, PR

Lucilia Maria Parron

Bióloga, doutora em Ecologia de Ecossistemas, Pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Adonnay Martins Barbosa

Economista, doutor em Economia, Bolsista do Projeto PronaSolos – Embrapa Florestas, Colombo, PR

Dafne Godoy

Geógrafa, licenciada em Geografia, Bolsista do Projeto PronaSolos – Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Cynara Alets Sthuasth Souza de Melo França

Bióloga, mestre em Ecologia e Manejo dos Recursos Naturais, Bolsista do Projeto PronaSolos – Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Joyce Maria Guimaraes Monteiro

Engenheira-agrônoma, doutora em Planejamento Energético, Pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Aline Pacobahyba de Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, Pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Agrícola, Pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Rachel Bardy Prado

Bióloga, doutora em Ciências da Engenharia Ambiental, Pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

Apresentação

O manejo conservacionista do solo agrícola pode contribuir para a melhoria da fertilidade do solo, infiltração de água, sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes, segurança alimentar e na redução dos custos de produção. O manejo que não incorpora práticas conservacionistas pode acarretar na ocorrência de erosão do solo, contaminação da água, perda de biodiversidade e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Este protocolo oferece um roteiro para auxiliar na valoração biofísica e econômica da erosão do solo. Essa informação gerada pode auxiliar na gestão da produção agrícola. A valoração biofísica e econômica utiliza a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) e método denominado custo de reposição. O protocolo adota linguagem acessível, podendo ser utilizado por qualquer público, intuitivo e funcional, de maneira similar a um tutorial. O conteúdo conta com conceitos básicos e uma planilha eletrônica, que funciona como um protótipo para auxiliar na valoração biofísica e econômica da erosão. Por fim, esse protocolo pode ser utilizado por produtores rurais, técnicos extensionistas, gestores, estudantes, tomadores de decisão ou qualquer interessado no tema.

Essa publicação apresenta aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente aos ODS 12 e 15 por abordar a valoração dos serviços ecossistêmicos, com enfoque destaque para a conservação dos solos e a gestão sustentável dos recursos naturais.

Marcelo Francia Arco-Verde

Chefe-Geral interino da Embrapa Florestas

Sumário

Introdução	7
A importância do diagnóstico e da valoração econômico-ambiental	8
Avaliação dos serviços ecossistêmicos providos pelo solo agrícola	10
Degradação do solo e sua relação com os serviços ecossistêmicos	11
Valoração econômica do serviço ecossistêmico de controle da erosão do solo	13
Considerações finais	18
Referências	19
Apêndice A – Sites úteis	21
Apêndice B – Planilha eletrônica ‘Estimativa da perda de solos (erosão) utilizando a Equação Universal de Perda do Solo (USLE)’	23

Introdução

Os ecossistemas desempenham um papel vital na manutenção da vida na Terra, oferecendo uma ampla gama de serviços que garantem a sobrevivência e o bem-estar humano. Serviços ecossistêmicos são benefícios providos pelos ecossistemas e aproveitados de forma direta ou indireta pelas pessoas, influenciando o seu bem-estar. Alguns exemplos de serviços ecossistêmicos são o fornecimento de alimentos, água potável, polinização, controle de pragas e doenças, controle de inundação e serviços culturais como recreação e turismo. No entanto, a importância desses serviços tem sido negligenciada em processos de tomada de decisão, levando à práticas insustentáveis de uso da terra e à degradação ambiental. As mudanças na cobertura do solo para o uso agropecuário afetam o meio ambiente e o provimento de serviços ecossistêmicos, quando não são adotadas medidas e práticas conservacionistas. A exploração agrícola sem práticas adequadas de manejo do solo, como a ausência de cobertura vegetal, o preparo excessivo da terra ou o uso ineficiente de técnicas de conservação, pode não apenas reduzir a área e a diversidade de espécies de plantas, animais e microrganismos, como também intensificar processos erosivos, degradar a qualidade da água, alterar a paisagem e comprometer a segurança alimentar em longo prazo.

Os sistemas agrícolas contribuem para a geração de produtos destinados aos diferentes mercados, tais como aqueles para alimentação humana e animal, fibras e óleos para o setor industrial, biocombustíveis, entre outros. Entretanto, quando ocorre a ausência de práticas agrícolas conservacionistas, como a rotação de culturas, adubação orgânica, plantio direto, entre outras, o solo pode sofrer processos erosivos, perda de nutrientes e redução da capacidade de infiltração da água. A atividade agrícola intensiva tem demandado, cada vez mais, o uso do solo, um recurso finito e sujeito à degradação de suas propriedades fundamentais, o que ressalta a necessidade de adoção de práticas de manejo conservacionistas. Vale destacar que os serviços ecossistêmicos providos pelo solo tendem a

ser ignorados na gestão da produção agrícola, uma vez que não são incluídos no processo de tomada de decisão, apenas os componentes econômicos, tais como mão de obra, máquinas e equipamentos e outros insumos. Essa fragilidade na gestão da produção dificulta a busca e adoção de alternativas mais sustentáveis de manejo, muitas vezes por parte dos próprios produtores. O processo de conscientização desses agentes e de quem trabalha com o solo, em geral, passa pesquisas, esforços, tempo e dinheiro; entretanto, há lacunas do conhecimento sobre uma forma prática, de fácil compreensão e de baixo custo para se tratar a relação entre a produção agropecuária e os serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo.

A importância do diagnóstico e da valoração econômico-ambiental

A valoração econômica é o processo que busca revelar a importância, em unidades monetárias, do capital natural e dos bens e serviços ecossistêmicos, contribuindo para a tomada de decisões. A valoração econômica depende da realização do diagnóstico ambiental, entendido como a etapa de análise e caracterização das condições ambientais de uma área ou ecossistema, com o objetivo de identificar, descrever e quantificar os serviços ecossistêmicos existentes e os fatores que afetam a sua qualidade e disponibilidade (Garcia, 2013; Brasil, 2021). Diagnósticos também permitem a avaliação do impacto das atividades humanas nos ecossistemas e na provisão de serviços ecossistêmicos (Ferraz et al., 2019). Esse procedimento de coleta de informações, análise e caracterização dos impactos ambientais permite identificar áreas e problemas específicos relacionados à perda de biodiversidade, ao fornecimento de água, ao desmatamento, à erosão do solo, entre outros, o que é essencial para entender as causas dessa deterioração e orientar a implementação de medidas corretivas.

Os resultados dos diagnósticos podem oferecer aos responsáveis pela tomada de decisão, informações para o desenvolvimento e implementação de estratégias para mitigar os impactos negativos, além de promover a recuperação dos ecossistemas e seus serviços. Neste contexto, a valoração econômica é uma ferramenta essencial para orientar as escolhas dos agentes, uma vez que esta oferece informações associadas aos custos ambientais e sociais da perda de serviços ecossistêmicos (Garcia, 2013). Essa informação pode ser incorporada na gestão agrônômica e econômica da produção.

A valoração econômica dos serviços ecossistêmicos também desempenha um papel fundamental na conscientização, sensibilização e no apoio às questões relacionadas à gestão, conservação e ao uso mais sustentável dos recursos naturais (Garcia, 2013). A valoração econômica, portanto, pode contribuir para revelar a importância dos serviços ecossistêmicos na métrica monetária, permitindo a sua inclusão na gestão da produção agrícola, no processo decisório e, por conseguinte, na melhoria da qualidade ambiental dos agroecossistemas (Garcia, 2013). É importante ressaltar que a contribuição da valoração econômica vai além da perspectiva econômica, porque envolve o bem-estar humano em geral e, portanto, os serviços ecossistêmicos ultrapassam as fronteiras da propriedade agrícola. Isso ajuda a evitar a subvalorização dos recursos naturais e a incorporar seu valor, mesmo que parcial, nas decisões públicas e privadas.

A revelação da importância econômica dos serviços ecossistêmicos pode motivar investimentos na conservação e na restauração dos ecossistemas, como a proteção de habitats, manutenção da biodiversidade, adoção de práticas agrícolas e florestais mais sustentáveis e a promoção da justiça social, a partir da garantia de que os benefícios e os custos sociais sejam distribuídos de forma equitativa. Assim, reconhecer e compreender o valor econômico dos serviços ecossistêmicos pode contribuir para melhorar o gerenciamento de riscos relacionados a desastres naturais, mudanças climáticas e outras questões ambientais. Isso porque ecossistemas saudáveis têm o potencial de oferecer serviços de proteção, como a regulação do clima e a redução de enchentes, o que contribui para uma agricultura mais sustentável.

A regulação do clima ocorre pelo funcionamento natural dos ecossistemas ou ações humanas para manter um clima estável, minimizando os efeitos climáticos adversos, como o aumento e variabilidade das temperaturas médias e da precipitação pluvial, eventos extremos e a elevação do nível do mar. O solo exerce um papel essencial na regulação do clima ao reter e conservar a água, controlar a temperatura do entorno e impactar no ecossistema.

Avaliação dos serviços ecossistêmicos providos pelo solo agrícola

Os ecossistemas fornecem serviços essenciais para a agricultura, tais como: provisão (produção de alimentos e água potável); regulação (purificação do ar e mitigação das mudanças climáticas); suporte (formação do solo, ciclagem de nutriente e polinização) e culturais (ecoturismo, agroturismo e práticas agroecológicas). A formação e a manutenção do solo é um conjunto de interações naturais envolvendo as rochas, o relevo, o clima e os organismos, que promovem, ao longo do tempo, a criação e a preservação das camadas e /ou horizontes do solo. Ações humanas podem interferir nesses processos, destacando-se as práticas agropecuárias

Ao implementar práticas de avaliação e monitoramento da provisão de serviços ecossistêmicos na produção agrícola, é possível obter uma compreensão mais abrangente da sua associação entre produtividade, produção e qualidade ambiental nos sistemas agrícolas (Ferraz et al., 2019). Nesse contexto, o uso de indicadores biofísicos e econômicos permite capturar aspectos dos serviços ecossistêmicos associados aos solos agrícolas e sua relação com a produção (Ferraz et al., 2019). Para isso, a coleta de dados é o ponto de partida para a valoração dos serviços ecossistêmicos, os quais podem ser obtidos mediante levantamentos de campo, bases de dados e informações da literatura científica.

Degradação do solo e sua relação com os serviços ecossistêmicos

Diversas são as causas que levam à degradação do solo, tanto naturais (Tabela 1), como a chuva, quanto à ação humana, como o tráfego de máquinas agrícolas pesadas. Esses processos afetam a qualidade do solo, o que prejudica sua capacidade de sustentar a produção agrícola. Independentemente da causa, é possível mitigar esses efeitos a partir da adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, como a rotação de culturas, cultivo em curvas de níveis, construção de terraços, conservação da cobertura vegetal nativa ou não, uso de plantas de cobertura do solo e manejo mais sustentável do uso de agroquímicos.

Os indicadores de qualidade do solo (Tabela 2) são utilizados para avaliar a sua habilidade de sustentar a produção agrícola e garantir a provisão de serviços ecossistêmicos. A avaliação desses indicadores ajuda agricultores, pesquisadores e gestores ambientais a monitorar e promover o uso e uma gestão mais sustentável do solo e, portanto, da produção agrícola.

Os serviços ecossistêmicos são intrinsecamente conectados entre si e com a produção agrícola, por exemplo, a infiltração e a conservação da água têm relação com a umidade e a fertilidade do solo que, por sua vez, repercute na produtividade e na produção agrícola. Essa interconexão, portanto, eleva a importância da avaliação, monitoramento e da valoração econômica dos serviços ecossistêmicos providos pelo solo agrícola.

Tabela 1. Principais tipos de degradação do solo.

Tipo	Causas	Consequências
Erosão ¹	Processo natural de desgaste do solo que pode ser provocado por fatores internos, como a composição da rocha ou do solo, ou externos, como a ação da água, do vento e atividades humanas como desmatamento, queimadas, mineração e agricultura.	Solos menos produtivos; assoreamento de rios e mananciais; desequilíbrio ambiental.

Continua...

¹ Mais de 20 bilhões de toneladas de solo são perdidas, anualmente, devido à erosão, gerando prejuízos ambientais e econômicos (FAO, 2025)

Continuação.

Tipo	Causas	Consequências
Lixiviação	Processo de degradação que ocorre em função do escoamento superficial de nutrientes do solo, reduzindo a sua fertilidade. e causando erosão. Esse fenômeno pode ser causado por desmatamento, chuvas intensas ou uma ação conjunta desses fatores.	Solo menos fértil e mais suscetível à erosão; capacidade de armazenamento de água reduzida; deficiência de nutrientes na lavoura.
Compactação	Processo de redução do volume de solo, que ocorre tanto na superfície quanto em camadas mais profundas. A compactação superficial do solo é causada pelo tráfego de máquinas ou pelo pisoteio de animais, enquanto a compactação subsuperficial resulta da aplicação de pressões concentradas de implementos agrícolas que atuam em camadas mais internas do solo.	Redução da capacidade de retenção de água pelo solo; resistência do solo à penetração de raízes.
Salinização	Processo de elevação do nível freático, causado por irrigação inadequada, má drenagem, alta evapotranspiração, baixos índices pluviométricos e atividades humanas.	Solo impróprio para o cultivo e possibilidade de desertificação.
Desertificação	Processo de degradação ecológica pelo qual o solo fértil se torna árido e perde ou reduz a sua produtividade e que resulta em perda da vegetação. É causado por fatores naturais e antrópicos, que inclui desmatamento, queimadas, uso inadequado do solo, exploração excessiva de recursos naturais, práticas agrícolas insustentáveis, uso de fertilizantes e pesticidas químicos, e sobrepastoreio.	Perda de biodiversidade, perda ou redução da colheita, desequilíbrio ambiental.
Acidificação	Processo de redução do pH do solo causado por fatores climáticos, como o intemperismo de rochas, ou por atividades humanas, como o uso de fertilizantes nitrogenados, a remoção de nutrientes pelos cultivos e a chuva ácida.	Redução dos nutrientes do solo, perda de ecossistemas, baixa produtividade dos cultivos.

Fonte: Elaboração a partir de informações contidas em Sá e Santos Júnior (2005); Richart et al. (2005) e Ferraz et al. (2019).

Tabela 2. Serviços ecossistêmicos do solo e seus indicadores.

Serviços ecossistêmicos	Descrição	Indicadores*
Sequestro de gases de efeito estufa (GEE)	Corresponde à capacidade do solo em capturar gases que têm como base os elementos carbono e nitrogênio.	Estoque de carbono orgânico (CO), estoque de nitrogênio (N), emissão de óxido nitroso (N ₂ O), oxidação de metano (CH ₄).
Produtividade primária	Representa o crescimento e o desenvolvimento das plantas e, portanto, a produção de biomassa.	Quantidade de biomassa.

Continua...

Continuação.

Serviços ecossistêmicos	Descrição	Indicadores*
Provisão de água	Corresponde à capacidade de infiltração e conservação da água no solo (retenção de água no solo e filtragem da água).	Taxa de infiltração de água, perda de nitrato (NO ₃) e perda de água.
Controle da erosão	Representa à capacidade natural do solo em evitar processos erosivos, ou seja, a perda de solo e nutrientes.	Distribuição de agregados no solo, riqueza da macrofauna e mesofauna no solo.
Produção de alimentos e madeira	Corresponde à capacidade de produção agrícola, pecuária e florestal.	Produção de alimentos, fibras, carne e madeira.

* não é uma lista exaustiva, portanto, apresenta alguns exemplos.

Fonte: Parron et al. (2015).

Valoração econômica do serviço ecossistêmico de controle da erosão do solo

O serviço ecossistêmico de controle de erosão está relacionado ao potencial de controlar ou prevenir a perda de solo agrícola, o que acarreta a perda de nutrientes, produtividade e produção agrícola. Esse serviço ecossistêmico é geralmente fornecido pela vegetação que cobre o solo (Brasil, 2021; Steinhoff-Knopp et al., 2021). Isso significa que o solo descoberto está mais propenso à ocorrência de processos erosivos. A valoração econômica do controle de erosão pode ser realizada com base em estimativas dos custos de reposição dos nutrientes perdidos ou da adoção de práticas agrícolas que reduzam a propensão da ocorrência de processos erosivos. Esse material apresenta o método de valoração denominado Custo de Reposição (MRC), que trata da estimativa do custo de reposição de nutrientes perdidos com a erosão do solo agrícola (Garcia, 2013; Brasil, 2021).

O método de valoração baseado no custo de reposição auxilia no cálculo, em unidades monetárias, do valor associado à manutenção, restauração ou substituição de um serviço ecossistêmico por outro com as mesmas características. Para utilizar MCR na valoração do serviço ecossistêmico de controle da erosão do solo agrícola é necessário estimar a perda (biofísica) de solo. A estimativa biofísica é realizada a partir de uma avaliação ecossistêmica, por exemplo, o volume anual de solo perdido por hectare e a estimativa de nutrientes perdidos. Essa avaliação pode ser direta, com o uso de equipamentos, ou indireta mediante Equação Universal de Perdas de Solo (universal soil loss equation USLE). A estimativa direta é muito complexa e difícil, nem sempre ao alcance dos produtores rurais, portanto, o protocolo utiliza o método indireto.

Nesse protocolo, a valoração econômica do controle de erosão do solo agrícola é realizada em duas etapas: (i) avaliação biofísica, por meio da estimativa do solo perdido com base na equação USLE; (ii) valoração monetária, com base no Método de Custo de Reposição de nutrientes perdidos.

A avaliação biofísica foi baseada nos estudos de Su et al. (2018) e Oliveira et al. (2023), que consistem na aplicação da equação USLE (Tabela 3):

$$A_{(t)} = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

A variável R é calculada utilizando-se registros pluviométricos que podem ser consultados em vários sites na internet, como no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Os dados para as variáveis K, LS, C e P (Tabela 3), de acordo com a FGVces (2019), devem preferencialmente ser obtidas em campo ou definidos com base nas características da área a ser avaliada. Em caso de impossibilidade, é possível obtê-los na página da internet do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), MapBiomass (2025), Embrapa, entre outras fontes locais ou regionais, como os serviços de assistência técnica e extensão rural.

Tabela 3. Descrição das variáveis da equação 1.

Atributo	Definição do Atributo	Medida	Definição
A(t)	Perda de solo	t ha	É um processo que pode ocorrer por diversos fatores, como a erosão e que resulta na perda de nutrientes e da estrutura do solo.
R	Erosividade da chuva	EI30 (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)	É o potencial da chuva em causar erosão.
K	Erodibilidade do solo	Mg ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹	Representa a suscetibilidade do solo à erosão.
LS	Fator topográfico	adimensional	Reflete o impacto do relevo no risco de erosão hídrica. O fator L mede o comprimento do escoamento, enquanto o fator S considera o efeito da inclinação sobre a erosão, ou seja, quanto maior a inclinação maior é o potencial de erosão. ¹
CP	Cobertura e manejo	adimensional	Avalia o uso, cobertura e manejo do solo, isto é, a eficiência da proteção do solo, que pode ser composta por vegetação, restos de plantas ou técnicas agrícolas, em minimizar a erosão. Essa avaliação é feita em comparação a uma área desprotegida e sem qualquer tipo de manejo, que serve como referência básica.

Fonte: Preparado pelos autores com base em Su et al. (2018), Oliveira et al. (2023) e FGVces (2019).

¹ https://www.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/publicacoes/Guia_Apoio_Calculo_LS.pdf

O serviço ecossistêmico de controle de erosão é estimado com base no trabalho de Su et al (2018), em que:

$$A_c = A_p - A_t \quad (2)$$

$$A_c = R \times K \times LS - R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

$$A_c = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (4)$$

em que

A_c = serviço de retenção de sedimentos ou controle de erosão.

A_p = perda de solo potencial – cujo fator CP é igual a 1, considerando um cenário sem proteção do solo ou manejo da terra, sendo estimada como $RKLS$.

A_t = perda de solo estimada/real – em que o fator CP assume valores conforme o uso e o manejo da terra, sendo estimada como $R \times K \times LS \times C \times P$.

Dessa forma, o valor deste serviço ecossistêmico é obtido a partir da diferença entre a perda de solo potencial/natural e a perda de solos estimada/real. Posteriormente à avaliação biofísica realizada com a aplicação da USLE, inicia-se a avaliação econômica com base na metodologia de reposição de nutrientes perdidos pela erosão, utilizando-se o método apresentado por Pugliesi et al. (2011).

Pugliesi et al. (2011) utilizaram o método de custo de reposição, que se caracteriza pelo cálculo das perdas de solo, transformadas em perdas de nutrientes, que devem ser proporcionalmente repostos por meio de adubação com adubos comerciais ou naturais. Por este método, a necessidade de adubação, que é determinada em função das exigências nutricionais das culturas e dos teores de nutrientes presentes no solo, permite avaliar o custo econômico da degradação da fertilidade do solo resultante da erosão do solo. É importante destacar

que a metodologia pode ser aplicada a qualquer cultura agrícola e classe de solo. O primeiro passo é converter a quantidade de nutrientes perdidos em equivalente de adubos necessários para recuperar os nutrientes perdidos, que é dado pela equação:

$$QF_i = \sum_{j=1}^4 NS_j \times TF_i \quad (5)$$

em que

QF_i = quantidade equivalente de fertilizantes (em toneladas).

TF_i = coeficiente técnico de conversão de nutrientes em adubos.

NS_j = teor médio do j-ésimo de nutriente perdido (em toneladas).

Para isso, a metodologia utiliza os nutrientes Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio e Magnésio (Ca + Mg) e seus respectivos adubos sulfato de amônio, superfosfato simples, cloreto de potássio e calcário dolomítico. Após a conversão da quantidade de nutriente perdida em equivalente de adubos, aplica-se o modelo do valor econômico da perda de solo. O modelo para estimar o valor econômico a partir do método de custo de reposição é:

$$Valor \ Econ\omicronmico \ da \ Perda \ de \ Solo = \sum_{i=1}^n (Q_n \times P_n) + Caf \quad (6)$$

em que

Q_n = quantidade de adubos necessária para a cultura X, para repor a fertilidade (nutrientes) do solo perdida com a erosão;

P_n = preço de mercado de cada adubo industrializado utilizado (sulfato de amônia, superfosfato simples, cloreto de potássio e calcário dolomítico).

Caf = custo de aplicação dos adubos.

Em síntese, as quantidades de nutrientes (N, P, K e Ca+Mg) foram convertidas em quantidades dos respectivos adubos, por meio de uma relação técnica de equivalência e, a partir dos preços médios dos adubos e da estimativa dos custos de sua aplicação, foram mensurados os custos de reposição em reais (R\$) por hectare (ha).

O método apresentado é mostrado em planilha eletrônica (Apêndice B), como um roteiro para facilitar a compreensão dos cálculos.

Considerações finais

A valoração econômica dos serviços ecossistêmicos providos pelo solo em áreas agrícolas é fundamental para melhorar a gestão da produção, uma vez que permite a incorporação de informações normalmente ignoradas pelo produtor rural. A melhoria na gestão da produção pode contribuir para a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis nos sistemas agrícolas. Ao considerar o solo como um participante ativo na oferta de diversos serviços, como a regulação da qualidade da água e do clima, captura de carbono, produtividade na agricultura e preservação da biodiversidade, amplia-se a visão sobre sua importância estratégica para a sociedade.

Este protocolo representa um progresso técnico ao fornecer um guia acessível, baseado em fundamentos científicos e adaptável aos variados contextos produtivos, sendo especialmente benéfico não só para regiões com predominância da agricultura familiar, mas, também relevante para o agronegócio.

Sua configuração abrange tanto as dimensões biofísicas quanto econômicas, integrando métodos como a USLE e o MCR, que possibilitam destacar, em valores monetários, os custos relacionados à perda de seus serviços ecossistêmicos.

É recomendado que as informações utilizadas nas estimativas do controle da erosão, como dados sobre precipitação pluvial, erodibilidade, cobertura do solo e preços de adubos, sejam atualizadas regularmente, utilizando fontes reconhecidas. Essa prática ajudará a aprimorar as estimativas biofísicas e econômicas. Assim, espera-se que este protocolo não apenas contribua para a avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo, mas, também promova uma mudança de perspectiva em como a sociedade, (em especial os agricultores), entende, utiliza e protege esse recurso vital para a produção agrícola mais sustentável.

Referências

BRASIL. Conselho Nacional do Ministério Público. **Diretrizes para valoração de danos ambientais**. Brasília, DF, 2021. 509 p.

FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMPANHA, M. M. **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 121 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205733/1/Marco-Referencial-em-Servicos-Ecossistemas-2019.pdf>. Acesso em: 08 maio 2025

FGVces. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo. **Diretrizes empresariais de valoração econômica de serviços ecossistêmicos**: versão 3. São Paulo, 2019. 102 p. <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/fcbb733b-f072-4ad9-9b00-20d749b33e74/content>. Acesso em: 22 maio 2025

FAO. **FAO no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/publicacoes/pt>. Acesso em: 15 maio 2025

GARCIA, J. R. Valoração econômico-ecológica dos recursos naturais e dos serviços ambientais. **Cadernos do Desenvolvimento**, v. 8, n. 13, p. 37-55, 2013. <https://www.cadernosdodesenvolvimento.org.br/cdes/article/view/136/137>. Acesso em: 15 maio 2025

IBGE. **Monitoramento da cobertura e uso da terra**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html>. Acesso em: 15 maio 2025

MAPBIOMAS. **Estatísticas**. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas>. Acesso em: 22 maio 2025

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1024082/1/LivroServicosAmbientaisEmbrapa.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025

PUGLIESI, A. C. V.; MARINHO, M. de A.; MARQUES, J. F.; LUCARELLI, J. R. F. Valoração econômica do efeito da erosão em sistemas de manejo do solo empregando o método custo de reposição. **Bragantia**, v. 70, p. 113-121, 2011.

SU, C.; LIU, H.; WANG, S. A process-based framework for soil ecosystem services study and management. **Science of the Total Environment**, v. 627, p. 282-289, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.244>.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos. **Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 25 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 136). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/569996/1/doc136.pdf>. Acesso em: 29 maio 2025

OLIVEIRA, P. J. L. de; GUEDES, J. C. F.; SANTOS, J. Y. G. dos; COSTA, D. F. DA S. Aplicação da USLE nos serviços ecossistêmicos de controle de erosão em área suscetível à desertificação, NE-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 1088-1103, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p1088-1103>.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; RODRIGUES BRITO, O.; FUENTES-LLANILLO, R.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-343. 2005.

STEINHOFF-KNOPP, B.; KUHN, T. K.; BURKHARD, B. The impact of soil erosion on soil-related ecosystem services: development and testing a scenario-based assessment approach. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, suppl. 1, p. 274. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08814-0>.

Apêndice A – Sites úteis

MapBiomass

Plataforma colaborativa que usa dados de sensoriamento remoto para mapear a cobertura e uso do solo no Brasil, oferecendo informações como mapas de vegetação e uso da terra. Pode ser usada para monitorar mudanças ambientais, como desmatamento e degradação, o que é crucial para a gestão e conservação ambiental.

Portal de Informações - Conab Produtos 360

Portal da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) com informações detalhadas sobre produção agrícola, estoques e preços de commodities no Brasil, sendo útil para embasar o planejamento e análise do setor agropecuário, oferecendo dados valiosos para agricultores, economistas e gestores do agronegócio.

BPBES (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos)

Plataforma que integra dados sobre biodiversidade e serviços ecossistêmicos no Brasil, incluindo relatórios e estudos científicos.

Pedometria

Portal dedicado ao estudo quantitativo do solo, oferecendo publicações e recursos de pesquisa sobre pedometria. Importante, em especial, para pesquisadores que utilizam modelagem e mapeamento digital de solos.

Re3data

Oferece informações científicas em várias áreas, com um catálogo de informações que podem ser usadas por pesquisadores que precisam de informações confiáveis para as suas pesquisas.

Banco de Dados de Solos - BD Solos

Reúne amostras e perfis de solos de diversas regiões do Brasil, oferecendo uma descrição minuciosa das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas desses perfis, com suas respectivas localizações geográficas. Além disso, o sistema também abrange informações sobre análises de fertilidade do solo.

Apêndice B – Planilha eletrônica ‘Estimativa da perda de solos (erosão) utilizando a Equação Universal de Perda do Solo (USLE)’

A planilha eletrônica está disponível no link:
<https://www.embrapa.br/florestas/aplicativos-e-software>

Tabela A1. Interface da planilha

Dados da propriedade rural		
Área (hectares)	10	
Valor do uso do solo (fator C)	0,35	
Valor da prática de manejo (fator P)	0,4	

Preço dos fertilizantes	R\$/tonelada	Fonte dos Preços
Sulfato de amônia (granulado)	1.996,33	Ago./2025 - Deral/PR.
Super Fosfato Simples (granulado)	2.242,80	Ago./2025 - Deral/PR.
Cloreto de Potássio	2.916,18	Ago./2025 - Deral/PR.
Calcário dolomítico a granel - tipo C	235,83	Ago./2025 - Deral/PR.

Custos de aplicação dos fertilizantes	R\$/hectare
Maquinário (tratores e equipamentos)	2,00
Combustível	3,00
Mão-de-obra	4,00

Resultados	
Erosão evitada total em toneladas	602,00
Erosão evitada em toneladas por hectare	60,20
Valor econômico total da erosão (perda de nutrientes) (R\$)	6.669,86
Valor econômico por hectare da erosão evitada (perda de nutrientes) (R\$)	666,99

Tabela A2. Uso do solo (fator C) e prática conservacionista (fator P).

Valor do uso do solo (fator C)	Uso do solo
1,00	Solo exposto
0,35	Agricultura
0,06	Pastagem
0,02	Agricultura e floresta
0,00	Floresta
Prática conservacionista (fator P)	Descrição do Fator P
1,00	Revolvimento do solo
0,40	Plantio direto
0,35	Plantio direto e rotação de culturas
0,25	Integração Lavoura-Pecuária
0,12	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

Tabela A3. Estimativa da erosão (perda de solo).

Variável	Resultado	Observações
Perda de solo (Es) toneladas por hectare ano	60,20	
Perda de solo (Es) total ano (toneladas)	602,00	

Equação Universal de Perda do Solo (USLE)

$Es = \Sigma a=1(R \times K \times LS \times (1 - CP)) \Rightarrow$ perda de solo evitada por hectare

$Es = \Sigma a=1(R \times K \times LS \times (1 - CP)) \times A \Rightarrow$ perda total de solo evitada

Tabela A4. Variáveis da USLE.

Variáveis da USLE	Valores	Observações
Fator R (erosividade da chuva) por hectare:	7.000,00	Sul/Sudeste (R=5.000–10.000)
Fator K (erodibilidade do solo) por hectare:	0,0200	Latossolo Vermelho
Fator LS (topografia) na área analisada:	0,50	Declividade 3–5%
Fator C (cobertura e manejo) na área analisada:	0,35	
Fator P (prática Conservacionista) na área analisada:	0,40	
A (área total da análise em hectares)	10,00	O usuário entra com a informação

Tabela A5. Essa tabela está repetindo a tabela A2.

Fator C (cobertura e manejo) na área analisada	Descrição do Fator C	Fator P (Prática Conservacionista) na área analisada	Descrição do Fator P
1,00	Solo exposto	1,00	Revolvimento do solo.
0,35	Agricultura	0,40	Plantio direto.
0,06	Pastagem	0,35	Plantio direto e rotação de culturas
0,02	Agricultura e floresta	0,25	Integração Lavoura-Pecuária
0,00	Floresta	0,12	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

Estimativa da perda de nutrientes do solo.**Tabela A6.** Nutrientes e teor médio de nutrientes no solo.

Nutrientes do solo	Teor Médio de Nutrientes (%)	Observações
Nitrogênio (N)	0,097%	
Fósforo (P)	0,003%	
Potássio (K)	0,010%	
Cálcio e Magnésio (Ca+Mg)	0,095%	

Tabela A7. Equivalência entre nutrientes do solo e fertilizantes e o teor médio de nutrientes dos fertilizantes (%).

Nutrientes do solo	Equivalência em fertilizantes	Teor Médio de Nutrientes dos fertilizantes (%)	Relação Kg Fertilizante / Kg Nutriente
Nitrogênio (N)	Sulfato de amônio	20,00%	5,00
Fósforo (P)	Superfosfato simples	18,00%	5,56
Potássio (K)	Cloreto de potássio	58,00%	1,72
Cálcio e Magnésio (Ca+Mg)	Calcário dolomítico	38,00%	2,63

Tabela A8. Preço médio dos fertilizantes.

Fertilizantes	Preço médio (2023) R\$/t.)	Preço médio (2023) (R\$/kg.)
Sulfato de amônio (granulado)	1.996,33	2,00
Superfosfato simples (granulado)	2.242,80	2,24
Cloreto de potássio	2.916,18	2,92
Calcário dolomítico a granel - tipo C	235,83	0,24

Tabela A9. Estimativa dos nutrientes perdido com a erosão.

Nutrientes do solo	Nutrientes perdidos t/ha (toneladas por hectare)	Nutrientes perdidos total (toneladas)
Nitrogênio (N)	0,06	0,58
Fósforo (P)	0,00	0,02
Potássio (K)	0,01	0,06
Cálcio e Magnésio (Ca+Mg)	0,06	0,57

Tabela A10. Estimativa da necessidade de fertilizantes para repor a perda de nutrientes com a erosão.

Fertilizantes	Tonelada por hectare	Total (toneladas)
Sulfato de amônio	0,29	2,91
Superfosfato simples	0,01	0,09
Cloreto de potássio	0,01	0,10
Calcário dolomítico	0,15	1,50
Total	0,46	4,61

Tabela A11. Estimativa do valor econômico do custo de reposição de nutrientes perdidos com a erosão.

Fertilizantes	Custo de reposição por hectare (R\$)	Custo total de reposição (R\$)
Sulfato de amônio	581,37	5.813,67
Superfosfato simples	19,83	198,26
Cloreto de potássio	30,37	303,70
Calcário dolomítico	35,42	354,23
Total	666,99	6.669,86

Para calcular o Fator LS é necessário medir o comprimento de rampa, a distância vertical e horizontal (Figura A1), seguindo o exemplo:

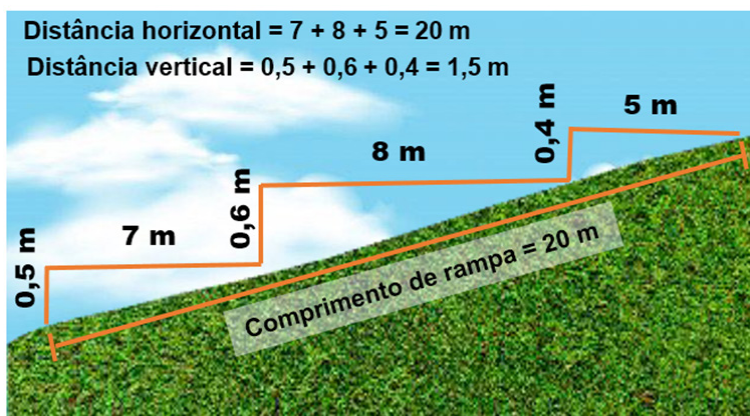


Figura A1. Cálculo de distancias horizontal e vertical para cálculo de rampa.

O produtor indica os valores medidos de comprimento de rampa, distância vertical e horizontal, como exemplo:

Comprimento de rampa: 20,00 m

Distância vertical: 1,50 m

Distância horizontal: 20,00 m

Primeiro o programa calcula:

Declividade: 7,50% observação: dados do exemplo

$$\text{Declividade } (S) = \frac{\text{distância vertical}}{\text{distância horizontal}} \times 100$$

Depois o programa busca o valor do Fator LS na Tabela A12. a partir do comprimento de rampa fornecido e a declividade calculada, como no exemplo:

Importante destacar que caso os valores de comprimento de rampa e declividade não estejam na tabela, deve-se usar o valor mais próximo.

Tabela A12. Valor do Fator LS a partir do comprimento de rampa.

Comprimento de Rampa (m)	Declividade (%)															
	0,5	1	2	3	4	5	8	10	12	14	15	16	18	20	25	30
5	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	1,7	2,51	3,47
10	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	0,8	1	1,3	1,5	1,7	2	2,41	3,55	4,91
15	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,7	1	1,3	1,6	1,8	2	2,5	2,95	4,34	6,01
20	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,8	1,1	1,5	1,9	2,1	2,3	2,9	3,41	5,02	6,94
25	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,9	1,3	1,7	2,1	2,4	2,6	3,2	3,81	5,61	7,76
30	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	1,4	1,8	2,3	2,6	2,9	3,5	4,17	6,14	8,5
35	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	1,1	1,5	2	2,5	2,8	3,1	3,8	4,51	6,64	9,18
40	0,1	0,2	0,2	0,4	0,5	0,6	1,1	1,6	2,1	2,7	3	3,3	4	4,82	7,09	9,81
45	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,2	1,7	2,2	2,8	3,2	3,5	4,3	5,11	7,52	10,4
50	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,3	1,8	2,3	3	3,3	3,7	4,5	5,39	7,93	11
55	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	1,3	1,9	2,4	3,1	3,5	3,9	4,7	5,65	8,32	11,5
60	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,4	1,9	2,6	3,3	3,7	4,1	4,9	5,9	8,69	12
80	0,2	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,6	2,2	3	3,8	4,2	4,7	5,7	6,81	10	13,9
100	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1	1,8	2,5	3,3	4,2	4,7	5,2	6,4	7,62	11,2	15,5
150	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	2,2	3,1	4	5,2	5,8	6,4	7,8	9,33	13,7	19
200	0,3	0,4	0,6	0,8	1,1	1,4	2,5	3,5	4,7	6	6,7	7,4	9	10,8	15,9	21,9

Tabela A13. Cobertura e manejo do solo (Fator CP).

Uso com manejo	Fator CP	Uso com manejo conservacionista	Fator CP
Grãos (*)	0,25	Grãos, rotação (*)	0,2
Algodão (*)	0,62	Grãos, em nível (*)	0,13
Mandioca (*)	0,62	Grãos, rotação, em nível (*)	0,1
Cana-de-açúcar (*)	0,1	Grãos, faixas vegetadas (*)	0,08
Hortaliças (*)	0,5	Grãos, cordões vegetação (*)	0,05
Pastagem degradada (*)	0,25	Grãos, plantio direto (*)	0,03
		Algodão, mandioca, rotação (*)	0,4
		Algodão, mandioca, nível (*)	0,31
		Algodão, mandioca, plantio direto (*)	0,04
Cobertura da terra	Fator C	Cana, em nível (*)	0,05
Cerrado (**)	0,0091	Cana, em faixas (*)	0,03
Solo exposto, casca-lheira (*)	1	Hortaliças, em nível (*)	0,25
		Pastagem com manejo conservacionista (**)	0,0087
		Reflorestamento ralo (*)	0,03
		Reflorestamento denso (*)	0,01

