

ESTOQUE DE CARBONO E ESTABILIDADE DE AGREGADOS DO SOLO EM DIFERENTES USOS DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DA PRATA, BONITO-MS

Karina dos Santos Falcão¹, Elói Panachuki¹, Roniedison da Silva Menezes¹, Elyson Thiago de Souza Florentim¹, Helen Caroline Rodrigues Correa¹, Felipe Das Neves Monteiro²

¹Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Unidade Universitária de Aquidauana, Aquidauana, Brasil. E-mail: karina.falcao@uems.br

²Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural - Agraer - Cepaer, Campo Grande MS, Brasil.

Resumo: A bacia hidrográfica do Rio da Prata, em Bonito-MS, possui elevada importância ambiental e turística. O estudo avaliou a estabilidade de agregados e o estoque de carbono do solo em diferentes usos da terra. Pastagens e áreas florestais apresentaram predominância de macroagregados, indicando maior estabilidade estrutural, enquanto as lavouras apresentaram maior proporção de agregados menores. Os maiores estoques de carbono ocorreram em áreas de pastagem, evidenciando seu potencial na conservação da qualidade do solo.

Palavras-chave: agregação do solo; erosão hídrica; uso do solo.

INTRODUÇÃO

A erosão do solo tornou-se uma das principais preocupações ambientais globais, que causa vários problemas ecológicos e socioeconômicos. As principais causas de erosão induzida pelo homem estão relacionadas a práticas de manejo inadequadas, como o desmatamento, o excesso de preparo do solo e o sobrepastoreio. As mudanças climáticas, com eventos extremos cada vez mais frequentes, têm intensificado esses processos (Farooq et al., 2023).

Novas tecnologias e práticas de manejo conservacionista vêm sendo amplamente propostas como estratégias para mitigar a erosão e promover a sustentabilidade nos sistemas agrícolas. A ausência de conservação adequada do solo acarreta uma redução significativa em sua qualidade, impacta negativamente o rendimento das culturas e compromete a estabilidade dos serviços ecossistêmicos essenciais (Silva et al., 2024; Oliveira Netto et al., 2024). Atualmente, o principal desafio dos sistemas de produção é alcançar a sustentabilidade, buscando novas condições de equilíbrio que minimizem os impactos sobre os recursos naturais (Monteiro et al., 2024).

O preparo intensivo do solo em determinados sistemas de cultivo, como o sistema de preparo convencional (PC), leva à redução na concentração de carbono no solo (Assunção et al., 2019; Muñoz-rojas et al., 2015), favorecido principalmente nos primeiros 10 anos após a conversão de florestas e pastagens nativas em terras agricultáveis (Luo; Wang; Sun, 2010). Estudos recentes sugerem que a agricultura conservacionista, como o sistema plantio direto (PD), pode ajudar a manter ou mesmo a aumentar as concentrações de C no solo (Alavaisha; Manzoni; Lindborg, 2019; Nijmeijer et al., 2019).

Segundo Yao (2020) a estabilidade de agregados é um fator que pode prever a erodibilidade do solo e induz sobre sua qualidade. Solos altamente agregados são menos susceptíveis à alteração e seus fragmentos são menos vulneráveis a desagregação e ao transporte. A manutenção do carbono no solo promove a formação de macroagregados e sua capacidade de resistir à erosão (Dou et al. 2020). No entanto, sistemas de cultivos com revolvimento periódico aumentam a decomposição do carbono ao expor a matéria orgânica fisicamente protegida no interior dos microagregados (Totsche et al. 2017).

A bacia hidrográfica do Rio da Prata, localizada na região da Serra da Bodoquena, destaca-se pela importância ambiental e econômica para o ecoturismo de Bonito-MS, devido à presença de rios de águas cristalinas, elevada biodiversidade e remanescentes de vegetação nativa. Entretanto, a expansão das atividades agropecuárias, especialmente das lavouras de soja e milho, pode alterar os atributos físicos do solo, aumentando sua suscetibilidade à erosão e comprometendo a qualidade dos recursos hídricos. Nesse contexto, a avaliação da estabilidade de agregados, do estoque de carbono e da erodibilidade do solo torna-se fundamental para compreender os impactos do uso da terra e subsidiar estratégias de manejo conservacionista que contribuam para a preservação dos ecossistemas e da atividade turística regional. Diante o exposto, o objetivo desse estudo foi avaliar o estoque de carbon e índice de agregados na bacia hidrográfica do Rio da Prata, em Bonito - MS.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Rio da Prata, MS – Brasil, localizada entre as coordenadas 21° 39' 59" – 21° 15' 59" S, 56° 48' 59" – 56° 12' 59" O (Figura 1). Possui clima Tropical Chuvoso de Savana (Aw) (Koppen, 1948), área de aproximadamente 1.368 km² e 200 a 589 m de altitude. A precipitação média anual é de 1348 mm entre os anos de 1998 a 2018 (Tropical Rainfall Measuring Mission).

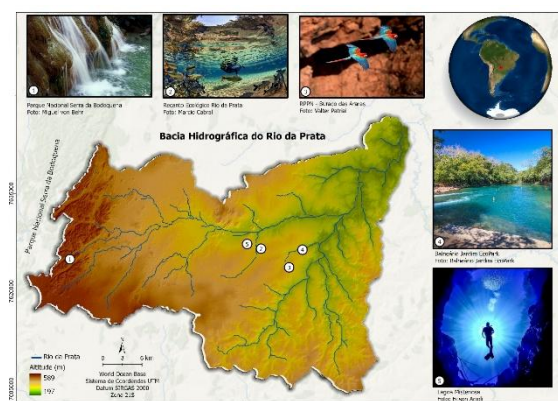


Figura 01. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, em Bonito – MS.

A bacia está inserida no bioma Cerrado, com fitofisionomias de floresta, savana e campestre; apresenta relevo cárstico e diferentes tipos de solos. Inserida nas macrorregiões da bacia sedimentar do Paraná e da bacia do alto rio Paraguai. Possui predominantemente relevo suave ondulado (morros), sendo as altitudes mínima e máxima de 200 e 610 m, respectivamente. Vale ressaltar que as maiores

encostas (superiores a 45%) estão na Serra da Bodoquena (Parque Nacional).

Para seleção das unidades amostrais, selecionamos pontos representativos na bacia hidrográfica do Rio da Prata e que fosse possível o acesso. Para isso, foram selecionados pontos de coleta de solo para os principais tipos de uso do solo na bacia e considerado cada classe de solo. A identificação das classes de solo foi baseada de acordo com o estabelecido pelo IBGE (2019). Os tratamentos são listados abaixo com sua devida caracterização (Figura 02).

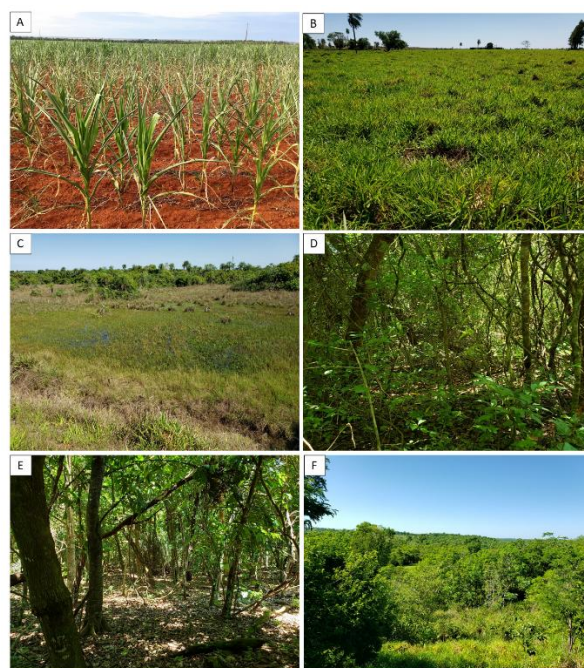


Figura 02. Diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do rio da Prata - MS, Brasil: lavoura (A), pastagem plantada (B), pastagem nativa (C), mata ciliar (D), Cerradão (E) e Cerrado típico (F).

Lavouras (LV): as lavouras são manejadas em sistema de sucessão de cultura: durante o verão com a safra principal temos o cultivo de soja e no inverno (segunda safra) realizado o cultivo de milho. As lavouras estão presentes nos Latossolos (LAVLAT) e Nitossolos (LAVNIT). Também incluímos como tratamento uma área de lavoura em latossolo que foi recém-convertida de pastagem à lavoura (LVRCLAT). A área possui histórico de pastagem, e, quando realizamos as amostragens de solo, havia um ano em que se sucedia como lavoura.

Pastagem Plantada (PP): as áreas com pastagens plantadas predominam na bacia. Estas correspondem às áreas de pasto para atividade pecuária. Por ser o uso mais abrangente, ela está presente em diferentes classes de solos e formou os seguintes tratamentos: Plintossolos (PPPLIN), Chernossolos (PPCHER), Latossolos (PPLAT), e Nitossolos (PPNIT).

Pastagem nativa (PN): as pastagens nativas são representadas pelas gramíneas pertencentes à formação campestre, caracterizada pela fitofisionomia de campo limpo. Sua ocorrência foi predominante em Gleissolos e áreas úmidas na região dos banhados, representadas pela sigla: PNGLEI.

Mata Ciliar (MC): as matas ciliares pertencem às formações florestais e estão no entorno do rio da Prata, abrangendo grande extensão e diferentes tipos de solos. No entanto, devido a impossibilidade de acesso e logística no interior das fazendas, a amostragem de solo foi realizada somente nos Plintossolos (MCPLIN).

Cerradão (CDAO): o cerradão é pertencente à formação florestal e está inserido em áreas de Latossolos (CDAOLAT). Possui estrato arbóreo denso, com muitas espécies do cerrado típico, com altura média de 10 metros. Como é a cobertura florestal com maiores indícios de conservação entre os demais sistemas, o CDAOLAT foi escolhido como o sistema referência aos atributos do solo.

Cerrado típico (CDO): Pertencente a formação de savana e fitofisionomia do cerrado típico, foram identificadas em Argissolos (CDOARG) e Cambissolos (CDOCAMB). Apresenta árvores intermediárias espalhadas e alguns arbustos.

As análises de agregados foram realizadas através da retirada de blocos de solo em sua estrutura natural, que após secos ao ar, foram passados em peneiras de 9,52 e 4,76 mm, com continuidade aqueles agregados retidos na peneira de 4,76 mm. Para esses agregados, realizamos o peneiramento úmido durante 15 minutos, em jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,250 e 0,105 mm, dentro de um agitador de Yoder com água e quantificamos a porcentagem de agregados em cada classe de peneira. Como índice de agregados, adotamos o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP) seguindo a proposta de Kemper & Rosenau (1986). Os agregados foram separados em: macroagregados quando retidos nas peneiras de 2 mm; mesoagregados quando intermediários (>2 mm e superior a 0,5 mm) e microagregados quando retidos nas peneiras inferiores a 0,5 mm.

Para as análises de carbono orgânico total (COT), realizamos a coleta de amostra deformada e determinamos o COT por meio da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio, em meio sulfúrico sob aquecimento, e titulado com sulfato ferroso amoniacal (Yeomans; Bremner, 1988).

O Estoque de Carbono (EstCOT) foi calculado pelo método da massa equivalente (Reis *et al.*, 2018; SIGNOR *et al.*, 2014). Os teores de matéria orgânica do solo (MOS) foram obtidos indiretamente, pela

multiplicação do fator 1,724 pelo COT (método Walkley-Black).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os macroagregados (>2mm) predominaram nos tratamentos florestais e pastagens, com retenção superior a 70% (Figura 03). Em áreas de Plintossolos, a pastagem foi mais eficiente que a mata ciliar em relação a formação e estabilização dos macroagregados. As lavouras diferiram dos demais tratamentos, restando a menor porcentagem de macroagregados, representando a pior condição de agregação do solo entre as áreas avaliadas. Nas lavouras ocorreram a maior distribuição entre os mesoagregados (< 2,0 e > 0,25 mm). A LVLAT apresentou a maior porcentagem de microagregados (>0,25 mm), seguido pela LVNIT.

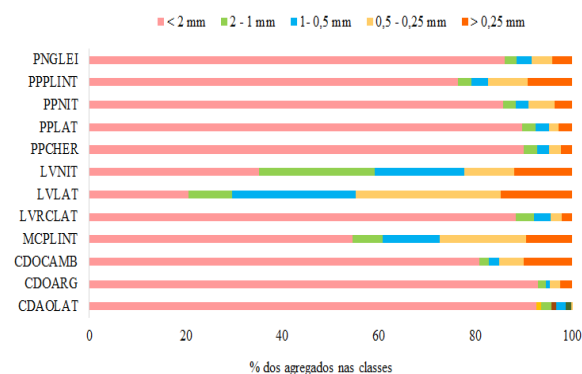


Figura 03. Distribuição percentual dos agregados do solo nas diferentes classes de peneiras nos diversos tratamentos, na bacia hidrográfica do rio da Prata - MS, Brasil.

A predominância de macroagregados é importante para manutenção do carbono no solo. Os macroagregados fornecem proteção física mínima enquanto os microagregados são responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. No entanto, os microagregados são formados no interior dos macroagregados e qualquer processo que interrompa a macroagregação também afetará os microagregados (Fultz *et al.*, 2013; Totsche *et al.*, 2017) e a manutenção de carbono a longo prazo. Em solos agrícolas geralmente predominam frações de agregados < 0,5 mm, enquanto sob florestas e pastagens > 0,5 mm (Dou *et al.*, 2020), o que resulta do preparo excessivo do solo a longo prazo.

Segundo De Almeida *et al.* (2016) as pastagens, quando adequadamente manejadas, são eficientes no controle da erosão por proporcionar elevada cobertura do solo e sua contribuição na formação de agregados maiores e com boa estabilidade física. Loss *et al.* (2012) observaram redução no tamanho de agregados do solo em áreas de pastagens com estágio



de degradação avançado comparadas a áreas nativas. O manejo adequado da pastagem é primordial para a manutenção da qualidade edáfica.

Durante o crescimento da vegetação, as raízes penetram no solo gradualmente e liberam exsudatos que irão aderir às partículas do solo, aumentando as forças de Van der Waals e reduzindo a erodibilidade (Wang et al., 2018). Além disso, esses exsudatos também podem ser convertidos em matéria orgânica, que melhoram as atividades dos microrganismos e promove a formação de agregados no solo (Six et al., 2004). Gyssels et al. (2005) verificaram a redução nas perdas de solo em áreas com presença de cobertura vegetal, não somente pela biomassa acima do solo, mas também pela ação das raízes que afetam as propriedades físicas do solo.

O estoque de carbono foi maior nos tratamentos com pastagens (Tabela 1). O CDAOLAT foi o sistema utilizado como referência por apresentar maior condição de conservação em sua mata. As florestas e lavouras apresentaram condições semelhantes. Embora a PNGLEI tenha o maior teor de COT, não resultou em maior EstCOT devido à baixa densidade do solo, assim como MCPLINT. O efeito da conversão do uso do solo nos tratamentos em Latossolos foram verificados no EstCOT.

Tabela 1. Carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (EstCOT) nos diversos tratamentos, na bacia hidrográfica do rio da Prata - MS, Brasil.

Tratamentos	COT g kg ⁻¹	EstCOT Mg ha ⁻¹
CDAOLAT	14,16 c	16,37 d
CDOARG	16,37 c	21,44 c
CDOCAMB	10,75 d	13,04 d
MCPLINT	32,11 b	18,61 c
LVRCLAT	20,59 c	33,02 a
LVLAT	07,05 d	14,43 d
LVNIT	17,20 c	21,04 c
PPCHER	16,26 c	36,81 a
PPLAT	16,12 c	37,66 a
PPNIT	29,34 b	28,17 b
PPPLINT	06,61 d	12,35 d
PNGLEI	39,25 a	27,57 b
CV%	19,67	17,16

Letras distintas nas colunas diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo teste de Scott-Knott.

As diferenças no estoque de carbono entre as florestas podem ser justificadas pelas diferenças na comunidade vegetal, baixo aporte de serapilheira e qualidade da matéria orgânica em cada superfície (Moreira et al., 2021), que resultou em menor estoque de carbono quando comparada com as

pastagens nativas e plantadas. Áreas em ambiente de várzea como PNGLEI apresentam alta capacidade em estocar carbono, isso porque seus solos são resilientes as variações temporárias de secagem e umidade (Wiesmeier et al., 2019), o que representou uma erodibilidade semelhante aos sistemas florestais.

As três diferentes fitofisionomias florestais resultaram em diferenças no EstCOT. Os solos em que essas coberturas florestais estão inseridas interferem na sua capacidade em reter carbono. Para Wiesmeier et al. (2019) o armazenamento de carbono está fortemente ligado ao tipo de solo, condições climáticas, biota e sistema de manejo. Embora o CDAOLAT foi o sistema utilizado como referência, nele não se constatou o maior EstCOT, sendo semelhante ao CDOCAMB.

CONCLUSÃO

Os diferentes usos da terra influenciaram significativamente a estabilidade dos agregados e o estoque de carbono do solo na bacia hidrográfica do Rio da Prata. Os sistemas florestais e as pastagens apresentaram predominância de macroagregados, indicando maior estabilidade estrutural e melhor qualidade física do solo. Em contrapartida, as áreas de lavoura apresentaram maior proporção de agregados menores, evidenciando alterações na estrutura do solo decorrentes do manejo agrícola.

Os maiores estoques de carbono foram observados em áreas de pastagens plantadas e nativas, demonstrando a importância desses sistemas na manutenção e no acúmulo de carbono no solo. Além disso, verificou-se que o armazenamento de carbono não depende exclusivamente da cobertura vegetal, mas também das características intrínsecas de cada classe de solo.

Os resultados reforçam a importância da adoção de práticas conservacionistas e do manejo adequado dos sistemas produtivos para promover a estabilidade dos agregados, a conservação do carbono e a manutenção da qualidade dos solos. Na bacia hidrográfica do Rio da Prata, esses atributos assumem papel estratégico para a preservação dos recursos naturais e da qualidade das águas, elementos fundamentais para a sustentabilidade ambiental e para a atividade turística da região de Bonito-MS.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS



- ALAVAISHA, E.; MANZONI, S.; LINDBORG, R. Different agricultural practices affect soil carbon, nitrogen and phosphorous in Kilombero-Tanzania. *Journal of Environmental Management*, v. 234, p. 159-166, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.039>
- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 658, p. 901-911, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.271>
- DE ALMEIDA, W. S. et al. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 51, p.1110-1119, 2016. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900010>
- DOU, Y. et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China. *Catena*, v. 185, p. 104294, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104294>
- Farooq, O. et al. (2023). Causes of Soil Erosion, Its Measurements, and Management. In: Ahmed, M., Ahmad, S. (eds) *Disaster Risk Reduction in Agriculture. Disaster Resilience and Green Growth*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1763-1_11
- FULTZ, L. M. et al. Organic carbon dynamics and soil stability in five semiarid agroecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 181, p.231-240, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.004>
- GYSEL, G. et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical geography*, v. 29, n. 2, p. 189-217, 2005. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra>
- JIANG, Q. et al. Spatial pattern of soil erodibility factor (K) as affected by ecological restoration in a typical degraded watershed of central China. *Science of The Total Environment*, v. 749, p. 141609, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141609>
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.425-442. Agronomy 9.
- KOPPEN, W. P. *Climatologia*. México, DF: Fundo de Cultura Econômica, 1948. 478 p.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Densidade e fertilidade do solo sob sistemas plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 55, n. 4, p. 260-268, 2012.
- LUO, Z.; WANG, E.; SUN, O. J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 139, n. 1-2, p. 224-231, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.08.006>
- MONTEIRO, R. C. et al. Impact of a forage legume or nitrogen fertilizer application on ammonia volatilization and nitrous oxide emissions in *Brachiaria* pastures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 48, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240012>
- MOREIRA, C. et al. Biochemical activity and microbial biomass in wetlands (Vereda) and well-drained soils under native vegetation types in Brazilian Cerrado. *Applied Soil Ecology*, 2021. v. 160, p. 103840. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103840>
- MUÑOZ-ROJAS, M.; JORDÁN, A.; ZAVALA, L. M.; DE LA ROSA, D.; ABD-ELMABOD, S. K.; ANAYA-ROMERO, M. Impact of land use and land cover changes on organic carbon stocks in Mediterranean soils (1956–2007). *Land Degradation & Development*, v. 26, n. 2, p. 168-179, 2015. <https://doi.org/10.1002/ldr.2194>
- NIJMEIJER, A.; LAURI, P. É.; HARMAND, J. M.; SAJ, S. Carbon dynamics in cocoa agroforestry systems in Central Cameroon: afforestation of savannah as a sequestration opportunity. *Agroforestry Systems*, v. 93, n. 3, p. 851-868, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0182-6>
- OLIVEIRA NETTO, A. J. J. G. F. et al. Cropping and soil management systems effects on soil organic matter fractions in diversified agricultural fields in the Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 48, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240017>
- REIS, V. R. R. et al. Carbon stocks and soil organic matter quality under different of land uses in the maranhense amazon. *Journal of Agricultural Science*, v. 10, n. 5, p. 329-337, 2018. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n5p329>
- SILVA, P. L. F. et al. Cover crops influence the physical hydric quality of a tropical sandy soil under no-tillage cotton cropping. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 48, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240026>



- SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- TOTSCHKE, K. et al. Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 181, n. 1, p. 104-136, 2017. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>
- WANG, B. et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 266, p. 68-75, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.016>
- WISCHMEIER, Walter H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. 1971.
- WIESMEIER, M. et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-a review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, v. 333, p. 149-162, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- YAO, Y. et al. Responses of soil aggregate stability, erodibility and nutrient enrichment to simulated extreme heavy rainfall. *Science of The Total Environment*, v. 709, p. 136150, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136150>
- YEOMANS, A.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communication Soil Science Plant Analysis*, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>