



# Processos Erosivos do Solo

Erosão em sulcos

---

Lavras, Minas Gerais  
Dezembro de 2022

---

Conservação do Solo e da Água  
PCS502

Marcelo Mancini  
Doutorando em Ciência do Solo



## Introdução

A erosão não é fenômeno novo. É um lento processo natural responsável por esculpir as paisagens continentais ao longo de milhões de anos. Entretanto, a capacidade do homem em intervir na paisagem através de suas práticas agrícolas acelera a erosão, tornando-a potencialmente um problema grave. Terras originalmente férteis podem lenta ou rapidamente tornarem-se estéreis, a depender dos cuidados adotados quanto ao seu uso.

A perda da capacidade produtiva é problema sério e antigo, historicamente responsável pela queda de civilizações inteiras. Desertos ao redor do mundo, como os ao norte da China, na antiga Pérsia (hoje Irã), norte da África e antiga Mesopotâmia (hoje Iraque) são evidências de tal passado, resultado do uso desenfreado do solo sem os devidos cuidados, causando seu esgotamento em longo termo. (BERTONI; NETO, 2017).

Não obstante o conhecimento obtido sobre processos erosivos ao longo dos séculos, a problemática da erosão não é menos grave atualmente. No início do século XX, estima-se que 1,6 bilhões de humanos habitavam o planeta. Ao final do século, a população ultrapassara 6 bilhões (LUTZ; QIANG, 2002). O grande crescimento populacional impulsionou a demanda por alimentos, que por consequência promoveu grande intensificação das práticas agrícolas (PIMENTEL *et al.*, 1995, STOATE *et al.*, 2001). Naturalmente, é crescente a necessidade de estudos sobre os fenômenos erosivos para a criação de práticas conservacionistas capazes de mitigá-los em meio à elevada demanda.

A erosão do solo pode ser causada pelo vento, mas aquela causada pela água a mais intensa e danosa à sustentabilidade de sistemas agrícolas. Classicamente, a erosão hídrica é classificada quanto à sua forma de ocorrência. Quando finas camadas são removidas da superfície, diz-se que a erosão é **laminar**; quando pequenos canais de escoamento preferencial são formados, denomina-se de erosão **em sulcos**; quando os canais se alargam e aprofundam-se demasiadamente, dá-se o nome de **voçoroca** (BERTONI; NETO, 2017). Outras formas existem, mas estas três são as mais comuns em propriedades rurais.

Enquanto a erosão laminar é perigosa por ser de difícil detecção, quando formam-se canais capazes de direcionar e concentrar o fluxo da água, aumenta grandemente a energia com a qual a mesma carrega as partículas do solo (LIYING *et al.*, 2013). Tais canais, ou sulcos, não apenas são capazes de remover nutrientes do solo, se não devidamente tratados, podem aprofundar-se e evoluir para grandes cavidades, chamadas de voçorocas, cujo dano pode ser irreparável (OU *et al.*, 2021).

A erosão em sulcos é, portanto, o começo do agravamento da erosão hídrica do solo. O estágio inicial de severa degradação da propriedade rural. É sinal de convergência do fluxo da água, de aumento na velocidade da degradação do solo. O objetivo deste trabalho foi prover uma revisão sobre o processo de erosão hídrica em sulcos no mundo. Foi buscar na literatura o atual conhecimento sobre o tema. A seguir está apresentada uma compilação sobre os avanços obtidos e desafios enfrentados quanto às definições, tecnologias de monitoramento e métodos de mitigação do processo de sulcamento do solo.

## Mecanismo de formação da erosão em sulcos

A erosão se inicia quando a força na enxurrada ultrapassa a resistência do solo, ou seja, quando a energia da água é maior que aquela responsável por segurar as partículas de solo nos agregados. A teoria mais aceita indica que os sulcos, especificamente, iniciam-se a partir de quebras de relevo, ou *knickpoints* (MERZ; BRYAN, 1993).

Nenhuma superfície é inteiramente plana. Toda porção da paisagem possui pequenas variações locais, o microrelevo. A água que recai sobre tal rugosidade não escoar de modo

uniforme e tende a convergir com o tempo, aumentando sua energia cinética e capacidade de remoção de partículas. No ponto de convergência formam-se os *knickpoints*, cavidades mais acentuadas no microrelevo, que denotam o começo da formação dos sulcos (OU *et al.*, 2021). Posteriormente, a energia cinética que converge nos *knickpoints* alargam e aprofundam a cavidade aceleradamente ao longo da encosta, dando origem aos sulcos (Figura 1).



Figura 1: Exemplo de formação de um *knickpoint* e subsequente desenvolvimento de sulco em experimento em laboratório. Adaptado de Merz *et al.* (1993).

## Fatores determinantes

Apesar do simples conceito geral sobre o mecanismo de formação, as interações responsáveis pela formação dos sulcos não são dependentes apenas do microrelevo e do escoamento da água. Em realidade, agem em conjunto diferentes fatores que podem fazer da área mais ou menos propícia à expressar este tipo de erosão. Em especial, atributos do solo, topografia, organismos e uso antrópico submetidos à intensidade e frequência das chuvas determinam a criação dos sulcos. É importante relevar que muitos outros fatores podem afetar a formação de sulcos; os citados e elaborados abaixo são aqueles que merecem atenção especial.

### Atributos do solo

Para a formação de sulcos é necessário que a água esco superficialmente com energia suficiente para superar a resistência do solos à erosão e criar canais de escoamento preferencial. Solos com estrutura muito resistente à desagregação, mais coesos ou que possuem infiltrabilidade muito boa são menos propensos à formarem sulcos. Naturalmente, a textura e mineralogia são fatores importantes a serem considerados. Ambos influenciam na estabilidade dos agregados e na infiltrabilidade do solo; portanto, em sua susceptibilidade à erosão (PAYKOY; HAWLEY, 2015).

A textura é relevante pois partículas maiores possuem menor área específica e, por consequência, interagem menos entre si. Possuem maior volume poroso entre-partículas, mas são pouco coesas pela baixa área superficial e logo formam estruturas fracas, facilmente carregadas. Partículas mais finas, com a argila, são mais facilmente carregadas, porém podem formar estruturas mais coesas, difíceis de serem carregadas (YUDINA *et al.*, 2022).

O que determina o comportamento das argilas é sua mineralogia (TOTSCHKE *et al.*, 2018). Argilas nas quais predominam minerais menos intemperizados (e.g., montmorilonita, vermiculita) se dispersam em água, podem ser expansivas, e portanto foram, em geral, estruturas menos resistentes à desagregação, sendo mais susceptíveis à erosão (BRADFORD; BLANCHARD, 1999). Em contrapartida, argilas ricas em óxidos de ferro e alumínio desenvolvem estruturas mais resistentes, o que ocorre tipicamente em solos intemperizados comuns no Brasil (Latossolos e alguns Argissolos) (LIYING *et al.*, 2013).

O poder floculante dos óxi-hidróxidos de ferro alumínio pode resultar em estrutura arredondada e muito estável, conferindo ao solo grande volume poroso, infiltrabilidade e, ao mesmo tempo, resistência à desagregação (YUDINA *et al.*, 2018). É a chamada estrutura granular, comum em Latossolos Vermelhos quando ricos em gibbsita. Um atributo útil para indicar a mineralogia é a *atividade da argila* (BERTOL; MARIA; SOUZA, 2019). Solos com valores acima de  $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  são considerados solo com argila de alta atividade; valores abaixo, solos com baixa atividade (SANTOS *et al.*, 2018). Como referência, valores comuns para solos intemperizados no Brasil variam entre 3 e  $5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Em geral, estruturas bem desenvolvidas e de consistência firme indicam mineralogia mais intemperizada, menos susceptível a processos erosivos (BERTOL; MARIA; SOUZA, 2019). Solos que apresentam-se arenosos ou muito argilosos, porém com caráter expansivo quando úmidos, ou de estrutura muito fracamente desenvolvida, pouco consistente ou maciça, são solos que apresentam mineralogia menos intemperizada, sendo mais erodíveis.

## Topografia

Através do impacto das gotas de chuva a água desagrega as partículas de solo e, pela formação de enxurradas, as partículas são transportadas. Naturalmente, parâmetros topográficos influenciam na velocidade com a qual a água escoar e portando na energia que a mesma possuirá para erodir o solo. Atributos topográficos como declividade, comprimento e tamanho da encosta relacionam-se diretamente com a erodibilidade do solo (WISCHMEYER; SMITH, 1978).

Apesar da energia do impacto das gotas ser o principal agente erosivo, no caso da erosão em sulcos o escoamento superficial possui destaque. É a enxurrada, submetida à rugosidade do relevo, que converge e canaliza a água, potencializando seu poder erosivo pela criação de sulcos que podem evoluir para voçorocas. O comprimento da encosta é, portanto, um fator importante no processo de formação de sulcos. Quanto maior o caminho da água na encosta, maior a chance de convergência do escoamento e sua energia cinética, resultando em mais *knickpoints* e, consequentemente, em mais sulcos.

A declividade também influencia significativamente nos processos erosivos. Maior declividade implica em maior velocidade da água em menores distâncias, naturalmente intensificando o sulcamento. Porém, estudos demonstram que, em conjunto com a declividade, a rugosidade do relevo possui papel chave na erosão em sulcos. Römken *et al.* (2002) testou em laboratório, sob chuva simulada, o sulcamento em solos configurados com diferentes rugosidades em três declividades: 2%, 8% e 17%. As duas maiores declividades apresentaram maior perda de solo

e sulcamento. Entretanto, o fator mais influente fora a rugosidade da superfície. Superfícies mais rugosas apresentaram densidade de canais muito inferior, ou seja, escoamento muito mais concentrado e com maior poder erosivo (Figura 2).

Alguns estudos também apontam para o efeito da direção da encosta, denominada de *aspecto* do relevo. A depender da direção dos ventos, a chuva preferencialmente cairá em certas direções mais que em outras. A concentração de chuvas em faces determinadas do relevo promove sulcamento mais intenso onde há maior incidência da chuva. Beullens *et al.* (BEULLENS; VAN DE VELDE; NYSSSEN, 2014) observou na Bélgica e ao norte da França que a ocorrência de sulcos é maior nas faces sudoeste e oeste do relevo. A explicação dos autores é que ventos de sudoeste são dominantes na região noroeste da Europa, trazendo chuva do Oceano Atlântico, causando potencial erosivo maior na direção preferencial do vento. É mais uma confirmação da forte interação entre atributos topográficos e os fenômenos erosivos. Os autores também citam influência potencial da declividade e, do assunto a seguir, da cobertura vegetal (BEULLENS; VAN DE VELDE; NYSSSEN, 2014).

## Organismos

Como dito anteriormente, a energia cinética do impacto da gota da chuva e da enxurrada ao longo da encosta são fatores determinantes da erosão em geral, em especial a energia do escoamento superficial ao longo da encosta no caso da formação de sulcos. Quando tal energia ultrapassa a resistência do solo, as partículas desagregam-se e são transportadas relevo abaixo. Os organismos do solo protegem-no contra este processo, atuando principalmente em três frentes: na dissipação da energia do impacto das gotas e do escoamento, no aumento da resistência do solo à desagregação e na melhora da capacidade de infiltração. Os dois últimos devido ao aporte de matéria orgânica.

A importância da cobertura do solo é expressa em diversos modelos de erosão, inclusive no mais popular: a Equação Universal de Perda de Solo –*USLE*– através do fator *C* (VRIELING, 2006, WISCHMEYER; SMITH, 1978). É quase intuitivo entender que a presença de cobertura vegetal protege o solo do efeito da chuva. A biomassa dissipa a energia do impacto da chuva que atingiria diretamente o agregado e serve de barreira para a enxurrada, diminuindo sua velocidade.

Entretanto, além do efeito macroscópico, a presença de vegetação aumenta a biomassa do sistema, elevando a atividade microbiana. O aumento do teor de matéria orgânica no solo ajuda na prevenção do sulcamento (TOTSCHKE *et al.*, 2018). A matéria orgânica promove maior agregação em forma de macro-agregados com alta porosidade (OU *et al.*, 2021). Elevam tanto à resistência à desagregação como a infiltrabilidade, retardando a canalização do escoamento e, portanto, a formação de sulcos.

## Uso antrópico

A principal importância do estudo de processos erosivos, por definição de ocorrência natural, é justamente aprender como reduzir os impactos do uso antrópico do solo. Para tanto, é necessário entender tanto os mecanismos da erosão acelerada, como a natureza do impacto em si. O impacto mais recorrente deriva do preparo incorreto do solo sem o uso de práticas conservacionistas.



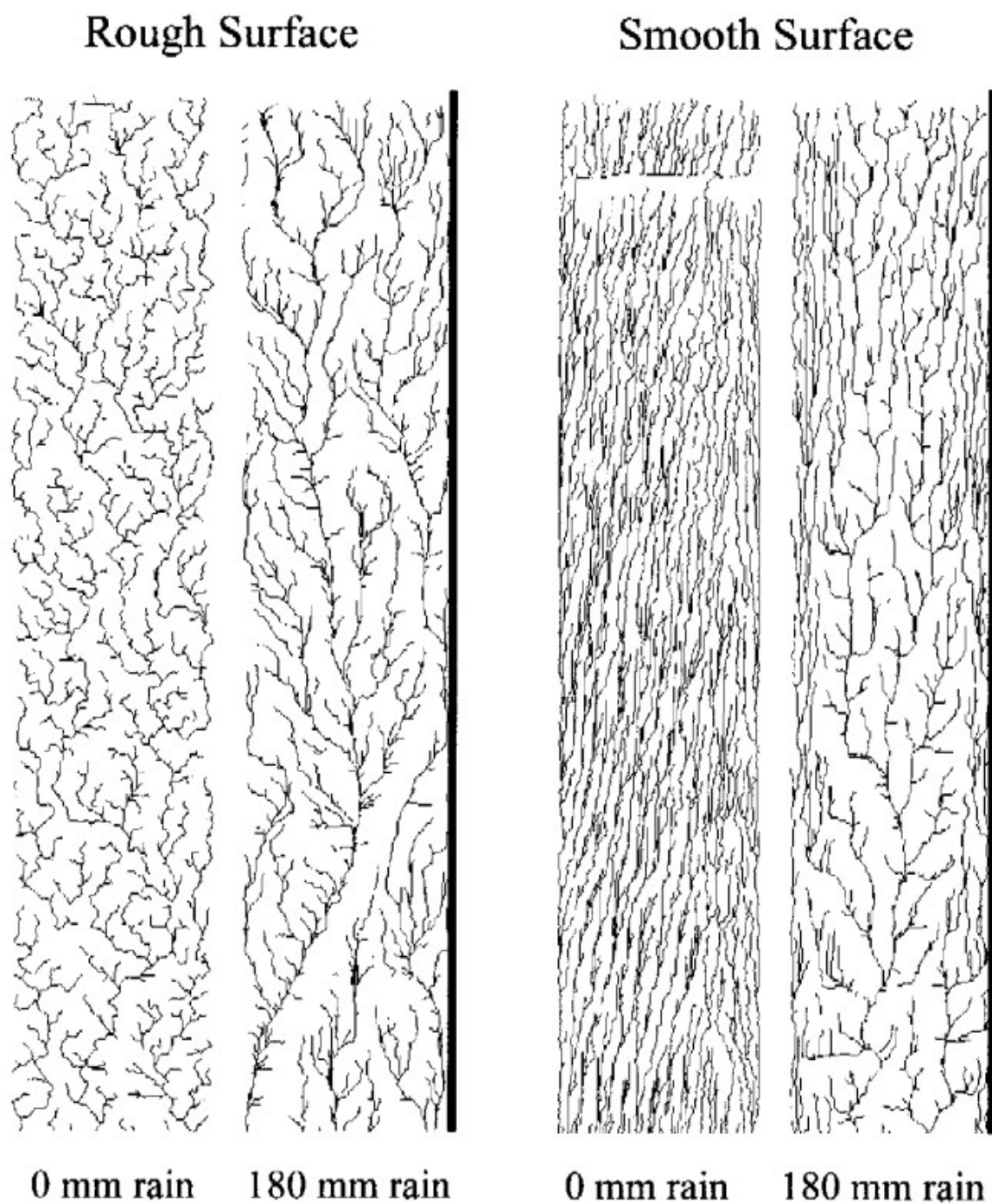


Figura 2: Canais formados em superfície rugosa e plana após chuva de 180 mm sob declividade de 8%. Adaptado de Römken *et al.* (2002).

Yudina *et al.* (YUDINA *et al.*, 2022) realizou a tomografia de agregados de floresta e solo arado e observou que nos solos de floresta os agregados possuem volume muito mais elevado de poros muito menores (microagregação interna) (Figure 3). Tais propriedades conferiram ao solo de floresta estabilidade maior em água, ou seja, maior resistência à dispersão em água e consequente erosão do agregado.

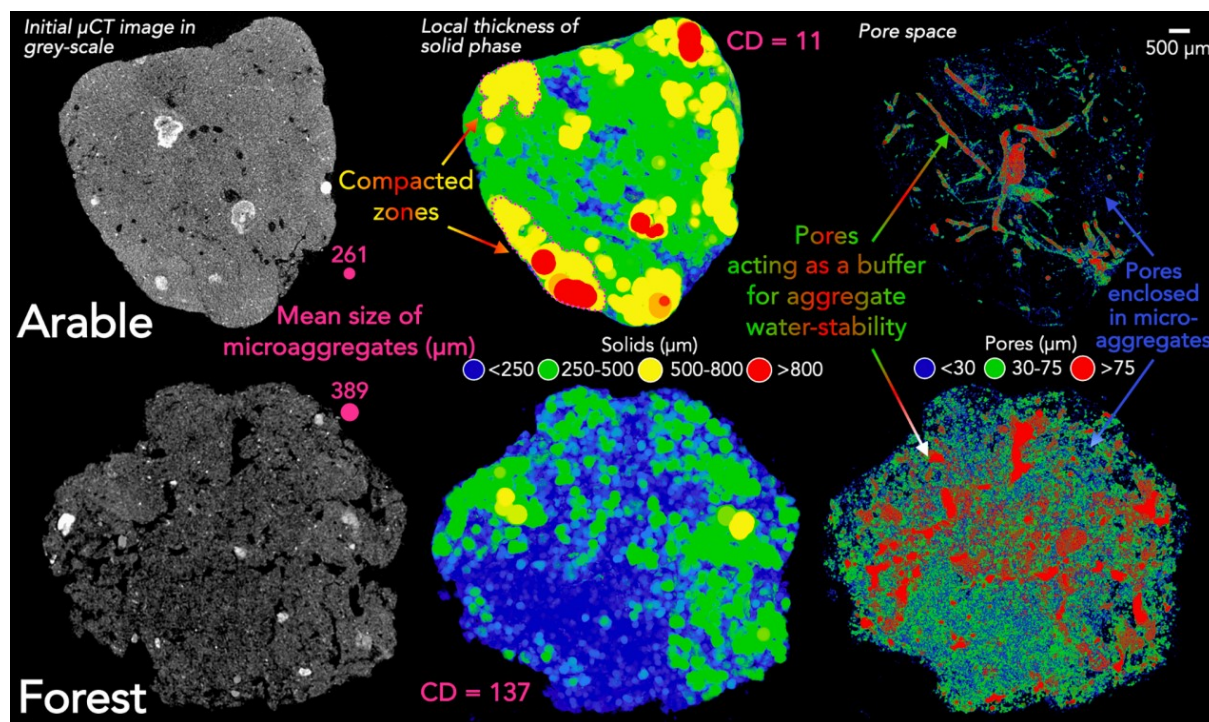


Figura 3: Arquitetura interna de agregados de solos arados (acima) e de floresta (abaixo) por microtomografia de raios-X. À esquerda, partes cinzas representam sólidos; partes escuras, poros. Ao centro, representação da fase sólida representada por esferas. À direita, espaços porosos em 3D. Adaptado de Yudina *et al.* (2022).

Além do efeito na agregação do solo, o preparo do solo afeta a rugosidade da superfície (VIDAL VAZQUEZ *et al.*, 2010, ZHANG, Q. *et al.*, 2014). Como mencionado em seção anterior, a rugosidade da superfície é um dos fatores mais determinantes no desenvolvimento de sulcos (RÖMKENS; HELMING; PRASAD, 2002) (Figura 2). Estudos mostram claramente a maior propensão à formação de sulcos em solos arados (Figura 4). Zhao *et al.* (2018) observou que o preparo do solo em linhas de contorno ou em sulcos diminui inicialmente o escoamento superficial; porém, favorece a formação de sulcos, que intensificam o processo erosivo.

## Medição da erosão em sulcos

### Parâmetros a serem medidos

Depois de formado o *knickpoint*, a água não apenas carva o canal com maior intensidade, a pequena depressão que deu início ao sulco cede e migra para cima, formando novos canais tributários com novos *knickpoints* (Figura 5), que posteriormente se unem. Forma-se, então, uma



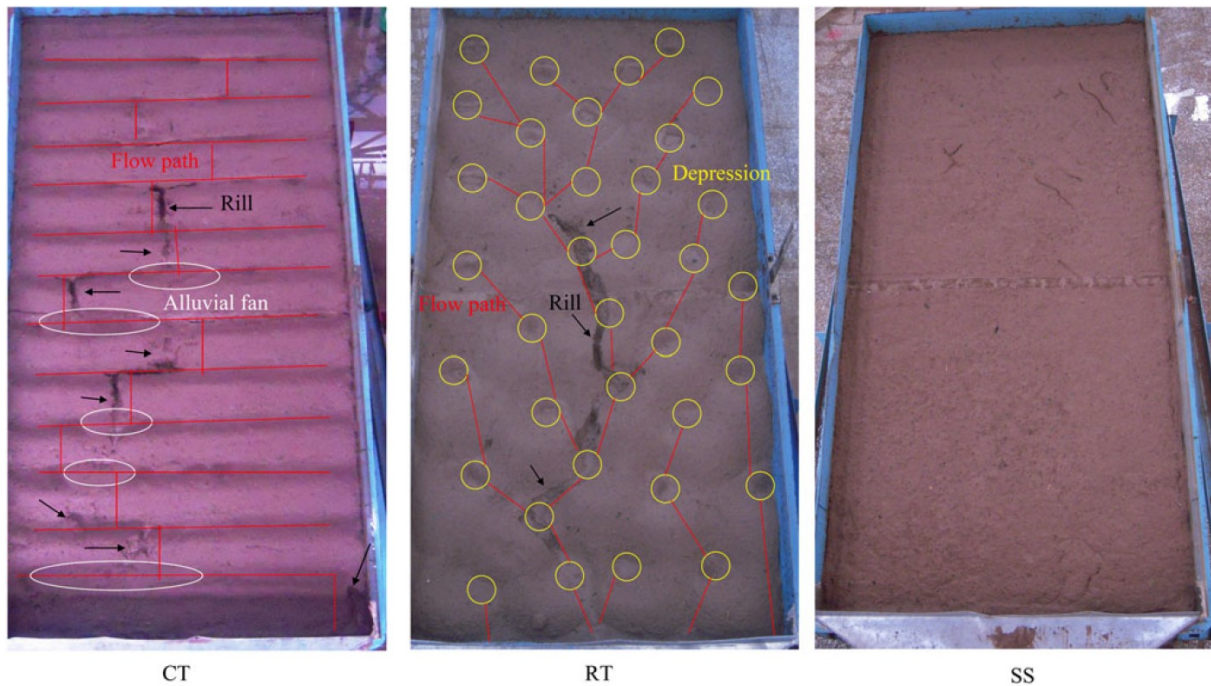


Figura 4: Efeito de diferentes tipos de preparo do solo na formação de sulcos. CT = plantio em linha; RT = plantio em sulcos; SS = superfície plana. Adaptado de Zhao *et al.* (2018).

rede de canais complexa (BRUNTON; BRYAN, 2000). A interação é complexa entre os diversos fatores que determinam a formação, desenvolvimento e morfologia de tais redes de canais.

As redes de sulcos funcionam como miniaturas de um sistema de drenagem em uma bacia (OU *et al.*, 2021). São usados, principalmente, parâmetros hidráulicos e morfológicos para mensurar as redes de drenagem, em conjunto com os fatores determinantes explicitados nas seções anteriores.

Os parâmetros hidráulicos mais comuns no estudo de sulcos são a velocidade média do escoamento ( $V$ ), o número de Froude ( $Fr$ ), que define a influência da gravidade no escoamento; o número de Reynolds, que indica o padrão laminar ou turbulento de escoamento ( $Re$ ); e a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), que mede a força de fricção da água no caminho em que escoar (Equações 1, 2, 3 e 4).

$$V = \alpha V_s \quad (1)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (3)$$

$$\tau = \rho ghS \quad (4)$$

Onde:  $\alpha$  é o fator de correção e  $V_s$  é velocidade de escoamento da superficial (Equação 1);  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h$  é a profundidade do escoamento (Equação 2);  $R$  é o raio hidráulico



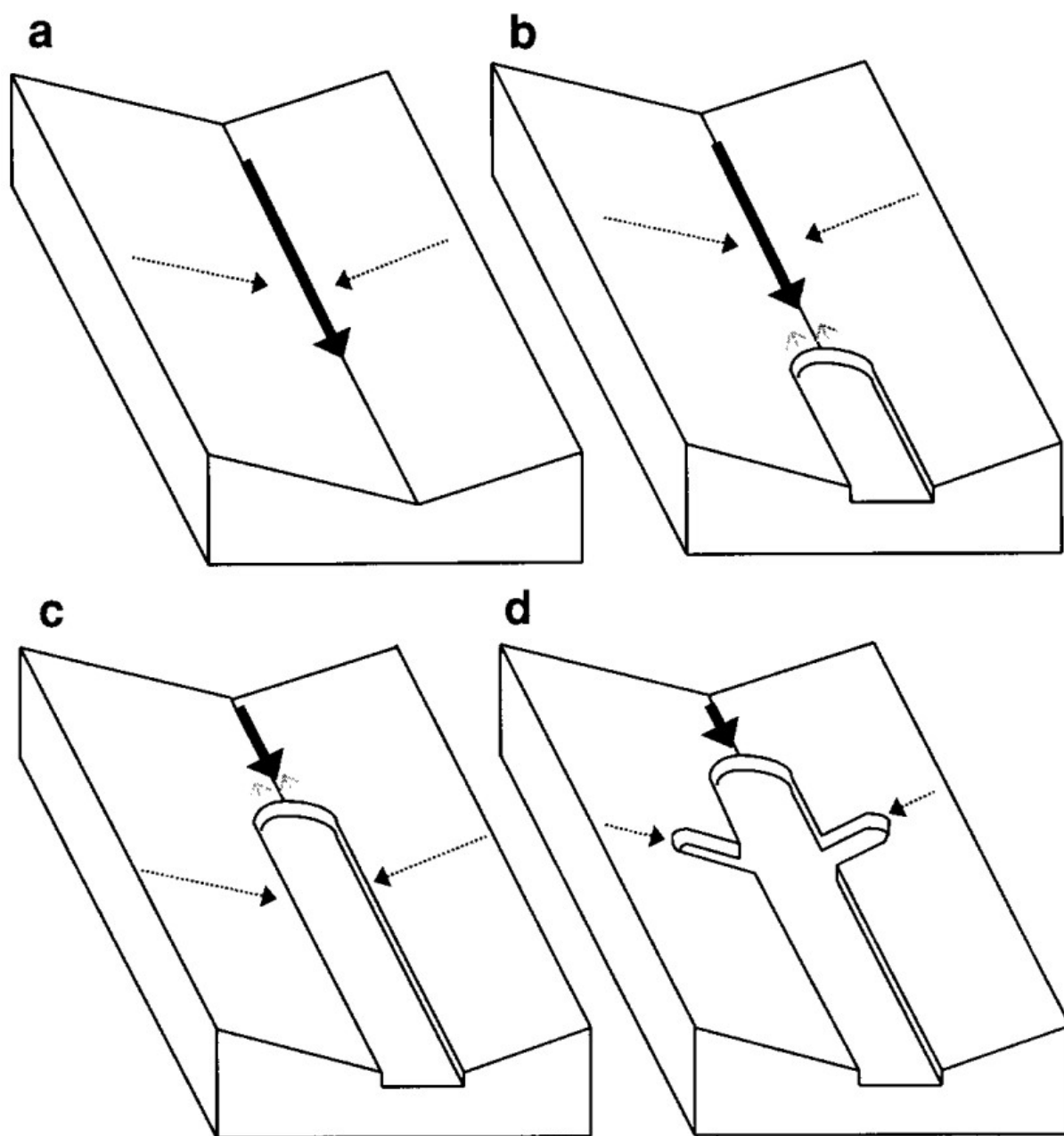


Figura 5: Formação de uma rede de sulcos. a) confluência da água de diferentes regiões tributárias para uma depressão central; b) força de cisalhamento da água ultrapassa o limite crítico e cria uma depressão (*knickpoint*); c) canal formado desaba e retrocede morro acima, ultrapassando o ponto de confluência do escoamento trinutário; d) novos *knickpoints* se formam, dando origem à novos canais que se unirão formando uma rede. Adaptado de Brunton *et al.* (2000).

e  $v$  o coeficiente de viscosidade (Equação 3);  $\rho$  é a densidade da água e  $S$  o seno da declividade (Equação 4).

Quanto à morfologia, muitos autores descrevem serem importantes os parâmetros: comprimento, largura e profundidade dos sulcos, área da seção transversal, densidade de sulcos, grau de dissecamento, e complexidade das redes (BERGER *et al.*, 2010, BEWKET; STERK, 2003, BRUNO; DI STEFANO; FERRO, 2008, QIN *et al.*, 2018, RAN *et al.*, 2018, ZHANG, Pan *et al.*, 2016). Estes são apenas alguns dos muitos parâmetros testados para modelar a formação, desenvolvimento e perda de solo causada pelos sulcos.

## Tecnologias para a medição

A medição dos diversos parâmetros pode ser realizada por diversos métodos: dos mais simples e fáceis de operar, aos mais tecnologicamente avançados, de custo maior. Dentre os mais simples pode-se citar a fitas métricas e perfilômetros (Figura 6). São equipamentos usados para medir-se a área das seções transversais, comprimentos e larguras, de modo a obter os aspectos morfológicos dos sulcos [CASALÍ *et al.* (2006)]. Operacionalmente são fáceis de se utilizar e o custo é baixo, mas o processo é laborioso e menos preciso (OU *et al.*, 2021).



Figura 6: Exemplo de medições de parâmetros de um sulco utilizando fitas métricas e perfilômetros. Adaptado de Casalí *et al.* (2006).

Hoje outros métodos mais avançados existem. Um exemplo é o escaneamento a laser. Equipamentos a laser usam a distância e ângulo entre a emissão e recepção dos raios para medir a posição de um grande número de pontos (*point cloud*). As medições possuem alta resolução: Vinci *et al.* (2015) obteve resolução de  $0.02 \times 0.02$  m ( $4 \text{ cm}^2$ ) utilizando este método para medir sulcos. Em contrapartida, o método é caro e o processamento dos dados não é simples. O estudo de Vinci *et al.* (2015), por exemplo, resultou em 35 milhões de pontos (Figura 7).

Outros métodos mais recentes e populares incluem a medição dos sulcos através de veículos aéreos, seja por aerofotogrametria ou por veículos aéreos não tripulados (VANTs) (ELTNER *et al.*, 2015). Os VANTs, especificamente, possuem a vantagem de serem flexíveis, podendo sobrevoar à alturas variáveis, a depender da necessidade. São altamente precisos e podem cobrir

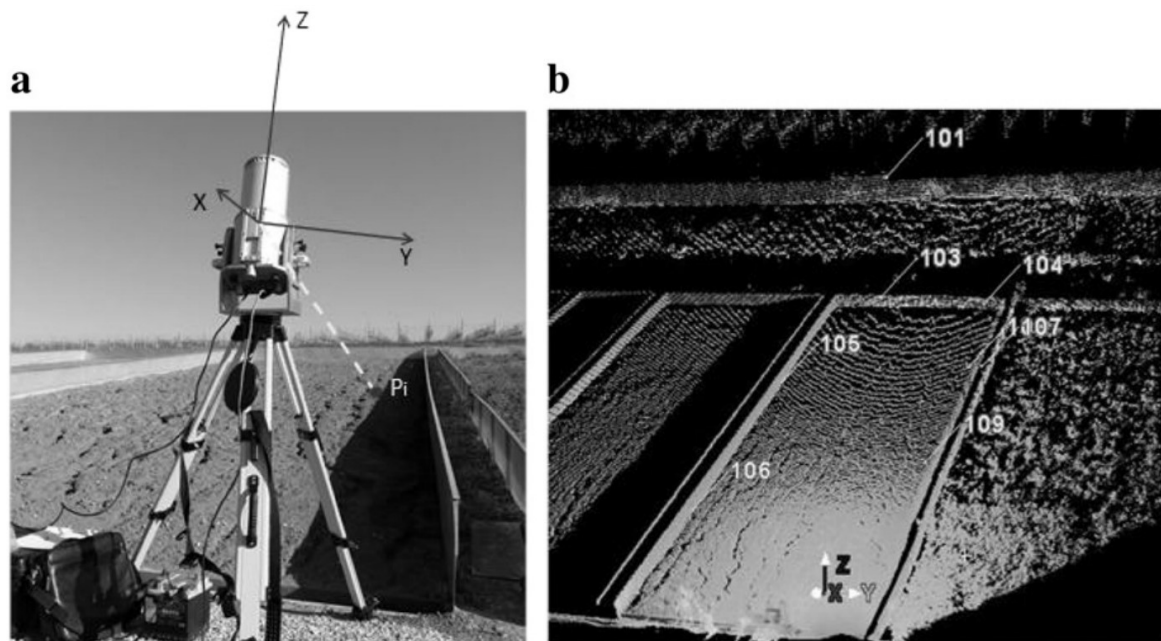


Figura 7: Escâner laser (a) utilizado na medição de sulcos e pontos resultantes do escaneamento (b). Adaptado de Vinci *et al.* (2015).

grandes áreas em pouco tempo. Malinowski *et al.* ([S.d.]) utilizou modelos digitais de elevação medidos através de VANTs com 1 cm<sup>±2%</sup> de resolução espacial. Em conjunto com os dados altimétricos, utilizou os modelos *Random Forest* e *knowledge-based* (regras criadas manualmente por especialistas) para estimar parâmetros morfológicos dos sulcos, obtendo ótimos resultados de validação (Figura 8). Mas possuem, também, as limitações de custo (OU *et al.*, 2021). São tecnologias práticas, porém com custo mais elevado que as tradicionais.

## Temporário

No estudo de Knowler *et al.* (2007), os autores mencionam que poucos na literatura usavam o nome “agricultura conservacionista” quanto o estudo em questão fora publicado, em 2007. Contudo, comparando-se 2007 e o presente ano, trabalhos com as palavras-chave “conservation agriculture” saltaram de aproximadamente 1000 para mais de 8000 artigos segundo o portal *Web of Science*.

## Referências

BERGER, C., SCHULZE, M., RIEKE-ZAPP, D., *et al.* Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity, **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, n. 12, p. 1456–1467, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1989>.

BERTOL, I., MARIA, I. C., SOUZA, L. da S. **Manejo e conservação do solo e da água**. Rio de Janeiro, SBCS, 2019.



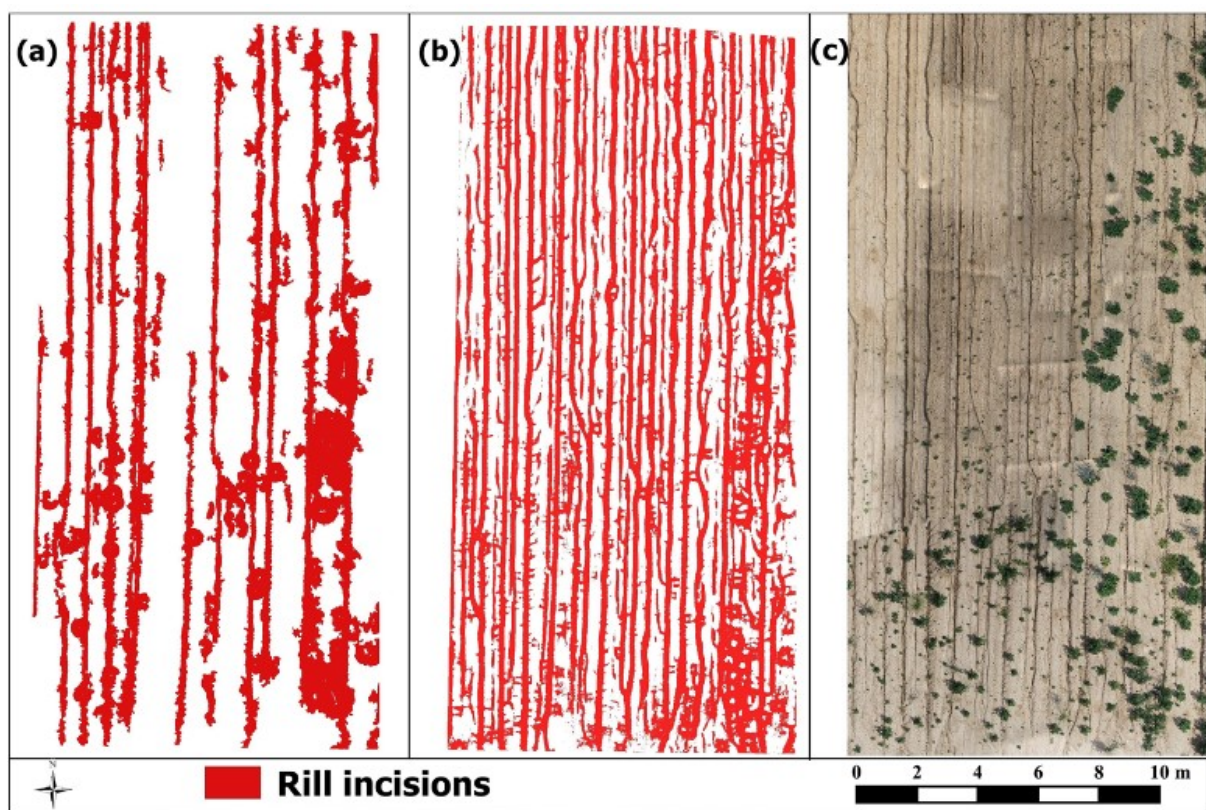


Figura 8: Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) no mapeamento e classificação de sulcos. a) Classificação *knowledge-based*; b) classificação por *Random Forest*; c) imagem aérea obtida pelo VANT. Adaptado de Malonowski *et al.* ([S.d.]).



BERTONI, J., NETO, F. L. **Conservação do solo**. São Paulo, Ícone, 2017.

BEULLENS, J., VAN DE VELDE, D., NYSSSEN, J. Impact of slope aspect on hydrological rainfall and on the magnitude of rill erosion in Belgium and northern France, **Catena**, v. 114, p. 129–139, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.016>.

BEWKET, W., STERK, G. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia, **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 97, n. 1-3, p. 81–93, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00127-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00127-0).

BRADFORD, J., BLANCHARD, R. Mineralogy and water quality parameters in rill erosion of clay-sand mixtures, **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1300–1307, 1999. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351300x>.

BRUNO, C., DI STEFANO, C., FERRO, V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy, **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, n. 2, p. 263–279, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1544>.

BRUNTON, D. A., BRYAN, R. B. Rill network development and sediment budgets, **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, n. 7, p. 783–800, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200007\)25:7%3C783::AID-ESP106%3E3.3.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200007)25:7%3C783::AID-ESP106%3E3.3.CO;2-N).

CASALÍ, J., LOIZU, J., CAMPO, M. A., *et al.* Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion, **Catena**, v. 67, n. 2, p. 128–138, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.005>.

ELTNER, A., BAUMGART, P., MAAS, H.-G., *et al.* Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil, **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 6, p. 741–755, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3673>.

KNOWLER, D., BRADSHAW, B. Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research, **Food Policy**, v. 32, n. 1, p. 25–48, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2006.01.003>.

LIYING, S., HAIYAN, F., DELI, Q., *et al.* A review on rill erosion process and its influencing factors, **Chinese Geographical Science**, v. 23, n. 4, p. 389–402, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0612-y>.

LUTZ, W., QIANG, R. Determinants of human population growth, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences**, v. 357, n. 1425, p. 1197–1210, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1121>.

MALINOWSKI, R., HECKRATH, G., RYBICKI, M., *et al.* Mapping rill soil erosion in agricultural fields with UAV-borne remote sensing data, **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.d.]. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5505>.

MERZ, W., BRYAN, R. B. Critical conditions for rill initiation on sandy loam brunisols - laboratory and field experiments in Southern Ontario, Canada, **Geoderma**, v. 57, n. 4, p.

357–385, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90050-U](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90050-U).

OU, X., HU, Y., LI, X., *et al.* Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling, **Catena**, v. 196, p. 104932, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104932>.

PAYKOY, O., HAWLEY, H. Property-based assessment of soil mineralogy using mineralogy charts, **Applied Clay Science**, v. 104, p. 261–268, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.12.003>.

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

QIN, C., ZHENG, F., XU, X., *et al.* A laboratory study on rill network development and morphological characteristics on loessial hillslope, **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, n. 4, p. 1679–1690, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1878-y>.

RAN, H., DENG, Q., ZHANG, B., *et al.* Morphology and influencing factors of rills in the steep slope in Yuanmou Dry-Hot Valley (SW China), **Catena**, v. 165, p. 54–62, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.017>.

RÖMKENS, M. J. M., HELMING, K., PRASAD, S. N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes, **Catena**, v. 46, n. 2-3, p. 103–123, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00161-8).

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, Embrapa Solos, 2018.

STOATE, C., BOATMAN, N. D., BORRALHO, R. J., *et al.* Ecological impacts of arable intensification in Europe, **Journal of Environmental Management**, v. 63, n. 4, p. 337–365, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0473>.

TOTSCHKE, K. U., AMELUNG, W., GERZABEK, M. H., *et al.* Microaggregates in soils, **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 1, SI, p. 104–136, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>.

VIDAL VAZQUEZ, E., VIEIRA, S. R., DE MARIA, I. C., *et al.* Fractal dimension and geostatistical parameters for soil microrelief as a function of cumulative precipitation, **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, p. 78–83, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000100011>.

VINCI, A., BRIGANTE, R., TODISCO, F., *et al.* Measuring rill erosion by laser scanning, **Catena**, v. 124, p. 97–108, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.003>.

VRIELING, A. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review, **Catena**, v. 65, n. 1, p. 2–18, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005>.

WISCHMEYER, W. H., SMITH, D. D. **Predicting rainfall-erosion losses: A guide to**

**conservation planning.** Agricultural Handbook, U.S. Department of Agriculture, 1978.

YUDINA, A. V., FOMIN, D. S., KOTELNIKOVA, A. D., *et al.* From the Notion of Elementary Soil Particle to the Particle-Size and Microaggregate-Size Distribution Analyses: A Review, **Eurasian Soil Science**, v. 51, n. 11, p. 1326–1347, 2018. DOI: <https://doi.org/110.1134/S1064229318110091>.

YUDINA, A. V., KLYUEVA, V. V., ROMANENKO, K. A., *et al.* Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability, **Geoderma**, v. 415, p. 115771, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115771>.

ZHANG, P., TANG, H., YAO, W., *et al.* Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope, **Catena**, v. 137, p. 536–544, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.025>.

ZHANG, Q., ZHAO, L., WANG, J., *et al.* Spatiotemporal variability and simulation of tilled loess microtopography in water erosion, **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 69, n. 4, p. 343–351, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.69.4.343>.

ZHAO, L., HONG, H., LIU, J., *et al.* Assessing the utility of visible-to-shortwave infrared reflectance spectroscopy for analysis of soil weathering intensity and paleoclimate reconstruction, **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 512, p. 80–94, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.07.007>.