



EROSÃO HÍDRICA LINEAR: UMA DISCUSSÃO CONCEITUAL E METODOLÓGICA

LINEAR WATER EROSION: A CONCEPTUAL AND METHODOLOGICAL DISCUSSION

EROSIÓN HÍDRICA LINEAL: UN ANÁLISIS CONCEPTUAL E METODOLÓGICO

ÉROSION HYDRIQUE LINÉAIRE: UNE DISCUSSION CONCEPTUELLE ET MÉTHODOLOGIQUE

Kássio Samay Ribeiro Tavares¹

¹ E-mail: kassiosamayribeiro@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-3248-5236>

Selma Simões de Castro²

² E-mail: selma.castro@uol.com.br

 <https://orcid.org/0000-0002-5401-5852>

RESUMO

A erosão hídrica é um dos principais processos de degradação das terras em diferentes regiões do planeta, sobretudo nas tropicais, afetando diretamente a qualidade dos solos, a dinâmica hidrológica e hidrossedimentológica e a sustentabilidade dos sistemas produtivos e ambientais. A erosão hídrica linear em sulcos, ravinas e voçorocas, sobretudo em ambientes submetidos a intensas mudanças no uso e cobertura, como no bioma Cerrado do Brasil, atinge maior magnitude e complexidade, cujo custo de controle é elevado. Os avanços em geomorfologia, ciência do solo e geografia física têm melhorado a compreensão do fenômeno, mas ainda persistem divergências conceituais, metodológicas e interpretativas a seu respeito. Este artigo apresenta uma revisão conceitual, enfatizando os tipos de feições erosivas hídricas lineares, os materiais e métodos de estudo e as interpretações sobre seus fatores condicionantes.

Palavras-chave: erosão hídrica linear; ravinas e voçorocas; conceitos; condicionantes; métodos de estudo; interpretações.

ABSTRACT

Water erosion is one of the main processes of land degradation in different regions of the planet, especially in the tropics, directly affecting soil quality, hydrological and hydrosedimentological dynamics, and the sustainability of productive and environmental systems. Linear water erosion, expressed in rills, ravines, and gullies, especially in environments subjected to intense changes in land use and land cover, such as the Cerrado biome in Brazil, reaches greater magnitude and complexity, and its control is costly. Advances in geomorphology, soil science, and physical geography have improved the understanding of this phenomenon. However, conceptual, methodological, and interpretative divergences still persist. This article presents a conceptual review, emphasizing types of linear water erosion features, study materials and methods, and interpretations of their conditioning factors.

Keywords: linear water erosion; ravines and gullies; concepts; conditioning factors; study methods; interpretations.

RESUMEN

La erosión hídrica es uno de los principales procesos de degradación del suelo en diversas regiones del mundo, especialmente en los trópicos, afectando directamente la calidad del suelo, la dinámica hidrológica e hidrosedimentológica y la sostenibilidad de los sistemas productivos y ambientales. La erosión hídrica lineal, expresada en surcos, cárcavas y barrancos, sobre todo en entornos sometidos a intensos cambios en el uso y la cobertura del suelo, como en el bioma Cerrado de Brasil, alcanza mayor magnitud y complejidad, y el costo de su control es elevado. Los avances en geomorfología, edafología y geografía física han mejorado la comprensión de este fenómeno. Sin embargo, persisten divergencias conceptuales, metodológicas e interpretativas al respecto. Este artículo presenta una revisión teórico-conceptual, destacando los tipos de formas de erosión hídrica lineal, los materiales y métodos de estudio y las interpretaciones de sus factores condicionantes.





Palabras clave: erosión hídrica lineal; surcos, cárcavas y barrancos; conceptos; factores condicionantes; métodos de estudio; interpretaciones.

RESUMÉ

L'érosion hydrique est l'un des principaux processus de dégradation des sols dans plusieurs régions du monde, notamment dans les zones tropicales. Elle affecte directement la qualité des sols, la dynamique hydrologique et hydrosédimentologique, ainsi que la durabilité des systèmes productifs et environnementaux. L'érosion hydrique linéaire, exprimée par des rigoles, des ravines et des ravins, surtout dans des milieux soumis à d'importants changements d'usage et de couverture des sols, comme dans le biome du Cerrado au Brésil, atteint une ampleur et une complexité accrues, et son contrôle représente un coût élevé. Les progrès en géomorphologie, en pédologie et en géographie physique ont permis d'améliorer la compréhension de ce phénomène. Cependant, des divergences conceptuelles, méthodologiques et interprétatives persistent encore à son sujet. Cet article présente une synthèse théorique et conceptuelle, mettant en lumière les types de formes d'érosion hydrique linéaire, les matériaux et méthodes d'étude, ainsi que les interprétations de leurs facteurs conditionnants.

Mots-clés: érosion hydrique linéaire ; rigoles, ravines et ravins ; concepts ; facteurs conditionnants ; méthodes d'étude ; interprétations.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica constitui um dos principais processos de degradação das terras em diferentes regiões do mundo, afetando diretamente a qualidade dos solos, a dinâmica geológico-geomorfológica, sobretudo hidrológica e sedimentológica das bacias hidrográficas e a sustentabilidade dos sistemas produtivos e ambientais. Em ambientes tropicais, especialmente os submetidos a intensas mudanças de uso e cobertura da terra, os processos erosivos hídricos lineares na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, em que esta última tende a apresentar maior magnitude e complexidade, uma vez que, na maioria das vezes, resultam da interação entre condicionantes naturais da paisagem e intervenções antrópicas que alteram os equilíbrios geomorfológicos e pedohidrológicos (Lal, 1998; Morgan, 2005; Blanco; Lal, 2008; Bertoni; Lombardi Neto, 2010; Salomão, 2015).

Entre as diferentes formas de erosão, a hídrica linear, na forma de ravinas e voçorocas, sobretudo de médio e grande porte, e destaca por sua elevada capacidade de mobilização de sedimentos por meio do escoamento superficial e, ou subsuperficial das águas pluviais e, não raro das servidas (irrigação em áreas rurais, microdrenagem urbana ou sua ausência ou subdimensão), e por seus impactos ambientais e socioeconômicos. Trata-se de incisões progressivas nos terrenos, normalmente a favor dos declives e que podem atingir grandes dimensões e assim comprometer extensas áreas agrícolas produtivas, principalmente quando não utilizam satisfatoriamente de práticas conservacionistas. Além de também poderem comprometer a infraestrutura urbana, os sistemas viários urbanos e interurbanos, os reservatórios de água e, ou produtores de energia elétrica, e os ecossistemas naturais.

Em diversas regiões tropicais, como no Bioma Cerrado brasileiro, tais processos têm sido associados tanto à dinâmica natural das paisagens, associadas à suscetibilidade do relevo e solo, quanto à intensificação do uso da terra, especialmente em cenários de expansão agropecuária, resultante do desmatamento intensivo das fitofisionomias originais, muitas vezes indiscriminado, sucedido pela conversão em áreas de cultivo e pastagens, e ainda quanto à urbanização sem planejamento territorial e ambiental adequados (Hogan et al, 2002; Bertoni; Lombardi Neto, 2010; Blanco e Lal, 2008; Salomão, 2015). Neste caso, um exemplo recente foi dado por Cavalcante e Castro (2021, 2022 a, b) sobre erosões de Goiânia, capital do estado de Goiás, região Centro-Oeste do Brasil.

Nas últimas décadas, o avanço das pesquisas em Geomorfologia, Ciência do solo e Geografia Física têm contribuído para melhorar a compreensão sobre o fenômeno, em



termos de formação, evolução e distribuição espacial das feições erosivas lineares em diferentes escalas, principalmente as de semidetalhe e detalhe, envolvendo metodologias e modelagens diversas. Entretanto, ainda persistem divergências conceituais e metodológicas na literatura, sobretudo no que se refere à diferenciação entre ravinas e voçorocas, aos mecanismos responsáveis por sua dinâmica de instalação e evolução e às escalas mais adequadas para sua análise. Tais divergências também refletem uma diversidade de abordagens adotadas por diferentes disciplinas, incluindo principalmente a Geomorfologia, a Pedologia, a Engenharia civil geotécnica e as Ciências ambientais (Poesen et al., 2003; Morgan, 2005; Labrière et al, 2015; Borrelli et al, 2017; Batista et al, 2019; Pennock, 2019).

Por outro lado, vem aumentando a abordagem integrada no estudo do fenômeno, a qual considera, simultaneamente, os condicionantes climáticos, pedológicos, topográficos, hidrológicos, bem como as ações humanas que atuam na produção das paisagens e territórios. Nesse sentido, procedimentos multiescalares e multifatoriais/multiproxy vêm sendo amplamente utilizados para compreender a distribuição espacial e a dinâmica dessas feições erosivas de formação, evolução e tipos resultantes, frequentemente com base no uso de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem espacial em geral, para áreas rurais, bacias hidrográficas, territórios político administrativos e outros (Veldkamp et al., 2001; Boardman, 2006; Anache et al, 2018; Labrière et al, 2015; Mello et al, 2016; Borrelli et al, 2017; Batista et al, 2019; Nunes & Castro, 2023, Rodrigues e Castro, 2023; Araújo et al, 2025, entre outros) bem como para áreas urbanas (Cavalcante; Castro, 2021, 2022a,b, entre outros).

Diante do exposto, torna-se fundamental sistematizar e discutir as principais bases teórico-conceituais que sustentam os estudos sobre a erosão hídrica linear, particularmente no que se refere aos processos envolvidos, às tipologias das feições erosivas resultantes e aos condicionantes ambientais e socioeconômicos associados à sua ocorrência. A consolidação dessas bases teórico-conceituais é essencial para subsidiar as metodologias de análises geoambientais, zoneamentos e estratégias de planejamento territorial voltadas à prevenção e à mitigação do fenômeno.

Este artigo objetiva apresentar uma revisão bibliográfica na forma de uma discussão sistematizada sobre as principais abordagens conceituais e metodológicas relacionadas à erosão hídrica linear, quanto aos processos de sua formação e evolução, as classificações adotadas, os condicionantes que controlam sua ocorrência em diferentes escalas e os principais fundamentos científicos relacionados ao fenômeno, com ênfase no Brasil.

METODOLOGIA

A análise da literatura foi realizada a partir da consulta a livros, artigos científicos, relatórios técnicos e outros documentos, sobretudo acadêmicos, publicados em âmbito nacional e internacional, com destaque tanto para os estudos clássicos como contemporâneos, no âmbito da Geomorfologia, Ciência do solo/Pedologia, Geografia Física e Engenharia Civil/Geotecnia e Engenharia Ambiental. Foram priorizadas obras que abordam os processos erosivos, a classificação das feições lineares e os condicionantes ambientais associados à erosão hídrica.

Entre as principais referências consultadas destacam-se trabalhos de autores como Lal (1998), Morgan (2005), Blanco e Lal (2008), Bertoni e Lombardi Neto (2010), Salomão (2015), Pennock (2019), além de documentos técnicos amplamente utilizados no contexto internacional, como FAO (2015) e brasileiro, como o relatório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/1986 e Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo/IPT (DAEE/IPT SP, 1989). Tais obras se constituem em referências fundamentais

para a compreensão dos processos erosivos e das tipologias de feições lineares em diferentes ambientes geomorfológicos.

A organização das publicações selecionadas foi estruturada em três eixos principais:

- 1) conceitos gerais e tipos gerais de erosão hídrica;
- 2) tipologia das feições erosivas hídricas lineares: sulcos, ravinas e voçorocas; e
- 3) condicionantes ambientais e abordagens metodológicas utilizadas no seu estudo.

O levantamento e a organização das referências foram realizados com o auxílio de ferramentas digitais de apoio à pesquisa científica e à escrita acadêmica. Assim, foram utilizadas ferramentas baseadas em inteligência artificial (IA), como *Grammarly*, *Scite Assistant* e *Research Rabbit*, que contribuíram para diferentes etapas do processo de elaboração do texto. O *Grammarly* foi utilizado principalmente para revisão gramatical e aprimoramento da clareza textual, auxiliando na identificação de inconsistências linguísticas e na melhoria da estrutura das sentenças. O *Scite Assistant* foi empregado como ferramenta de apoio na identificação de citações relevantes e na verificação do contexto de uso de determinadas referências científicas. O *Research Rabbit* foi utilizado como ferramenta de exploração bibliográfica, permitindo identificar redes de citações e trabalhos relacionados à temática da erosão hídrica. Ressalte-se que o uso dessas ferramentas foi auxiliar e instrumental, restringindo-se à organização, revisão e apoio na identificação de literatura científica, sem substituição da análise crítica realizada pelos autores. Assim, a seleção final das referências, a interpretação dos conteúdos e a elaboração das sínteses foram conduzidas de forma independente, com base na avaliação crítica autoral da literatura consultada.

Dessa forma, a metodologia adotada buscou integrar procedimentos tradicionais de revisão bibliográfica com o uso de ferramentas digitais contemporâneas de apoio à pesquisa científica, como de IA, visando ampliar a abrangência e a consistência da análise apresentada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Erosão Hídrica Linear: conceitos e definições

A erosão hídrica tem sido amplamente definida na literatura como um fenômeno geológico e geomorfopedológico que envolve a remoção, o transporte e a deposição de partículas do solo, por vezes também de fragmentos de rochas, e mesmo de entulho, caso seja em área urbana, sistema viário e entorno de reservatórios, pela ação das águas pluviais. Inicia-se pelo impacto das gotas de chuva na superfície dos terrenos, podendo se acumular e escoar, quando não infiltrada, sendo condicionada por fatores ambientais do meio físico e biótico como litologia, relevo, características dos solos e cobertura vegetal. No entanto, sua intensidade, frequência e distribuição espacial são também fortemente moduladas por fatores sociais e econômicos, sobretudo aqueles relacionados ao uso e manejo das terras, em especial dos solos.

Dessa forma, embora se trate de um processo sempre natural, um dos condicionantes é que podem não ser, como as ações humanas ligadas ao uso, manejo e ocupação das terras, cada vez mais importante como variável de instalação e desenvolvimento do fenômeno. Em especial, quando associado à expansão agropecuária, às formas de urbanização e à implantação/manutenção de sistemas viários ou de reservatórios ou ainda de depósitos de resíduos de mineração, especialmente quando realizadas em desacordo com as potencialidades e limitações naturais dos solos e relevo da paisagem considerada, ou ainda quando as práticas de controle estão mal dimensionadas.

Nessa perspectiva, os processos erosivos deixam de ser compreendidos apenas como eventos condicionados pelo meio físico e passam a ser interpretados como indicadores de fragilidade ambiental (Ross, 1994) e insustentabilidade geográfica (Sachs, 2009) e mesmo de danos e riscos, na medida em que refletem a perda de capacidade da paisagem em absorver, amortecer ou se recuperar das pressões antrópicas impostas que a instabilizaram. Em outras palavras, seu controle depende da resiliência dos condicionantes envolvidos.

Ross (1994) entedia a fragilidade ambiental como uma Unidade Ecodinâmica Instável (Tricart 1977), a qual poderia ser de dois tipos (a) a potencial (natural), que revela a suscetibilidade de um ecossistema, e (b) a emergente (alterações humanas) que resulta da vulnerabilidade/risco de um ecossistema, em consequência de ações humanas, as quais devem ser distinguíveis para fins de planejamento territorial. Na potencial a erosão ainda não se instalou, na emergente sim. Pode-se pensar que a fragilidade ambiental seria equivalente à suscetibilidade de um ecossistema.

Reis (2023), discutindo propostas de Sachs (1993, 2007, 2009 e 2011), sobre desenvolvimento sustentável embasado em mudanças de paradigmas sociais e econômicos, como sistema mundo e globalização, lembra que esse autor adotava a premissa de que desenvolvimento, meio ambiente e sociedade são indissolúveis e que a eficiência econômica, a prudência ecológica e a equidade social são os princípios fundamentais da sustentabilidade territorial (ou geográfica), envolve garantia da justiça social, valorização do saber local, respeito à capacidade dos ecossistemas naturais, equilíbrio rural/urbano, compromisso com a democracia, promoção da cooperação, controle institucional do sistema financeiro e acesso à diversidade do planeta como um direito da humanidade. Consequentemente, a insustentabilidade resulta da avaliação negativa dessas premissas.

Em síntese, com base no exposto, a erosão em geral e em especial a hídrica linear, corresponde a um processo indicador de desequilíbrio ecodinâmico de um ecossistema natural, resultante de condicionantes naturais favoráveis que lhes atribuem suscetibilidade e das ações humanas que lhe atribuem fragilidade, pois que não consideraram os seus limites de uso, manejo e ocupação, o que pode comprometer a sustentabilidade dos territórios onde ocorrem.

- A erosão hídrica linear

A erosão hídrica, em sentido amplo, recebeu diferentes conceitos e definições ao longo da literatura. Para Pruski (2009), a erosão consiste no processo de desprendimento e arraste de partículas do solo ocasionado pela ação da água e do vento, constituindo uma das principais causas da degradação das terras agrícolas. Já Merritt, Letcher e Jakeman (2003) a compreendem como um processo bifásico, envolvendo a remoção de partículas e o transporte desse material, ao qual se soma a deposição quando não há energia suficiente para a continuidade do transporte. Para Morgan (2005), a erosão do solo pode ser entendida como um processo em três fases, que envolve o destacamento das partículas, seu transporte por um agente erosivo e, por fim, sua deposição em posições mais baixas da vertente ou em outros setores da paisagem, quando a energia do agente transportador diminui. Blanco e Lal (2008), ao tratarem especificamente da erosão hídrica, definem-na como o desgaste da superfície do solo pela água da chuva, pelo escoamento superficial, pelo degelo ou pela irrigação, implicando o deslocamento de partículas orgânicas e inorgânicas ao longo da superfície e sua posterior deposição em posições inferiores da paisagem e em sistemas aquáticos. Para Pennock (2019), a erosão é um processo geomórfico natural, mas que pode ser intensificado pelo uso antrópico do solo,

resultando em taxas elevadas de destacamento e transporte dos constituintes do solo. Já para Bertoni e Lombardi Neto (2010), a erosão é condicionada pela atuação de forças ativas, como a chuva, a declividade, o comprimento de rampa e a capacidade de infiltração, e de forças passivas, como a resistência do solo à ação erosiva da água e a proteção conferida pela cobertura vegetal. Entre essas abordagens, esta última apresenta maior aderência ao enfoque adotado neste trabalho, por evidenciar, de forma mais técnica, a interação entre atributos do meio físico e fatores de uso e cobertura da terra.

Contudo, segundo bibliometria publicada por Castillo e Gómez (2016), a qual denominam *gully*, as publicações correspondem a 10% apenas das publicações sobre erosão hídrica. No Brasil, bibliometria publicada por Barreto, Siqueira e Sparoveck (2009) ressalta que publicações sobre erosão linear são poucas, dominando as de erosão laminar e recentemente Tavares e Castro (2021) também afirmaram o mesmo.

Ainda em termos de tipos gerais, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo/IPT (DAEE/IPT, 1989) e Blanco e Lal (2008), entre outros, subdividem a erosão hídrica em dois tipos: *erosão geológica*, ou *normal*. e *erosão acelerada*. A *geológica*, ou *normal*, decorre de processos naturais de modificações da crosta terrestre, nas eras e períodos geocronológicos, podendo ser reconhecidos apenas no decorrer de longos períodos de atividade geológica. A *erosão acelerada* ocorre quando a taxa de erosão se torna mais rápida do que a geológica ou normal, desencadeada, obrigatoriamente, por ações humanas como o desmatamento, a agricultura e o pastoreio em áreas rurais, entre outros usos, associados à falta de planejamento territorial e ambiental em áreas frágeis, ou seja, com fragilidade potencial de desenvolver o fenômeno, isto é, são suscetíveis.

Segundo Weill e Pires Neto (2007), os principais fatores condicionantes da aceleração do processo erosivo hídrico em áreas agrícolas, induzido pelo ser humano, incluem a supressão da vegetação natural e conversão em outros usos agrícolas ou pecuários, o manejo incorreto dos solos produtivos, o uso intensivo das terras com potencial natural elevado de erosão, a exploração inadequada de terras marginais, além dos demais usos como os urbanos, viários, a pressão de ocupação da terra por usos competitivos, que revelam, sobretudo, a falta de planejamento de uso e ocupação. Segundo o DAEE/IPT (1986), especificamente nas áreas urbanas, a impermeabilização do solo, a ocupação de fundos de vale e de áreas de nascentes, o traçado de ruas e avenidas associados à disposição de lotes, ambos no rumo dos declives, e a falta ou insuficiência do sistema de microdrenagem favorecem a concentração de fluxos hidrológicos causando erosão hídrica, frequentemente linear.

Para Lal (1998) e retomado em Guerra et al. (2020), entre outros, há vários tipos de erosão que variam de acordo com o agente deflagrador. Lal (1998) os classifica os agentes em ventos, fluidos e gravidade, e os principais tipos de erosão, respectivamente, a erosão eólica, a erosão hídrica e o movimento de massa (Quadro 1). Segundo Blanco e Lal (2008), a velocidade com que o fenômeno ocorre varia de acordo com as características do clima, topografia, uso, manejo e cobertura vegetal.

Quadro 1 - Agentes causadores de erosão

Tipo de Agente				Tipo de Erosão
Vento				Eólica
Fluidos	Água	Chuva		Por impacto das gotas
		Escoamento	superficial	Sulcos Ravinas Voçorocas Canais fluviais
			subsuperficial	Em condutos subterrâneos

		Oceano	Costeira
		Gelo	Glacial
Gravidade	Movimento de Massa		Avalanche Escorregamento Solifluxão/Rastejo

Fonte: Adaptado de Lal (1998).

Ainda quanto à erosão hídrica, para a maioria dos estudiosos, começa com o impacto das gotas de chuva no solo, o salpico (*splash* em inglês), provocando o desmantelamento dos agregados (desagregação) e o subsequente desprendimento das partículas que entram em suspensão nas águas pluviais na forma das enxurradas. O salpico é definido como a saltação das partículas causada pelo impacto das gotas de chuva no solo (Guerra; Guerra, 2003). Em seguida, a acumulação das águas de chuva na superfície dos terrenos, denominada enxurrada, corresponde às águas que não infiltraram no solo e que escoam rumo abaixo, em geral para os fundos de vale. E há as águas que infiltram e percolam dentro do solo, podendo criar lençol suspenso (associado à diferenças texturais e de porosidade dos horizontes de solos superpostos ou elevando o nível freático e aumentando sua energia cinética para jusante, onde também aumentam o gradiente hidráulico. Esses fluxos se associam aos declives e formas das encostas e também à morfologia vertical e lateral dos solos, resultando na sua movimentação interna das posições topográficas mais altas para as mais baixas, transportando partículas em suspensão e íons em solução, seja dos nutrientes naturais ou dos insumos adicionados aos solos, além dos defensivos agrícolas (Bertoni; Lombardi Neto, 2010).

Pennock (2019) descreve o processo erosivo hídrico em três etapas. A primeira é o desprendimento das partículas ou agregados do solo por erosão não canalizada de respingo (inter-rill em inglês). A segunda é o movimento de material desprendido ou destacado, ou seja, erosão canalizada (rill ou gully em inglês). Por fim, a terceira é a deposição desse material transportado. No início os agregados soltos desempenham um papel crucial ao preencher os poros e as irregularidades do terreno, como reentrâncias na superfície do solo, ocasionando o denominado selamento superficial (Hu et al., 2012), o que reduz a infiltração da água e resulta na sua acumulação em superfície, formando lagoas (*ponds* em inglês) e saturando os solos. À medida que essas irregularidades são preenchidas com água, elas se interconectam, dando origem a um fluxo hídrico chamado de escoamento superficial (*runoff* em inglês). Inicialmente, esse escoamento é difuso, mas com o tempo pode se concentrar em linhas de fluxo (IPT, 1986; Guerra, 1999; Bertoni; Lombardi, 2010; Salomão, 2015, entre outros), mudando de um fluxo difuso para um fluxo linear concentrado.

Quanto aos tipo de erosão hídrica, Salomão (2015), entre vários outros pesquisadores, lembra que o processo ocorre de duas formas principais de fluxos e feições resultantes: a *laminar* (ou difusa) e a *linear* (a concentrada em sulcos, ravinas e voçorocas), sendo que seu início se dá pela ação do salpico. O salpico, ao promover a ruptura dos agregados, quebrando-os em tamanhos menores passam a ser deslocados pela enxurrada. Como consequência tem-se o aumento de superfícies de menor porosidade, que facilitam o início do movimento hortoniano superficial ainda difuso, mas que, ao encontrar a rugosidade superficial do terreno, se desloca em rota preferencial de fluxo hídrico, por onde se dará o deslocamento das partículas que têm seus movimentos aumentados em função do escoamento deflagrado (Morgan, 2005).

A *erosão laminar* corresponde ao escoamento superficial espacialmente difuso, onde ocorre a lavagem uniforme e superficial do solo e a remoção de uma fina camada do terreno. É difícil de perceber, é identificada pela exposição de raízes de gramíneas e outras plantas de maior porte como as árvores. Essa forma de erosão é uma das

maiores responsáveis pelo desgaste e remoção dos horizontes superficiais, os mais férteis do solo, ocorrendo de forma lateral quase homogênea, mas com tendência a aumentar quando da ocorrência da concentração de fluxo em pequenos filetes, podendo evoluir para sulcos (Lepsch, 2002). Resulta na perda de matéria orgânica e nutrientes e subsequente empobrecimento dos solos de extensas áreas (Almeida Filho; Ridente Junior, 2001; Bacellar, 2000; FAO, 2015b; Morgan, 2005; Salomão, 2015). Tal processo pode ser reduzido por fatores que influenciam a taxa de infiltração, como o volume da precipitação, a vegetação e a inclinação do terreno. Em ambientes de climas temperados e tropicais com cobertura vegetal e solos mais espessos e permeáveis, a capacidade de transporte e escoamento superficial é naturalmente reduzida (Gobbi et al., 2011).

Para o IPT (1986) e DAEE/IPT (1989), a erosão laminar é desencadeada por conjuntos de fatores naturais: a natureza do solo, isto é, suas características físicas e morfológicas (textura, estrutura e permeabilidade), que caracterizam sua resistência; a morfologia do terreno (declividade, forma e comprimento das encostas (vertentes), que promove aumento da energia dos fluxos) e o clima (volume de chuva que atinge a superfície do terreno num determinado tempo ou intensidade pluviométrica que promove o impacto das gotas de chuva e alimenta a acumulação de água na superfície das águas não infiltradas). A erosão laminar promove o desprendimento das partículas e agregados (quando houver) dos primeiros horizontes do solo, os horizontes A, que possuem matéria orgânica (húmus) e, não raro, argila, sendo os mais ricos em nutrientes para as plantas.

A *erosão linear* ou em sulcos (*gully* em inglês), de acordo com o IPT (1986) e DAEE/IPT (1989, Bertoni e Lombardi (2010), Blanco e Lal (2008) e Salomão (2015), entre outros, é o processo erosivo resultante da concentração do escoamento superficial de forma gradativa, formando fluxos lineares de maior energia na superfície dos terrenos durante os eventos chuvosos. Tal processo pode ser intensificado e realimentado ao encontrar solos ou materiais soltos na superfície, que têm propriedades estruturais e texturais que facilitam o desprendimento e a movimentação das partículas. Para a maioria dos autores, compreende três etapas: destacamento, transporte e deposição de partículas, mas, no caso, pelo escoamento hidropluvial superficial e, ou subsuperficial concentrado(s).

Os principais fatores iniciais que influenciam essa fase incluem a energia cinética das chuvas e a estabilidade (resistência e resiliência) dos agregados. A energia cinética das chuvas desempenha um papel fundamental na determinação de sua capacidade erosiva, ou seja, a capacidade da chuva em causar erosão, denominada erosividade (Colodro et al., 2002). A estabilidade dos agregados refere-se à habilidade dos agregados do solo em resistir à essas forças externas e manter sua integridade (Silva; Cabeda; De Carvalho, 2006; Salton et al., 2008). O tamanho dos agregados afeta sua suscetibilidade à movimentação pela água e a presença dos agregados instáveis no solo, que se desintegram facilmente, o tornam mais suscetível à erosão (Guerra; Silva; Botelho, 2015). A desagregação é a principal fase do processo erosivo, pois prepara as partículas que compõem o solo para serem transportadas pelo escoamento superficial (Morgan, 2005; Guerra; Silva; Botelho, 2015, entre outros).

Em seguida o processo erosivo se instala quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração, a água se acumula na superfície do solo e começa a se mover para posições mais baixas, por gravidade, formando um fluxo, que promove o transporte das partículas, denominado escoamento superficial (*runoff* em inglês) (FAO, 2019), podendo ser de forma difusa pela superfície do solo ou formando linhas de fluxo mais intenso, denominados sulcos (Silva, 1995) (*gully* em inglês) (Poesen et al (2003). Diversos fatores desempenham um papel significativo nos padrões de escoamento.

A capacidade de infiltração, conforme Ribeiro (2014), é influenciada pela presença de macroporos nos solos, os quais permitem a condutividade da água (condutividade hidráulica), ou percolação, para suas camadas mais profundas, até atingir e recarregar o nível freático. Além dos macroporos, a microestrutura e a topografia do terreno influenciam na energia e velocidade do escoamento, pois o declive do terreno, o comprimento das rampas (também denominadas vertentes ou encostas) e a existência de obstáculos, controlam a velocidade do fluxo. Terrenos mais inclinados resultam em velocidades maiores, e rampas longas, sem obstáculos, facilitam o escoamento e aumentam a sua energia cinética para jusante. Os obstáculos, por sua vez, representam pequenas variações no relevo que aumentam sua rugosidade, formando barreiras ao fluxo da água e seu desvio (Silva, 1995). A fase de deposição de sedimento ocorre quando o evento de precipitação termina e, ou, quando o fluxo hídrico perde velocidade. A deposição ocorre em áreas mais baixas, geralmente nas planícies aluviais, lagos e rios, e parte dos sedimentos pode se acumular em locais planos e a menor parte chega ao mar ou às planícies costeiras (Weiler et al., 2021).

A erosão hídrica também pode ser categorizada segundo a párea afetada, sendo em *on-site* e *off-site*. A erosão *on-site* se refere aos efeitos da erosão dentro da propriedade fundiária, afetando diretamente as unidades de produção, incluindo a perda de solo, de nutrientes e matéria orgânica, reduz a produtividade do solo e incorre na degradação da sua qualidade (Barbosa et al., 2012; Waltrick et al., 2015). A erosão *off-site* se refere ao transporte de sedimentos para fora da unidade fundiária local de produção, afetando propriedades vizinhas contínuas ou contíguas, com produtos poluentes e sedimentação dos cursos hídricos, causando perdas econômicas devido à redução da produtividade dos solos, além de aumentar a mortalidade das árvores pelo acúmulo dos sedimentos nas planícies aluviais, aterrando, toda ou em parte, a vegetação ciliar ou de galeria, levando à sua morte (Blanco; Lal, 2008), e alterando as características da paisagem.

Tipos de feições erosivas hídricas lineares: sulcos, ravinas e voçorocas

O escoamento superficial concentrado em linhas de fluxo inicia-se pelo desprendimento e deslocamento das partículas de solo e similares ao longo das linhas, dando origem a incisões em formato alongado na superfície do terreno, fluxo similar a canais na superfície dos terrenos, em geral sendo descendentes, cortando as curvas de nível, podendo ser sulcos (mais rasos) (Figura 1 - a) e ravinas (mais profundas) (Figura 1 - b), como exposto. Quando há rompimento dos sulcos, eles se interligam uns aos outros, podendo evoluir para ravinas (Infanti Junior; Fornasari Filho, 1998) e quando aprofundam e cortam o lençol suspenso ou freático evoluem para voçorocas (Figura 1 - c), embora estas também possam surgir sem ligação com aprofundamento de ravinas, como em fundos de vale e em áreas de nascentes (Almeida; Ridente Jr, 2001; Salomão, 2015), frequentemente associadas ao freático raso ou aflorante e caminhos ou trilhas que o interceptam. Internacionalmente as formas de erosão hídrica linear são denominadas *gully*.

Figura 1 – Tipos de erosões lineares



a



b



c

Fonte: Adaptado de Suertegaray, (2004) (a - Sulcos; b - Ravinas; c – Voçoroca)

As feições erosivas hídricas lineares podem ser classificadas em sulcos, ravinas e voçorocas, as quais motivaram a elaboração de diversas propostas para sua diferenciação como a de Castillo; Gómez (2016) e formas de controle (IPT, 1986; DAEE/IPT, 1989; CEMIG, 2001; Filizola et al, 2011). Segundo Guerra (1999) e DAEE/IPT (1986). se distinguem pela profundidade crescente, mas diferem quanto aos processos e mecanismos de instalação e desenvolvimento envolvidos.

Geralmente, admite-se que os sulcos e ravinas ocorrem em consequência do escoamento superficial descendente nas vertentes e as voçorocas ocorrem em consequência do escoamento tanto superficial como subsuperficial, este gerando a formação de dutos ou túneis naturais (*pipes* em inglês) em subsuperfície, no lençol suspenso ou freático, também resultantes da concentração de fluxo, promovendo a retirada de partículas no seu interior e subsidência em superfície, geralmente de formas também alongadas, além de outros processos associados, como movimentos de massa em seus taludes, freático livre, deposição em cone a jusante, entre outros. Diferentemente dos sulcos e ravinas as voçorocas se desenvolvem de modo remontante nas vertentes (IPT, 1986; Salomão, 2015). Mais detalhes são expostos a seguir.

Sulcos: Na literatura em língua inglesa essa erosão é denominada “*rill*” ou “*rill erosion*” que se apresenta como incisões lineares em superfícies inclinadas, seguindo a direção de máxima inclinação da encosta (Hutchinson; Pritchard, 1976; Nachtergaele; Poesen; Govers, 2002, entre outros). Eles se desenvolvem predominantemente durante períodos chuvosos, atingindo profundidades centimétricas, as quais são posteriormente preenchidas pelo material erodido nos períodos mais secos (Poesen et al., 2003). Nesse sentido, Bacellar (2000) afirma que, muitas vezes, é impossível dissociar a erosão em sulcos da erosão laminar, já que durante sucessivas estações chuvosas, os sulcos tendem a migrar de posição, causando o rebaixamento uniforme de toda a encosta.

Para o IPT (1986), os sulcos são definidos como incisões superficiais no terreno, com profundidade e largura inferiores a 50 cm, que podem ser corrigidas por máquinas agrícolas (como arado e grade). Caso não sejam corrigidos, há a possibilidade de aprofundarem ao longo do tempo com a ocorrência de chuvas intensas, sobretudo em solo exposto, transformando-se em ravinas. Esse tipo de erosão muitas vezes sucede a erosão laminar, ocorrendo à medida que volumes de água precipitados em áreas maiores fluem para áreas menores, aumentando a velocidade e formando linhas de fluxo concentrado. Ademais, precipitações intensas a muito intensas, associadas à baixa capacidade de infiltração do solo ou à sua saturação (comum quando há sucessão de episódios durante o dia ou de dias chuvosos), tendem a se concentrar e criar rotas preferenciais de fluxo (Bigarella; Mazuchowski, 1985). Nas áreas de pastagem o começo da erosão em sulcos frequentemente costuma estar associado a trilhas de gado, ao solo exposto e à movimentação da terra (Almeida Filho; Ridente Junior, 2001).

Ravinas: Internacionalmente, as ravinas são feições erosivas lineares conhecidas pelo termo erosão linear efêmera (*ephemeral gully* em inglês). Segundo Vandaele et al.

(1996) e o Soil Science Society of América (2001), as ravinas correspondem a canais de pequenas polegadas de profundidade e largura, sendo efêmeras e sempre oriundas da ação do escoamento superficial. Essas feições, alvo de tentativas de remoção por meio dos processos de aragem do solo, de acordo com Nachtergaele, Poesen e Govers (2002), uma vez obliteradas, tendem a ressurgir no mesmo local e evoluírem a partir de processos sucessivos de incisão. Isso provavelmente porque as profundidades das ravinas em regiões temperadas é menor do que em regiões tropicais. Por essa razão, para Canil (2000) e Cavaguti (1994), entre outros, a ravina, ao contrário dos sulcos, é uma forma de erosão que não pode mais ser eliminada por meio das operações normais de preparo do solo, dada sua profundidade e largura.

No que se refere às ravinas e voçorocas, a comunidade científica não é unânime acerca dos processos e parâmetros de formação e evolução a serem adotados para sua classificação e diferenciação, muito embora seja consensual que são a respectiva expressão de intensidades e dimensões crescentes dos processos erosivos atuantes (Castillo; Gómez, 2016). Segundo o IPT (1986), as ravinas nascem e crescem apenas pelo atrito das águas do escoamento superficial. Segundo Rego (1987), a ravina se configura como a concentração de fluxos d'água em pontos específicos, preferenciais, formando canais distintos e, nos estágios iniciais, perceptíveis. O entanto, Guerra e Cunha (1995), discordam afirmando que ravinas surgem a uma distância crítica do topo da encosta, onde o escoamento superficial se canaliza e pode gerar incisões que retrocedem em direção ao topo, o que de certo modo contraria a interpretação de que são de evolução descendente.

Acrescente-se que Oliveira (1994) e Cerri, Silva e Santos (1997) afirmam que para as ravinas devem ser considerados mecanismos de erosão que desencadeiam movimentos de massa nos taludes, evidenciados por pequenos deslizamentos que ampliam a sua largura e seu avanço. Com formato tipicamente alongado e geralmente em formato “V”, as ravinas costumam apresentar comprimentos superiores à largura e profundidades variáveis. Sua ramificação é rara e a profundidade não atinge o lençol freático. Embora sejam mais profundas que os sulcos, não têm limite máximo e correspondem a canais de escoamento concentrado, apresentando-se como feições alongadas e bem definidas nos terrenos (Magalhães, 2001). Porém, uma vez estabelecidas em uma encosta tendem a evoluir com bifurcações em pontos de ruptura de declive (Guerra, 1999).

Sua formação ocorre em duas etapas. A primeira se dá com a concentração do fluxo de água em canais pequenos, cuja profundidade aumenta e a velocidade diminui, processo causado pelo movimento das partículas que são transportadas por esses pequenos canais que posteriormente podem iniciar futuras ravinas. A segunda quando o aumento da rugosidade no fundo dos pequenos canais, causa turbulência localizada, aprofundando-os, e assim, levando à formação de algumas pequenas cabeceiras nas ravinas. Quando isso ocorre é porque está se alcançando um nível de desequilíbrio dinâmico e indica que a taxa de produção de sedimentos, a partir do recuo das cabeceiras, excede a capacidade de transporte do fluxo de água (Guerra, 1999).

Voçorocas: O termo voçoroca tem origem brasileira, derivado do tupi guarani (*ibi çoroc* = terra rasgada), no entanto, há diferentes terminologias que variam de uma região geográfica para outra, porém, segundo Castillo e Gómez (2016), todas possuem um denominador comum, que é a escavação do solo. No Brasil é utilizado o termo tanto voçoroca, como boçoroca, corruptela do termo *ibi çorok* e internacionalmente, em países de língua inglesa, é conhecida como *gully* (desde que com profundidades maiores do que 10cm, não necessariamente com *piping*), também como *donga* na África do Sul, *barranco* na Argentina, *carcava* na Espanha, *ravine* na França, *lavaka* em Madagascar e na Arábia como *wade*. Ressalte-se que internacionalmente *gully* se diferencia de sulco (*rill* e *interrill* erosion), quando o canal atinge em média 10cm de profundidade, ou seja, não

podendo mais ser corrigido por operações normais de cultivo (Poesen et al., 2003; Vanmaercke et al., 2021).

As voçorocas têm sido reconhecidas ao longo da história como o principal processo de degradação da superfície e, em diversas situações, associado ao uso incorreto e insustentável do solo (Bacellar; Netto; Lacerda, 2005; Morgan, 2005; Marchioro; Andrade; Oliveira, 2016; Gaia-Gomes et al., 2020; Liu et al., 2021). Entretanto a formação de voçoroca é um assunto que tem gerado debates e divergências entre diferentes autores, resultantes dos seus diferentes campos de pesquisa e as diferentes abordagens do fenômeno. Por exemplo, Pennock (2019), definem as voçorocas como canais incisivos que não podem ser preenchidos por operações normais de lavoura, indicando que é definição semelhante à empregada para ravinas, sem distinção entre ambas.

Na literatura nacional não há consenso sobre a distinção entre as ravinas e as voçorocas. Todavia, diversos pesquisadores, desde Pichler, (1953), como Castro, (2005); Carvalho, (2006); IPT, 1986; Canil, (2000); Kuhn et al., (2023); Salomão, (2015); entre outros, indicam que a erosão tipo ravina é desencadeada basicamente pelo escoamento superficial concentrado descendente das águas pluviais (ou irrigadas), com formas em “V”, enquanto a voçoroca se dá quando também ocorre o escoamento subsuperficial igualmente linear, evolução remontante e interceptação do lençol suspenso ou do freático em geral a jusante, mostrando formas em “U” e tendência a se alargar e se aprofundar até atingir o seu equilíbrio hidrodinâmico, podendo ramificar lateralmente, tanto por ravinamento, como voçorocamento e adquirir formas variadas (ovóides, em anfiteatro, linear s.s., etc).

Na literatura internacional, o termo *gully* equivale a ravina, e é empregado também para voçorocas, entretanto não como conceituadas no Brasil, embora sempre correspondendo a uma erosão profunda, sem, no entanto, haver distinção entre a atuação ou não do lençol suspenso ou freático na sua definição. Blanco e Lal (2008) apontam que *gully* é tida como erosão na forma de canais de incisão linear em forma de V ou U com pelo menos 0,3m de largura e 0,3m de profundidade, formada principalmente pelo escoamento superficial concentrado e convergente para os pontos mais baixos do relevo, o que no Brasil seria ravina. Já as *gullies* (no plural) seriam formadas pela expansão de canais incisivos existentes, de fluxos de água concentrados que se conectam (Mcivor et al., 2017; Poesen et al., 2003; Queensland, 2022; Vanmaercke et al., 2021).

Vários autores, como Oliveira (1999) e Morgan (2005), afirmam que as voçorocas ocorrem devido a diversos mecanismos que operam em diferentes escalas, influenciados por variações nas precipitações que contribuem com o processo erosivo ao longo do tempo, sendo resultado da busca pelo equilíbrio entre disponibilidade e dissipação de energia em sistemas naturais. Elas podem se formar pela ampliação de ravinas e colapsos subsuperficiais que resultam em afundamento no terreno, acumulam água e também por deslizamentos antigos. Porém, essas estruturas são mais profundas e estreitas que canais fluviais, cortam as vertentes perpendicularmente, alcançam camadas profundas do solo e até da rocha alterada e apresentam taludes verticais e fundo chato, como descrito por Lepsh (2002).

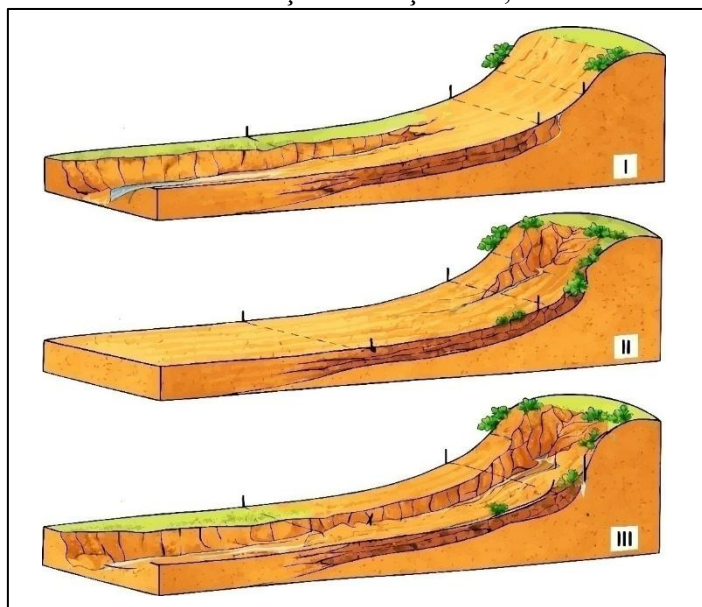
Antes, Iwasa e Prandini (1982), consideravam voçorocas como ravinas profundas, que se originaram preferencialmente ao longo de linhas de drenagem, tanto sobre sedimentos coluviais ou aluviais, como em solo residual (em engenharia/geotecnia é solo desenvolvido), em encostas naturais, por ação combinada entre as águas superficiais e subterrâneas. Entretanto, o IPT (1986) e Magalhães (2001), defendem a ideia de que só é considerada voçoroca quando a incisão intercepta o nível freático ou um lençol suspenso, apresentando sua exfiltração na forma livre por meio de pontos de surgência de lâminas ou túneis, dutos (*pipes* em inglês), denominados internacionalmente de

erosão interna. Ou seja, para a ocorrência desse processo, o escoamento subsuperficial cria dutos internos que podem exfiltrar nos taludes das voçorocas, onde se mostram como entradas de túneis. Esse processo é denominado de *piping* (em inglês) ou em dutos, além de erosão tubular progressiva, retroerosão tubular, entubamento em geotecnia (e em português), o qual provoca a remoção de partículas do interior do solo formando canais subterrâneos que evoluem em sentido contrário ao do fluxo de água, ou seja, remontantemente, podendo dar origem a colapsos do terreno acima deles, que alargam a voçoroca ou criam novos ramos (Marchioro; Andrade; Oliveira, 2016; Salomão, 2015). Os taludes das voçorocas geralmente apresentam movimentos de massa, como escorregamentos, deslizamentos e similares, sobretudo no seu terço médio e superior, onde estão ativas e sedimentação no inferior (IPT, 1986).

Vários autores propuseram classificações e formas de voçorocas. Recentemente, Utsumi (2019), Chakraborty e Pal (2023) e Liu et al. (2023), classificaram a duração das voçorocas em: Efêmeras, Permanentes (clássicas) e as de Ribanceira. Em áreas agrícolas as permanentes são definidas como canais profundos, os quais dificilmente são removidos por equipamentos agrícolas. As efêmeras são pequenos canais de drenagem, que podem se transformar em voçorocas permanentes se não forem preenchidos (Smith, 1993). Já as voçorocas de ribanceira são canais formados devido à altura da queda da água, resultante da diferença de nível entre a área de drenagem e o curso d'água, em locais com margens erodíveis (Vandekerckhove et al., 2000).

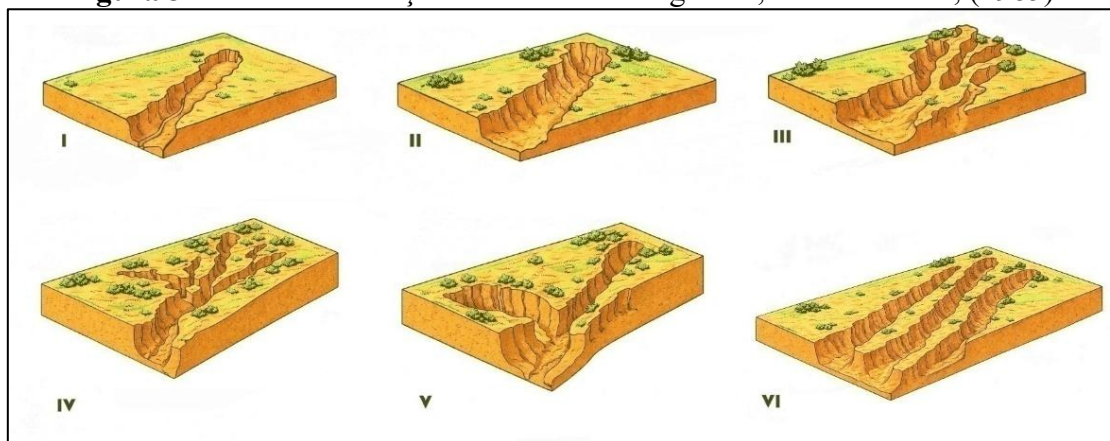
Oliveira et al. (1996), por sua vez, propuseram três tipos: as voçorocas conectadas à rede regional de canais de drenagem, as desconectadas e as resultantes da combinação das duas anteriores (Figura 2). As voçorocas conectadas estão associadas ao escoamento subterrâneo nas partes baixas da encosta e são consideradas um canal de primeira ordem. As desconectadas, encontradas na parte superior da encosta, estão associadas ao escoamento subterrâneo das partes baixas da encosta, não podendo ser ainda consideradas um canal de primeira ordem. As desconectadas, situadas na parte superior da encosta, estão ligadas ao escoamento superficial e não poderiam ainda ser consideradas um canal de primeira ordem em virtude de não estarem ligadas à rede de drenagem; e o terceiro tipo, seria a junção das duas formas anteriores (voçorocas conectadas e voçorocas desconectadas), formando uma só incisão erosiva (Oliveira, et al., 1996).

Figura 2 – Modelo de classificação de voçorocas, conforme Oliveira (1996)



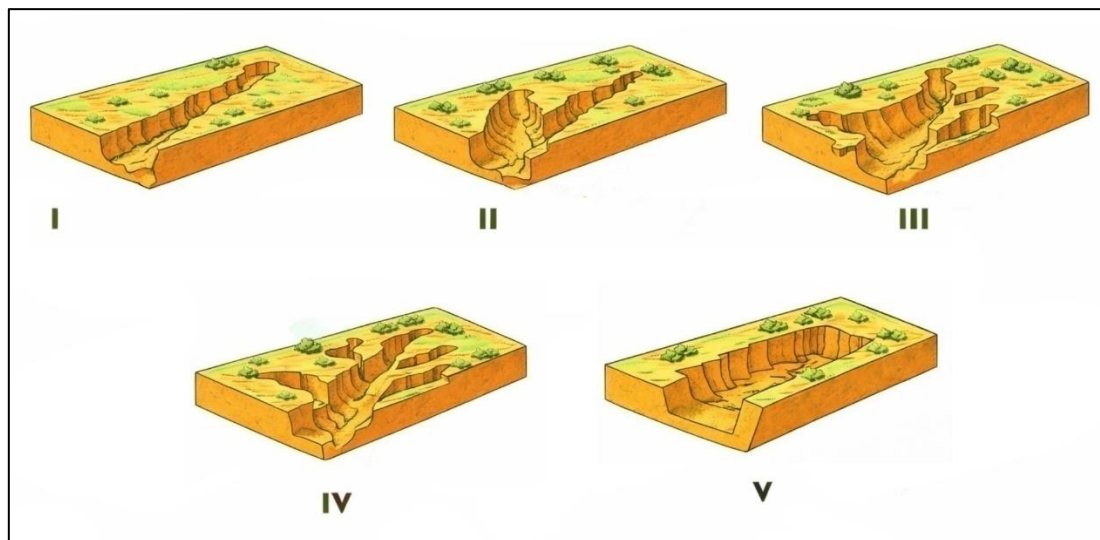
No que diz respeito às formas da voçoroca, Ireland (1939, apud Bigarella; Mazuchowski, 1985), propunha 6 formas: linear, bulbiforme, dendrítica, entreliça, paralela e composta (Figura 3). A partir delas, Vieira (2008) determinou cinco padrões de formas de voçorocas, sendo: a linear - que está ligada à existência de uma zona principal de convergência de drenagem; a bifurcada - que apresenta duas zonas de contribuição de fluxos superficiais concentrados; a ramificada que se caracteriza pela ocorrência de vários canais de drenagem superficiais conectados ao principal; a irregular - que pode estar ligada a existência de um ou mais fluxos superficiais concentrados, caracterizando-se transitória entre as outras formas existentes; a retangular - pode ser na maioria dos casos a forma final da expansão de uma das outras formas descritas (Figura 4).

Figura 3 – Formas das voçorocas conforme Bigarella; Mazuchowski, (1985).



Fonte: Adaptado de Bigarella; Mazuchowski, (1985). (I- Linear; II- Bulbiforme; III- Composta; IV- Dendrítica; V- Entreliça; VI- Paralela).

Figura 4 – Formas das voçorocas adaptadas de Vieira (2008).

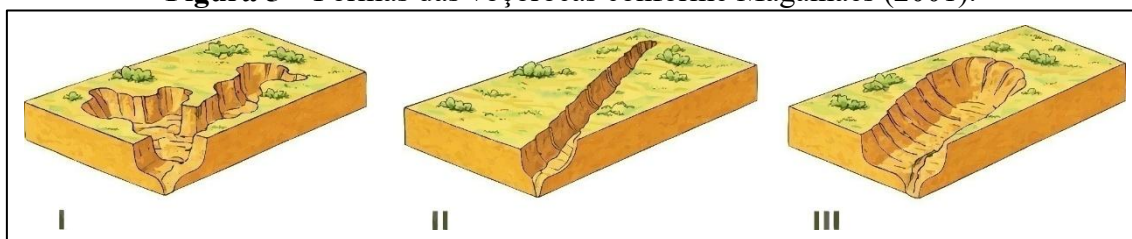


I- Linear; II- Bifurcada; III- Irregular; IV- Ramificada; V- Retangular

Magalhães (2001), ainda propôs três categorias de formas de voçorocas: Coalescentes, Lineares e Ovoides (Figura 5). Nas coalescentes observa-se a presença de vários anfiteatros, devido a existência de ramificações do eixo principal, que evoluem de forma independente. As lineares apresentam um grande desenvolvimento longitudinal, assemelhando-se a um cânion, mas terminando a jusante, igualmente, por um canal estreito. E as ovoides, que têm a forma de anfiteatro de paredes íngremes a montante e um canal a jusante.

Convém esclarecer que todas essas formas citadas e ilustradas nas Figuras 1 a 4 foram consideradas neste trabalho, no mapeamento das feições aqui denominadas de focos de erosão linear, mas sem distingui-las quanto às suas formas e nem diferenciando as ravinas das voçorocas, devido à escala do mapeamento e objetivos da pesquisa.

Figura 5 – Formas das voçorocas conforme Magalhães (2001).



I- Coalescentes; II- Lineares; III- Ovoides.

Em suma, as voçorocas tendem a se aprofundar e se estender impulsionadas por um processo de retroalimentação que ocorre quando elas interceptam o lençol freático, resultando em um fluxo que contribui para o crescimento retroativo (remontante) da feição erosiva (IPT, 1986; Salomão, 1994, 1999 ou 2015), atingindo o perfil de equilíbrio dinâmico quando entrada e saída de água se equivalem. Com o aprofundamento da voçoroca, inicia-se também a ocorrência de movimentos de massa nos seus taludes, como desmoronamentos (abatimentos), escorregamentos/deslizamentos nos taludes

laterais, que criam degraus e contribuem para a expansão da erosão e sua configuração em “U”. Diversos tipos de voçorocas podem se formar, variando em número de ramificações (Oliveira, 1999).

Quando as voçorocas atingem grandes dimensões e impactam fortemente áreas urbanas ou periurbanas (*offsite*), interferindo na vida cotidiana, comprometendo a infraestrutura e edificações, e até mesmo ameaçando reservatórios e rodovias, torna-se essencial adotar medidas de contenção (IPT, 1986; Almeida e Ridente Junior, 2001; Salomão, 2015). Por exemplo, Cavalcanti e Castro (2016; 2021; 2022a,b) ao estudarem a erosão urbana de Goiânia (GO) a relacionaram à expansão urbana espontânea e sem planejamento urbano ou de microdrenagem urbana, porém, quando surge o Plano Diretor em 2007, diminuem notavelmente em número, em resultado das obras de contenção envolvendo barramentos, retaludagem e disciplinamento da microdrenagem.

As ocorrências em grandes rodovias e nas áreas urbanas incluem a retaludagem, técnica de diminuir a inclinação dos taludes para estabilizar a área, e a implementação de sistemas de drenagem (canalização) para conduzir as águas aos canais fluviais ou lagos e similares próximos. Os barramentos internos são transversais à voçoroca e contribuem para reduzir a energia dos fluxos de água, facilitando a sedimentação e auxiliando no preenchimento do fundo das voçorocas. Adicionalmente, é crucial adotar práticas de manejo conservacionista na área acima das voçorocas, conhecida como área de contribuição, geralmente concavizadas suaves, como a criação de terraços e a instalação de dispositivos para dissipar a energia das águas e promover a infiltração, reduzindo assim o risco de atrito da água e assim a instalação ou intensificação da erosão linear (Bertoni; Lombardi Neto, 1990; Salomão, 1999). O DAEE/IPT(1989), Magalhães (2001) e Filizola et al (2011) publicaram artigos indicando as formas de controle de ravinas e voçorocas.

Nas regiões tropicais úmidas e subúmidas, como o Bioma Cerrado, o estudo da erosão hídrica causada pela precipitação pluvial e seu impacto na energia superficial é um tópico central de pesquisa. A sazonalidade climática dessas regiões, com cerca de 80% da precipitação concentrada na primavera- verão, combinada com uma ampla camada de intemperismo químico e físico das rochas (regolitos ou saprólitos), cria condições favoráveis para a geração de grandes quantidades de materiais desagregados que são transportados e depositados a jusante durante eventos de chuva intensa (Porto, 1996).

Nas últimas décadas, a discussão sobre os impactos ambientais do uso inadequado do solo, principalmente como causa de erosão hídrica, ganhou relevância, geralmente focada nas mudanças de uso do solo. Os processos erosivos, especialmente nas partes altas das grandes bacias hidrográficas, afetam todo o curso d’água, podendo ameaçar grandes reservatórios e colocar em risco o fornecimento de energia hidrelétrica e de água, dada a dependência da matriz energética e hídrica do Brasil (Cerdà; Doerr, 2008).

É importante ressaltar que a erosão, sobretudo de médio e grande porte, com centenas a alguns milhares de metros de extensão do eixo maior ou único, é um processo irreversível em termos históricos, pois não causa apenas o rebaixamento contínuo da superfície terrestre e do nível freático devido exfiltração livre, como também desestrutura os solos, levando à sua degradação e empobrecimento. Como resultado, grandes extensões de terras agricultáveis podem ser afetadas e mesmo perdidas e abandonadas. A erosão pode ainda resultar no alargamento dos canais de drenagem, devido o mecanismo de migração sazonal dos cursos d’água, impulsionado por elevadas deposições laterais em segmentos convexos e de baixo gradiente altimétrico, principalmente durante períodos de baixa e alta vazão. Quando a erosão acontece nas partes mais elevadas das grandes bacias hidrográficas, seus efeitos se estendem por todo o curso de água, ameaçando ambientes distantes das áreas erodidas (IPT, 1986; Pimentel; Burgess, 2013; Salomão, 1999, dentre outros).

Condicionantes, escalas e métodos de estudo da erosão linear

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2010), a erosão não é a mesma em todos os solos, pois suas propriedades físicas, estrutura, permeabilidade, densidade, características químicas e biológicas são diferentes e exercem influência também diferente no processo erosivo. Mesmo assim, os métodos deveriam seguir um tronco comum, mas não é o que acontece. Contudo, condicionantes são preocupação constante.

Nesse sentido, a erosão resulta de fatores (ou variáveis) que favorecem sua instalação e desenvolvimento, os condicionantes, como o clima, sobretudo chuva (erosividade); solos (erodibilidade); topografia (declive, comprimento de vertente ou rampa, formas ou geoformas); cobertura vegetal (densidade de cobertura) e ação antrópica (uso ou não de práticas conservacionistas). Tais condicionantes são variáveis na análise do processo com vistas à elaboração de modelos a partir de expressões matemáticas e computacionais. Nestes se transformam em grupos de variáveis representativas de diversos fatores da paisagem, como a topografia, propriedades do solo, variáveis meteorológicas e as práticas conservacionistas (Farinasso et al., 2006, entre outros). Cada um dos condicionantes exerce funções no processo erosivo, como a seguir.

O clima, através do regime pluviométrico, é um condicionante fundamental da erosão hídrica, representado pela erosividade, que é a capacidade da chuva de causar erosão e quantificar as perdas de solo (Bertoni; Lombardi Neto, 2010). O impacto das gotas de chuva ao atingirem o solo depende principalmente da intensidade da precipitação, das inclinações das gotas e da sua velocidade, que, por sua vez, depende da intensidade e do intervalo de ocorrência. A erodibilidade, outro condicionante, é ditada pelos solos, os quais possuem propriedades físicas que determinam a maior resistência à ação erosiva da água, tais propriedades se destacam como sendo a textura, estrutura, permeabilidade, densidade, características químicas, biológicas e mineralógicas. A topografia está intimamente ligada à declividade, sendo um fator que interfere diretamente na velocidade do fluxo hídrico de escoamento (Bertoni; Lombardi Neto, 2010).

A cobertura vegetal atua como capa protetora do solo, devido copas (árvores) ou superfícies protetoras (entrelaçamento de gramíneas), além de enraizamento e fornecimento de matéria orgânica que se decompõe e cimenta os grãos, regenerando a agregação ou evitando a desagregação das partículas, além de dispersar a água incidente sobre o solo e das raízes auxiliando no aumento da infiltração da água. Finalmente, como elemento decisivo na produção e aceleração dos processos erosivos o fator antrópico é contemplado, sendo responsável pelas atividades de uso e manejo do solo, como desmatamento, cultivos, implantação de estradas, criação e expansão das áreas urbanas, as quais são muitas vezes efetuadas de forma inadequada (Pruski, 2009).

Todos esses condicionantes interagem e se integram de maneira a configurar as paisagens, possibilitando o seu estudo quanto às suas características e potencialidades, separadamente, como variáveis e integradamente como modelo. Isto porque são parte de um único sistema que corresponde à fisionomia e fisiologia de uma paisagem, sendo fundamental a correlação delas em um dado ambiente, principalmente em estudos voltados para a degradação por erosão, muitas vezes reconfigurando as paisagens. Nesse sentido, entendida como um fenômeno multifatorial, a erosão é tratada por Oliveira e Castro (2005), quando afirmam que os estudos ambientais voltados à análise integrada da paisagem, o cruzamento e ou mesmo a interpolação de dados possuem grande importância para a compreensão da relação entre os fatores físicos estruturantes de uma dada área e por permitirem o entendimento da dinâmica geoambiental e seus produtos.

Os processos erosivos e seus condicionantes variam de acordo com a escala de estudo (Morgan, 2005). Nesse sentido, a erosão possui condicionantes diversos, que incidem em variados ambientes, atingindo de pequenas a grandes áreas. Pesquisas em escala regional são importantes, entretanto limitadas. Veldkamp et al. (2001), afirmam que estudos que abordem múltiplas escalas podem melhor subsidiar o planejamento, em que as ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) facilitam esse processo, pois que auxiliam nas análises e elaborações gráficas e cartográficas e diminuem o tempo da investigação.

Consequentemente, a análise multiescalar, que envolve mais de uma escala de estudo na avaliação de um dado fenômeno, contribui para a análise da variabilidade espacial do fenômeno e dos atributos que compõem cada dimensão de abordagem. Castro (2005) salientam que não há escala mais ou menos válida, já que a realidade está contida em todas elas e a mudança não é apenas um recorte espacial e, sim, a adequação qualitativa do fenômeno a ser explicado. Dessa forma, o conhecimento sobre erosão pode ser variado, a depender da abordagem e do objetivo proposto, portanto, um estudo que possui variabilidade de dados que vai da escala local à global necessita de entendimento dos componentes da paisagem que vão além do foco erosivo em si. Boardman (2006), considera que há uma grande dificuldade no reconhecimento, descrição e quantificação da erosão e as informações sobre sua magnitude e frequência dos eventos que causam a erosão são limitados, as abordagens de estudos normalmente se repetem em questões escalares espaciais e temporais e os modelos precisam ser desenvolvidos para muitas finalidades e em muitas escalas.

O fenômeno erosão visto em escala regional e depois na local varia de forma significativa, pois na local ocorrem componentes que facilitam a identificação da suscetibilidade e a feição erosiva pode ser estudada em termos geométricos reais e quantificar a perda do solo. Nunes e Castro (2023) explicam que duas escalas podem ser utilizadas no estudo, a cartográfica e a geográfica. A cartográfica é vista como uma aproximação, ou redução, do real, mediante uma representação reduzida do espaço através de uma forma geométrica; e a geográfica, que exprime a extensão real do fenômeno na superfície terrestre e a representação das relações que a sociedade mantém com os padrões de transformação e reconfiguração socioespacial dos territórios humanos.

Em termos metodológicos, a abordagem multiescalar, como proposto por Nunes (2015) para Mineiros (GO) e arredores, adaptado de Rodrigues (2020) para o estado de Goiás, defendem a adoção do modelo conceitual de base física nos estudos, pois que ele contempla escalas sucessivas de aproximação do processo erosivo, do geral ao local, com base na análise integrada das variáveis do meio físico e biótico, dita sistêmica. De modo geral, a estratégia baseia-se numa abordagem geoespacial multiescalar decrescente em área, ou em zons sucessivos, acompanhada de geocartografia dos componentes da base física, iniciando-se pelo inventário e mapeamento dos focos erosivos com auxílio de sensoriamento remoto e geoprocessamento utilizando SIG na escala sub-regional e estadual. E prossegue com a elaboração do mapa de isodensidades dos focos em número de focos/km², que permitiu a identificação das áreas críticas, correspondentes às de maior densidade de focos segundo a ferramenta Kernel do ArcGis. Após esse procedimento selecionaram-se as áreas críticas, representativas, nas quais procederam às análises em escala local, de compartimentação morfopedológica, de suscetibilidade erosiva e suas relações com a distribuição dos focos erosivos e os condicionantes do meio físico e biótico, ou seja, mapas temáticos do meio físico e biótico, que foram correlacionados espacialmente, na mesma escala, com vistas a identificar as principais causas do processo.

Por fim, é importante enfatizar que a escala é a medida que confere a visibilidade de um dado fenômeno, no entanto, não se esgota como projeção gráfica, e sim

como mediadora da pertinência da ligação entre unidade de observação e um atributo a ela associado (Rodrigues, 2020).

Modelagem de erosão

Um dos grandes desafios no campo das Geociências, em especial da Geografia Física, é a modelagem de fenômenos ambientais multifatoriais em diferentes escalas espaço-temporais, com eficiência e precisão suficientes para representações mais fidedignas de processos, o mais próximo possível da realidade (acurácia). Tais representações permitem tomadas de decisões mais adequadas. Nesse sentido, a modelagem da erosão do solo é uma ferramenta eficaz para avaliar estratégias de controle da degradação ambiental que causa, sendo útil para o planejamento de ações ambientais e territoriais. Além disso, serve como uma base inicial para futuros aprimoramentos na pesquisa (Azedou et al., 2021).

Dessa forma, a função dos modelos de erosão é permitir uma visão mais abrangente e integrada do processo erosivo, que vai além de observações pontuais no espaço e no tempo (Jetten; Govers; Hessel, 2003; Mohebzadeh et al., 2022). Tal modelagem se situa na interseção das abordagens climatológica, geomorfológica, pedológica e influências antrópicas e tem se tornado cada vez mais viável nos últimos anos devido o processamento de dados espaciais imageados e georreferenciados de boa precisão e acurácia (Mitasova et al., 2006). Blanco e Lal (2008), entre outros, defendem a ideia de que a modelagem de erosão hídrica é importante para a percepção do processo de predição de taxas de escoamento superficial, visando a identificação das melhores alternativas de controle.

Além da modelagem permitir identificar os condicionantes do processo, também permite avaliar e correlacionar os impactos diretos e indiretos na produtividade agrícola e também na poluição do solo e águas em escala de detalhe, além de identificar estratégias de controle e mitigação, bem como implementar práticas conservacionistas. Para Blanco e Lal (2008), a modelagem permite:

- (1) compreender os fatores que influenciam o processo;
- (2) avaliar os impactos diretos e indiretos na produtividade agrícola, desde grandes áreas até detalhes mais específicos;
- (3) identificar estratégias de controle; e (4) implementar práticas conservacionistas para mitigar os efeitos do processo erosivo.

As geotecnologias combinadas com a matemática aplicada e o conhecimento de processos físicos, têm proporcionado novas oportunidades para a compreensão de problemas ambientais extremamente complexos, como é o caso dos relacionados à erosão hídrica linear. A utilização dessa tecnologia faz parte das novas metodologias desenvolvidas e bastante testadas nas últimas décadas, embora tenham limitações, mas apresentam resultados bem-sucedidos (Pechlivanidis et al., 2011).

Cabe ressaltar, ainda, que o entendimento do fenômeno erosivo hídrico, intrínseco ao processo de evolução do relevo, requer uma estreita colaboração com outros campos do conhecimento, como matemática, física, agronomia, computação e ciências sociais aplicadas, incluindo a geografia (Nunes, 2015), portanto, trata-se de abordagem multidisciplinar integrada. Isso é necessário para compreender como as atividades humanas alteram as propriedades das camadas superficiais do solo e como essas interações, em conjunto com o relevo, afetam a dinâmica dos sistemas ambientais.

Em termos das unidades espaço-temporais, como paisagens, territórios e bacias hidrográficas ou determinados segmentos territoriais (bairros rurais, assentamentos agrários ou urbanos etc), a modelagem segue recortes geográficos que têm sido

considerados relevantes para o estudo desse fenômeno, ainda que os modelos sejam representações aproximadas do mundo real, alcançadas através da seleção, organização e observação sistemática de dados, especialmente na composição de variáveis com seus respectivos parâmetros. Contudo, são possíveis com as observações, medidas associadas e inter-relações existentes entre as variáveis de um determinado sistema. Os modelos são valiosos por filtrarem detalhes acidentais e destacarem aspectos considerados fundamentais da realidade, permitindo assim a compreensão e visualização de eventos e fenômenos que, de outra forma, seriam inviáveis devido à magnitude e complexidade da maioria dos sistemas, principalmente os ambientais (Bezak et al., 2022; Brannigan et al., 2022).

Todavia, a complexidade dos modelos se deve principalmente a dois fatores: as variáveis envolvidas e a correspondência entre seus respectivos parâmetros, bem como a escala. A representação do mundo real em meio computacional implica na redução dos objetos e fenômenos para uma escala adequada (Christofolletti, 1999). Nesse contexto, as imagens e os mapas são considerados modelos mais simples de representação, baseados em uma concepção estática do espaço. As imagens são como fotografias de um recorte espacial num determinado momento, representando também elementos planimétricos e, ou altimétricos. Já os mapas utilizam abstrações simbólicas de aspectos considerados fundamentais da realidade do espaço, selecionando apenas elementos específicos para a representação, ou seja, a semiótica cartográfica (George, 1975).

Quanto à atribuição de informações, os mapas possuem limitações impostas pela escala e qualidade dos materiais utilizados no processo cartográfico, bem como nas legendas adotadas. Por isso, alguns mapas têm um sentido mais topológico do que topográfico, o que significa que para modelar um fenômeno usando imagens e mapas, é essencial garantir uma representação precisa, vinculada à escala escolhida, especialmente em relação às formas e medidas que o fenômeno possui no espaço, pois essas são expressões espaciais dos processos envolvidos (Christofolletti, 1979).

No processo de representação de fenômenos espaço-temporais é importante destacar a questão dos conceitos utilizados nas representações. O mapa está relacionado à representação de objetos e fenômenos, sem necessariamente focar nas relações entre as variáveis que ajudam a entender esses fenômenos. Já o modelo surge mais quando a representação resulta da análise qualitativa ou quantitativa das relações entre variáveis que são necessárias para a representação de fenômenos multifatoriais. Portanto, a modelagem busca reproduzir um resultado de dado processo ao longo de um determinado intervalo de tempo, sendo assim, o foco do modelo está no resultado (Mitasova et al., 2006).

Na modelagem, outra questão importante é a gradação, que consiste na classificação ordenada que permite representar a intensidade resultante da convergência de variáveis que levam à ocorrência de um determinado fenômeno. Isso se deve, em grande parte, à precisão proporcionada atualmente pelo uso de materiais e novas geotecnologias, que permitem um tratamento metodológico mais preciso. Nesse sentido, podem ser mencionados os produtos cartográficos básicos e os softwares para processamento de dados espaciais georreferenciados (Fernandes, 2016). Na modelagem de fenômenos ambientais, como a erosão hídrica, busca-se descrever matematicamente o processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas. Tal modelagem pode ser diagnóstica, buscando compreender o fenômeno em uma área específica, ou prognóstica, com o objetivo de previsão ou prognóstico ou predição.

Considerando as bases conceituais que levam em conta os processos envolvidos e os algoritmos utilizados, Nunes (2015) compilou e distinguiu exemplos de modelos como conceituais, empíricos ou estatísticos e os de base física, ou seja, de processos

físicos (Quadro 2). Segundo o autor, os modelos conceituais são baseados em um conjunto de relações expressas por fórmulas com a intenção de representar o funcionamento das partes, bem como de um sistema, ainda que de forma simplificada. É exemplo o modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998) que trata da predição do escoamento com base no Método Cinemático (CM) do Soil Conservation Service (SCS) e a AGNPS (A Non-Source Pollution Model) (Young et al., 1989), projetado para estimar quantitativamente as cargas de poluição de bacias hidrográficas agrícolas e para avaliar os efeitos relativos de programas de manejo alternativo. A predição da perda do solo nesses dois modelos é calculada por meio dos fatores da RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al., 1997) e MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) (Williams; Berndt, 1977), derivadas da USLE (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier e Smith (1978) e posteriormente baseada na tensão do cisalhamento, velocidade de queda e distribuição granulométrica do sedimento.

Quadro 2 - Síntese dos principais modelos de erosão, suas características e autores.

Modelo	Características do modelo	Autor(es) do modelo
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	Modelo conceitual voltado à predição do escoamento. Baseia-se no Método Cinemático do Soil Conservation Service e utiliza fatores da RUSLE/MUSLE para estimativa de perda de solo.	Arnold et al. (1998)
AGNPS (A Non-Source Pollution Model)	Modelo conceitual projetado para estimar quantitativamente cargas de poluição difusa em bacias hidrográficas agrícolas e avaliar efeitos de manejos alternativos. A predição da perda de solo também utiliza fatores da RUSLE/MUSLE.	Young et al. (1989)
RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)	Modelo empírico/estatístico amplamente utilizado para estimativa da perda de solo. Trabalha com variáveis como erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas.	Renard et al. (1997)
MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)	Modificação da USLE, aplicada à estimativa de perda de solo e produção de sedimentos, incorporada em outros modelos hidrológicos e de erosão.	Williams e Berndt (1977)
USLE (Universal Soil Loss Equation)	Equação empírica clássica de estimativa de perda de solo, base para derivações posteriores como a RUSLE e a MUSLE.	Wischmeier e Smith (1978)
WaTEM/SEDEM (Water and Tillage Erosion Model and Sediment Delivery Model)	Modelo empírico que espacializa a produção de sedimentos a partir de dois componentes principais: perda de solo e capacidade de transporte. Faz uso da RUSLE.	Verstraeten et al. (2006)
WEPP (Water Erosion Prediction Project)	Modelo de base física, capaz de estimar perdas de solo e água com base em processos físicos. Integra clima, irrigação, hidrologia, balanço hídrico, solos, uso e manejo, preparo do solo, deposição e transporte de sedimentos.	Flanagan e Nearing (1995)
EUROSEM (European Soil Erosion Model)	Modelo de base física de predição da erosão por equação de balanço de massa. Mede transporte, erosão e deposição de sedimentos na superfície, considerando impacto da chuva, drenagem pelas folhas e escoamento pelo caule.	Morgan et al. (1998); Morgan (2005)

Fonte: Adaptado de Nunes (2015).

Ainda, segundo Nunes (2015), os modelos empíricos são baseados em relações estatísticas entre os dados registrados, os parâmetros e as variáveis consideradas importantes para a compreensão do fenômeno, cujos dados são obtidos por meio de monitoramento de partes menores, portanto sendo passíveis de observação, e que são consideradas representativas do sistema como um todo. Nesse sentido, Batista et al. (2019) chamam a atenção para dois modelos mais utilizados pelos pesquisadores, o modelo WaTEM/SEDEM (Water and Tillage Erosion Model and Sediment Delivery Model) (Verstraeten et al., 2006), que espacializa a produção de sedimentos envolvendo dois componentes, a perda de solo, também utilizando a equação RUSLE (Renard

et al., 1997), como descrito por Van Rompaey et al. (2001), e a capacidade de transporte. O segundo modelo é a equação RUSLE já citada, que define a perda de solo pela erosão como medida de quantidade de sedimentos produzidos e transportados no declive, que expõe corretamente a tendência das taxas de erosão. Esse modelo trabalha com variáveis como a perda de solo anual, a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, a topografia, o manejo e uso do solo e as práticas conservacionistas.

Os modelos de base física se baseiam no fluxo de energia para que um dado fenômeno possa ocorrer. Para tanto, utilizam de equações que descrevem processos físicos, tais como a variação da entrada de matéria e energia e a precipitação que implica em energia potencial, entre outras. Trata-se de modelos exigentes em termos de dados, bem como de uma correta avaliação entre as variáveis. Como exemplos pode-se citar: a WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Flanagan; Nearing, 1995), que é um modelo capaz de estimar perdas de solo e água baseado em processos físicos, incluindo uma série de componentes conceituais, caracterizados pelo clima, irrigação, hidrologia, balanço da água, solos, uso e manejo do solo, impactos de preparo do solo, deposição de sedimentos e capacidade de transporte de sedimentos; e o EUROSEM (European Soil Erosion Model) (Morgan, 2005; Morgan et al., 1998) que é um modelo de predição da erosão por meio de uma equação de balanço de massa capaz de medir o transporte, a erosão e a deposição dos sedimentos sobre a superfície, mediante a queda direta da chuva, a drenagem pelas folhas e o escoamento pelo caule.

Nos últimos anos, uma vez que dados espaciais georreferenciados podem ser processados com boa precisão e exatidão, essa abordagem se tornou cada vez mais praticada. O grande desafio dessa modelagem é que o modelo se posiciona na interface da climatologia, geomorfologia, ciência do solo, geografia, geocartografia e influência humana. Como tal, quando o objeto se situa nas interfaces, os modelos são mais complexos (Mitasova et al., 2006, Nunes, 2015). Contudo, tais modelagens, ao compreenderem e integrarem o aspecto geomorfológico como um fator de análise, em especial a evolução do relevo, apresentam amplo campo de estudo e necessitam também de colaborações de diversas áreas do conhecimento, como por exemplo a geografia, matemática, estatística, computação, agronomia, ecologia, física, ciências sociais aplicadas, dentre várias outras (Nunes, 2015).

A partir do exposto, é importante frisar que a modelagem só é possível por meio das observações das variáveis, das respectivas medidas e informações, em conjunto com as inter-relações dos componentes de um dado sistema, elucidando e realçando os aspectos de análise considerados fundamentais na compreensão da realidade, para construir meios de relação entre o teórico e o empírico. Sintetizando, a modelagem de erosão dos solos é uma forma de descrever matematicamente e estatisticamente o processo de desagregação e transporte que conduz à deposição de partículas.

Acrescente-se que a modelagem é de grande valia para o planejamento, tornando-se uma ferramenta eficaz para avaliar estratégias a serem desenvolvidas e aplicadas para o controle da degradação dos solos (Nunes, 2015). E a modelagem espacial consiste na distribuição dos potenciais de erosão e no reconhecimento e mapeamento das feições erosivas, aqui denominados de focos erosivos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A erosão hídrica constitui um dos processos geomorfológicos mais relevantes na transformação das paisagens terrestres, especialmente em ambientes tropicais submetidos a intensas intervenções antrópicas. Entre suas diferentes manifestações, a erosão hídrica linear, representada por sulcos, ravinas e voçorocas, se destaca pela capacidade de

mobilizar grandes volumes de solos/sedimentos, promover a reorganização da superfície do terreno e gerar impactos ambientais, econômicos e sociais significativos.

A sistematização teórico-conceitual apresentada neste estudo permitiu evidenciar que a erosão hídrica linear resulta de um conjunto complexo de interações entre fatores naturais da paisagem, como clima, solos, relevo e cobertura vegetal, e fatores antrópicos relacionados às formas de uso e manejo do solo. Essa natureza multifatorial reforça a necessidade de abordagens integradas para a compreensão do fenômeno, considerando simultaneamente os condicionantes ambientais e as dinâmicas socioespaciais que influenciam a sua ocorrência e evolução.

No que se refere aos processos envolvidos, verificou-se que a erosão hídrica linear constitui um estágio evolutivo da concentração do escoamento superficial e subsuperficial, iniciando-se frequentemente a partir da erosão difusa ou laminar e evoluindo progressivamente para formas mais complexas e profundas, alongadas nos terrenos. Nesse contexto, as feições erosivas lineares podem ser interpretadas como expressões morfológicas da reorganização hidrossedimentológica das vertentes, refletindo diferentes níveis de instabilidade e desequilíbrio geomorfológico das paisagens.

A análise das classificações divulgadas na literatura evidencia que, embora haja relativo consenso quanto à distinção entre sulcos, ravinas e voçorocas em termos de dimensão e profundidade, persistem divergências conceituais, sobretudo em relação aos mecanismos responsáveis por sua formação e evolução. Tais divergências decorrem, em grande medida, das diferentes abordagens disciplinares adotadas nos estudos sobre erosão, envolvendo, sobretudo os campos como a geomorfologia, a pedologia, a engenharia geotécnica e as ciências ambientais.

Outro aspecto relevante evidenciado na revisão refere-se à importância da escala de análise no estudo dos processos erosivos. A erosão hídrica linear pode ser investigada desde escalas locais, que permitem compreender a morfologia e a dinâmica das feições erosivas, até escalas regionais e sub-regionais, que possibilitam identificar padrões espaciais e áreas críticas de ocorrência. Nesse sentido, abordagens multiescalares associadas ao uso de ferramentas geoespaciais, como sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, têm ampliado significativamente as possibilidades de análise e monitoramento desses processos.

Do ponto de vista dos modelos, verificou-se que a modelagem da erosão hídrica constitui um importante instrumento analítico para compreender, representar e prever a dinâmica dos processos erosivos em diferentes escalas espaço-temporais. A literatura evidencia a existência de distintos tipos de modelos, entre os quais se destacam os conceituais, os empíricos e os de base física, cada qual com potencialidades e limitações específicas quanto à representação do fenômeno. Enquanto os modelos empíricos, como a USLE e a RUSLE, apresentam ampla aplicabilidade em diagnósticos e estimativas de perda de solo, os modelos conceituais e os de base física, como SWAT, WEPP e EUROSEM, possibilitam maior detalhamento dos processos hidrológicos, hidrossedimentológicos e das interações entre variáveis ambientais. Assim, a escolha do modelo mais adequado depende dos objetivos da pesquisa, da escala de análise, da disponibilidade e qualidade dos dados e do nível de complexidade do sistema investigado. Nesse sentido, a modelagem, especialmente quando associada às geotecnologias, amplia as possibilidades de identificação de áreas suscetíveis, de simulação de cenários e de apoio à tomada de decisão no âmbito do planejamento e da gestão ambiental.

Do ponto de vista aplicado, a compreensão das bases teórico-conceituais da erosão hídrica linear é fundamental para subsidiar estratégias de planejamento ambiental, manejo conservacionista dos solos e gestão territorial. A identificação dos condicionantes

naturais e antrópicos associados à formação das feições erosivas possibilita a elaboração de diagnósticos ambientais mais consistentes, bem como a definição de medidas de prevenção, controle e mitigação dos processos erosivos.

Por fim, destaca-se que o aprofundamento das pesquisas sobre erosão hídrica linear demanda a integração de diferentes abordagens metodológicas e escalas de análise, bem como o fortalecimento do diálogo entre diferentes campos do conhecimento. A consolidação de referenciais teóricos robustos, como o apresentado neste estudo, contribui para ampliar a compreensão dos processos erosivos e para orientar futuras investigações voltadas à análise da dinâmica da paisagem e à promoção de práticas sustentáveis de uso da terra.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de doutorado – Número do processo: 2022/12891-6.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, G. S. D.; JUNIOR, L. J. D. R. Diagnóstico, prognóstico e controle de erosão. 2001, Goiânia. In: **Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão**. Goiânia: Apostila, 2001.

ANACHE, J.A., FLANAGAN, D.C., SRIVASTAVA, A., WENDLAND, E.C., Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. *Science of The Total Environment* 622-623, 140–151.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.257>, 2018

ARAUJO, M.M.F.; SANTOS, G.B.; OLIVEIRA, M.; KLITZKE, K.; NACHTIGALL, S.D.; MIGUEL, P>; STUMPF, L. **Modelagem da Erosão Hídrica do Solo no Brasil: Uma Revisão Sobre os Principais Métodos e Modelos**. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.18, n.05 3948-3967, 2025.

ARNOLD, J. G., R. SRINIVASAN, R. S. MUTTIAH, AND J. R. WILLIAMS. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* 34(1):73-89, 1998.

AZEDOU, A., FERNANDES, A., SILVA, B., GOMES, C., PEREIRA, D. A. A methodological comparison of three models for gully erosion susceptibility mapping in the rural municipality of el faid (Morocco). *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 2, 2021.

BACELLAR, L. de A. P. **Condicionantes Geológicas, Geomorfológicas e Geotécnicas dos Mecanismos de Voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG**. 2000. 226 f. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Rio de Janeiro, 2000.

BARBOSA, F. T., COOPER, A. C., OLIVEIRA, M. A. DE, MARQUES JUNIOR, E., FOLEGATTI, M. V. Comprimento crítico de declive relacionado à erosão hídrica, em



três tipos e doses de resíduos em duas direções de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, 2012.

BARRETTO, A.G.O.P.; BARROS, M.G.E.; SPAROVEK, G. Bibliometria, história e geografia da pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (Impresso), v. 32, p. 2443-2460, 2008

BARRETO, A. G. O. P. ; SIQUEIRA, L.J. ; SPAROVEK, G. . Bibliometria da pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo: instituições, temas, espaço e cronologia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (Impresso), v. 33, p. 1845-1854, 2009.

BATISTA, P. V. G., SILVA, R. B., MARTINS, F. D., GONÇALVES, A. L., SANTOS, M. A., ALMEIDA, T. M. On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough?. **Earth-Science Reviews**, v. 197, 2019.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação Do Solo**. [S. l.: s. n.], 2010.

BEZAK, N., HIRN, B., JEMISON, N. E., MALOY, M. A., WEI, C., ZHANG, Y. Outreach and Post-Publication Impact of Soil Erosion Modelling Literature. **Sustainability** (Switzerland), v. 14, n. 3, 2022.

BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, J. Visão Integrada da Problemática da Erosão. **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE**, 1985.

BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. [S. l.: s. n.], 2008.

BOARDMAN, J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. **Catena**, v. 68, n. 2–3, 2006.

BORRELLI, P., ROBINSON, D.A., FLEISCHER, L.R., LUGATO, E., BALLABIO, C., ALEWELL, C., MEUSBURGER, K., MODUGNO, S., SCHÜTT, B., FERRO, V., BAGARELLO, V., VAN OOST, K., MONTANARELLA, L., PANAGOS, P., An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature Communications** 8, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>, 2017

BRANNIGAN, N., KUMAR, S., SMITH, J., THOMPSON, L., TAN, C. Modelling soil erosion by water under future climate change: Addressing methodological gaps. **Catena**, v. 216, 2022.

CANIL, K. **Processos erosivos e planejamento urbano: carta de risco de erosão das áreas urbana e periurbana do município de Franca, SP**. 2000. 96 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geografia- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CARVALHO, H.S.M. & CASTRO, S.S. Mapeamento e identificação de áreas críticas à erosão hídrica linear: o exemplo do bioma Cerrado no estado de Goiás, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia** v. 24, nº ESPECIAL, 2023.
<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2373>

CARVALHO, J. C., LIMA, C. G., PEREIRA, F. G., SILVA, M. R. **Processos erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. [S. l.: s. n.], 2006.



CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. **Earth-Science Reviews**, v. 160, 2016.

CASTRO, S. S. Erosão hídrica na alta bacia do rio Araguaia: distribuição, condicionantes, origem e Dinâmica atual. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo / USP**, São Paulo, v. 17, p. 38-60, 2005. DOI: 10.7154/RDG.2005.0017.0004.

CAVAGUTI, N. **Erosões lineares e solos urbanos – estudos, caracterização e análise do meio físico de Bauru, São Paulo**. 1994. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia- UNESP, Bauru, 1994.

CAVALCANTE, L. R.; CASTRO, S. S. **Space-Time Dynamics of Urban Water Erosive Features in Brazil: The Case of Goiânia, Capital of Goiás State**. In: Antônio Avelino Batista Vieira;. (Org.). *Soil Conservation: Strategies, Management and Challenges*. 4ed. New York: Nova Science Publishers, 2021, v. 1, p. 107-143 (Access Book).

CAVALCANTE, L.R., CASTRO, S.S. **Increase in neighborhood development and urban water erosion in tropical cities from Central Brazil: the case of Goiânia, Goiás**. ASTI Book Series (Springer). 2022

CAVALCANTE, L. R. CASTRO, S.S. **Water erosion processes in the city of Goiânia, Goiás: Methodological contribution to the study of their spatiotemporal evolution** [Conference presentation]. II Simpósio SBIDE, INDE, Brazil. 2022.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE MINAS GERAIS/CEMIG – Erosão e Formas de Controle. Belo Horizonte, apresentado no VI SNCE - Simpósio Nacional de Controle de Eerosão, Goiânia, GO. 2001.

CERDÀ, A.; DOERR, S. H. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. **CATENA**, v. 74, n. 3, p. 256–263, 2008.

CERRI, L. E. S.; SILVA, J. A. F. D.; SANTOS, P. H. P. D. Erosão do solo: aspectos conceituais. **Revista da Universidade de Guarulhos Geociências**, v. II, n. 6, 1997.

CHAKRABORTTY, R.; PAL, S. C. Systematic review on gully erosion measurement, modelling and management: Mitigation alternatives and policy recommendations. **Geological Journal**, p. 1–33, 2023.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1979.

CHRISTOFOLETTI, R. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. [S. l.: s. n.], 1999.

COLODRO, G., BONINI, C. S. B., BRITO, J. L. S., BONINI, A. L. Erosividade da chuva: distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica de Teodoro Sampaio (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 809–818, 2002.

DAEE/IPT. Departamento de Águas e Energia Elétrica /Instituto de Pesquisas Tecnológicas - **Controle de erosão: bases conceituais e técnicas, diretrizes para planejamento urbano e regional, orientações para o controle de boçorocas urbanas**. São Paulo, IPT, 1989.



FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Status of the World's Soil Resources**. Roma, 2015b. Disponível em: www.fao.org/publications.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. —. Status of the World's Soil Resources: Main Report. Roma: Revista Brasileira de Geografia Física v.18, n.05 (2025) 3948-3967. Araujo, M. M. F., Santos, G. B., Oliveira, M., Klitzke, K., Nachtigall, S. D., Miguel, P., Tumpf, L. 3962 Intergovernmental Technical Panel on Soils – ITPS, 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>

FARINASSO, M., DE CARVALHO JÚNIOR, O. A., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T., RAMOS, V. M. Avaliação Qualitativa do Potencial de Erosão Laminar em Grandes Áreas por Meio da EUPS Equação Universal de Perdas de Solos Utilizando Novas Metodologias em SIG para os Cálculos dos seus Fatores na Região do Alto Parnaíba PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, 2006.

FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. **Espaço Aberto**, v. 6, n. 1, 2016.

FILIZOLA, H. F. ; ALMEIDA Fo., G.; CANIL, K.; SOUZA, M.D.; GOMES, M.A.F. . Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, Circular Técnica 22, 2001.

FLANAGAN, D.; NEARING, M. USDA water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation, NSERL Rep. 10. **Agriculture Research Server.**, West Lafayette, Indiana, n. July, 1995.

GAIA-GOMES, J. H.; BARROS, F. C.; SANTOS, O. A. Q.; SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G. Atributos físicos e químicos do solo de voçorocas com diferentes tempos de formação. In: **Ciências agrárias: conhecimentos científicos e técnicos e difusão de tecnologias**. [S. l.: s. n.], 2020.

GEORGE, F. H. Uso de Modelos na Ciência. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (org.). **Physical and information models in geography**. São Paulo: Tradução de Arnaldo V. de Medeiros; revisão de Antônio O. Ceron e Antônio Christofolletti, 1975. p. 20–31.

GOBBI, E., BERTOL, I., BARBOSA, F. T., WERNER, R. D. S., RAMOS, R. R., PAZ-FERREIRO, J., GEBLER, L. Erosão hídrica associada a algumas variáveis hidrológicas em pomar de maçã submetido a diferentes manejos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, 2011.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. S.; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e Conservação dos Solos conceitos, temas e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 17–55.

GUERRA, A. J. T., JORGE, M. D. C. O., RANGEL, L. D. A., BEZERRA, J. F. R., LOUREIRO, H. A. S., GARRITANO, F. D. N. Soil Erosion, Different Approaches and Techniques Applied To gullies and trail erosion. **William Morris Davis: Revista de Geomorfologia**, v. 1, p. 75–117, 2020.

GUERRA, A. J. T.; GUERRA, A. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.



GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO. **Erosão e Conservação dos Solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015.

HOGAN, D. J.; CUNHA, J.M. P.; CARMO, R.L. Uso do Solo e Mudanças de sua Cobertura no Centro-Oeste do Brasil: consequências demográficas, sociais e ambientais. In: Daniel Joseph Hogan et al (Org.). *Migração e Ambiente no Centro-Oeste*: , 2002, p. 149-174.

HU, X. H. U., LIAN-YOU, L. I. U., SHUN-JIANG, L. I., QIANG-GUO, C. A. I., YAN-LI, L. Ü., JIN-RUI, G. U. O. Development of Soil Crusts Under Simulated Rainfall and Crust Formation on a Loess Soil as Influenced by Polyacrylamide. **Pedosphere**, v. 22, n. 3, 2012.

HUTCHINSON, D. E.; H. W. PRITCHARD. Resource conservation glossary. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 31, p. 1–63, 1976.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). [S. l.: s. n.], 1998. p. 131–152.

IPT - Instituto De Pesquisas Tecnológicas Do Estado De São Paulo. **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe - Paranapanema**. [S. l.: s. n.], 1986.

IWASA, Y. O.; PRANDINI, F. L. Prevenção e correção de fenômenos erosivos: as boçorocas, exemplo da necessidade de diagnose. **Geologia Ciência – Técnica**, CEPEGE, USP, v. 7, p. 1543–1548, 1982.

JETTEN, V.; GOVERS, G.; HESSEL, R. Erosion models: Quality of spatial predictions. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 5, 2003.

KUHN, C. E. S., REIS, F. A. G. V., ZARFL, C., GRATHWOHL, P. Ravines and gullies, a review about impact valuation. **Natural Hazards**, v. 117, n. 1, p. 597–624, 2023.

LABRIÈRE, N.; LOCATELLI, B.; LAUMONIER, Y.; FREYCON, V.; BERNOUX, M.; Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 203, 127-139, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027>, 2015

LAL, R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 17, n. 4, 1998.

LEPSCH. **Formação e Conservação do solo**. São Paulo: Oficina dos textos, 2002.

LIU, B., ZHANG, B., YIN, Z., HAO, B., WU, S., FENG, H., SIDDIQUE, K. Evolution and Development of Ephemeral Gully Erosion in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau in China. **Authorea**, v. 1, n. February, 2023. Disponível em: <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/au.167542754.40502792/v1>.

LIU, J., SLEETER, B., SELMANTS, P. C., DIAO, J., ZHOU, Q., WORSTELL, B., MORITSCH, M. Modeling watershed carbon dynamics as affected by land cover change and soil erosion. **Ecological Modelling**, v. 459, 2021.

MAGALHÃES, R. **Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle**. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, CEMIG, CDROM, 2001.

MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas no espírito santo: estudo de caso nos municípios de Afonso Cláudio e Alegre. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, 2016. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/712>.

MCIVOR, I., YOUJUN, H., DAOPING, L., EYLES, G., PU, Z. Agroforestry: Conservation Trees and Erosion Prevention. In: **Reference Module In Food Science**. [S. l.]: Elsevier, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081005965223822>.

MELLO, C.R., NORTON, L.D., PINTO, L.C., BESKOW, S., CURI, N.; Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia** 40, 7-25. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542016000100001>; 2016.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling and Software**, v. 18, n. 8–9, p. 761–799, 2003.

MITASOVA, H., MITAS, L., RATTI, C., ISHII, H., ALONSO, J., HARMON, R. S. Real-time landscape model interaction using a tangible geospatial modeling environment. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 26, n. 4, p. 55–63, 2006.

MOHEBZADEH, H., BISWAS, A., RUDRA, R., DAGGUPATI, P. Machine Learning Techniques for Gully Erosion Susceptibility Mapping: A Review. **Geosciences (Switzerland)**, v. 12, n. 12, 2022.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. [S. l.: s. n.], 2005.

MORGAN, R. P. C., QUINTON, J. N., SMITH, R. E., GOVERS, G., POESEN, J. W. A., AUERSWALD, K., STYCZEN, M. E. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 23, n. 6, p. 527–544, 1998.

NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; GOVERS, G. Ephemeral gullies. A spatial and temporal analysis of their characteristics, importance and prediction. **Belgeo**, n. 2, 2002.

NUNES, E. D. **Modelagem de processos erosivos hídricos lineares no município de Mineiros - GO**. Tese de doutorado. 236 f. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. de. Análise Multiescalar Aplicada À Avaliação De Erosão Hídrica Linear Para Área Tropical Subúmida Situada Na Região Sudoeste Do Estado De Goiás - Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023.

OLIVEIRA, A. M. S. **Depósitos tecnogênicos e assoreamento de reservatórios. Exemplo do reservatório de Capivara, rio Paranapanema, SP/ PR.** 1994. 211 f. - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo, 1994.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: **Erosão e conservação dos solos – conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

OLIVEIRA, M., VIEIRA, A., POSSAS, H. P., PAISANI, J. C., LOPES, L. J., LIMA, M., PONTELLI, M. E. Evolução de Voçorocas e Integração de Canais de cabeceira de Drenagem: município de Resende, RJ. In: **I Simpósio Nacional de Geomorfologia.** Rio de Janeiro, 1996.

OLIVEIRA, V. C. V.; CASTRO, S. S. de. Susceptibility and risks to water erosion in the upper of Araguaia River Basin (GO/MT), Brazil. **Sociedade e Natureza**, v. 1, n. 1, 2005.

PECHLIVANIDIS, I. G., JACKSON, B. M., MCINTYRE, N. R., WHEATER, H. S. Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. **Global Nest Journal**, v. 13, n. 3, 2011.

PENNOCK, D. Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management. rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, 2019.

PEREIRA, J. S.; RODRIGUES, S. C. Estudos sobre Voçorocas: uma avaliação da produção científica brasileira (2009/2019). **Sociedade e Natureza**, v. 34, n. 1, 2021.

PICHLER, E. Boçoroca. **Boletim de Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 2, n. 1, p. 3–16, 1953.

PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Soil Erosion Threatens Food Production. **Agriculture**, v. 3, n. 3, p. 443–463, 2013.

POESEN, J., NACHTERGAELE, J., VERSTRAETEN, G., VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **CATENA**, v. 50, n. 2–4, p. 91–133, 2003.

PORTO, M. F. Intemperismo em regiões tropicais. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. (org.). **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 25–57.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** [S. l.: s. n.], 2009.

QUEENSLAND. **Queensland Government - Gully erosion.** Queensland, 2022.

REGO, J. J. V. **Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaiss.** 1987. 125 f. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1987.

REIS, C. Direito ao desenvolvimento sustentável: reflexões a partir de Ignacy Sachs. **Revista Direito UNIFACS – Debate Virtual.** ISSN 1808-4435.



RENARD, K. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **Agricultural Handbook** No. 703, 1997.

RIBEIRO, B. T. **Solos Nos Biomas Brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas**. UDUFU, 2014.

RODRIGUES, H. S. M. C. **Análise geoespacial do processo erosivo hídrico linear no estado de Goiás e Distrito Federal**. 2020. 194 f. Tese de doutorado em Geografia- Universidade Federal de Goiás, 2020.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia*. n.8, p.63-74. 1994. DOI: 10.7154/RDG.1994.0008.0006

SACHS, I. **Rumo à ecossocioeconomia: Teoria e prática do desenvolvimento**. São Paulo: Cortez, 2007.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SACHS, I. **A terceira margem. Em busca do ecodesenvolvimento**. São Paulo: Companhia das Letras, 2009.

SALOMÃO, F. X. de T. **Processos erosivos lineares em Bauru (SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural**. 1994. 220 f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. T. G. (org.). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999

SALOMÃO, F. X. D. T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos. In: SILVA, A. S. S.; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 229–267.

SALOMÃO, F. X. de T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. DA.; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e Conservação dos Solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2015.

SALTON, J. C., MIELNICZUK, J., BAYER, C., BOENI, M., CONCEICAO, P. C., FABRÍCIO, A. C., BROCH, D. L. Soil aggregation and aggregate stability under crop-pasture systems in Mato Grosso do Sul state, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, 2008.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; DE CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, 2006.

SILVA, M. S. L. **Estudos da erosão**. [S. l.]: EMBRAPA-CPATSA, 1995.



SMITH, L. M. **Investigation of Ephemeral Gullies in Loessial Soils in Mississippi**. [S. l.]: Prepared for Soil Conservation Service, 1993.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA/SSSA. **Glossary Of Soil Scienci Terms**. 2001.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Terra: feições ilustradas**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.

TAVARES, K. S. R.; CASTRO, S. S. **Bibliometria dos estudos de erosão linear no Cerrado**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, p. 61–65, 2023.

TAVARES, K. S. R.; CASTRO, S. S. **Bibliometria das modelagens de erosão do solo: panorama geral**. In: XIII SINAGEO - Geomorfologia: complexidade e interesclaridade da paisagem análise, p. 1184–1198, 2021.

UTSUMI, A. G. **Análise De Imagens Baseada Em Objetos Geográficos - Geobia**. 2019. 84 f. Diss. Mestrado. Programa de Pós-Graduação em geografia - Universidade Estadual Paulista - UNESP, São Paulo, 2019.

VAN ROMPAEY, A. J., VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., GOVERS, G., POESEN, J. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, n. 11, 2001.

VANDAELE, K., POESEN, J., GOVERS, G., VAN WESEMAEL, B. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. **Geomorphology**, v. 16, n. 2, 1996.

VANDEKERCKHOVE, L., POESEN, J., WIJDENES, D. O., GYSSELS, G., BEUSELINCK, L., DE LUNA, E. Characteristics and controlling factors of bank gullies in two semi-arid mediterranean environments. **Geomorphology**, v. 33, n. 1–2, 2000.

VANMAERCKE, M., PANAGOS, P., VANWALLEGHEM, T., HAYAS, A., FOERSTER, S., BORRELLI, P., POESEN, J. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art. **Earth-Science Reviews**, v. 218, n. April, p. 103637, 2021.

VELDKAMP, A., VERBURG, P. H., KOK, K. G. H. J., DE KONING, G. H. J., PRIESS, J., BERGSMA, A. R. The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modeling. **Environmental Modeling and Assessment**, v. 6, n. 2, p. 111–121, 2001.

VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., VAN ROMPAEY, A., POESEN, J., GOVERS, G. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. **Soil Use and Management**, v. 18, n. 4, 2006.

VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. 2008. 206 f. Tese - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.



MPRG



TAVARES, K. S. R; CASTR, S. S. de
LINEAR WATER EROSION: A CONCEPTUAL AND
METHODOLOGICAL DISCUSSION

YOUNG, R., ONSTAD, C., BOSCH, D., ANDERSON, W. Agricultural Nonpoint Source Pollution Model: a watershed analysis tool. A Guide to Model Users. USDA **Agricultural Research Service and the Minnesota Pollution Control Agency**. April.1989.

WALTRICK, P. C., MACHADO, M. A. D. M., DIECKOW, J., OLIVEIRA, D. D. Estimativa da Erosividade de Chuvas no estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, 2015.

WEILER, E. B., TAMIOSSO, M. F., CRUZ, J. C., REICHERT, J. M., SCHORR, L. P. B., MANTOVANELLI, B. C., BAUMHARDT, E. Integrated environmental management and planning based on soil erosion susceptibility scenarios. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 4, 2021.

WEILL, M. de A. M.; PIRES NETO, A. G. Erosão e assoreamento. In: SANTOS, R. F. dos (org.). **Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** DF: Brasília: [s. n.], 2007. p. 39–58.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 20, n. 6, 1977.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook No. 537, Maryland. Science and Education Administration, U.S. **Dept. of Agriculture**; v. XXX, p. 58, 1978.



Margarida
Penteado