

Artigo de revisão

As voçorocas no Noroeste do Paraná: locais preferenciais de ocorrência na paisagem

Gullies in the Northwest of Paraná: preferential occurrence sites in the landscape

Maria Teresa de Nóbrega¹, Hélio Silveira², José Edézio da Cunha³, Maria Carolina Beckauser⁴, Cássia Maria Bonifácio⁵ e Maria Cleide Baldo⁶

¹ Universidade Estadual de Maringá, PGE-UEM, Maringá, Brasil. mtnobrega@uem.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2757-9545>

² Universidade Estadual de Maringá, PGE-UEM, Maringá, Brasil. hsilveira@uem.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4674-1237>

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Colegiado de Geografia, Marechal Cândido Rondon, Brasil.

jose.cunha@unioeste.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6694-9137>

⁴ Universidade Estadual do Paraná, Colegiado de Geografia, Paranavaí, Brasil. mariacarolinabeckhauser@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3642-8327>

⁵ Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil. cassia.bonifacio@unesp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0107-8462>

⁶ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Campo Mourão, Brasil.

mcbaldo@utfpr.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6243-8329>

Recebido: 27/02/2023; Aceito: 02/12/2023; Publicado: 04/12/2023

Resumo: Na região Noroeste do Paraná a cobertura pedológica é caracterizada por solos de textura arenosa e média que apresentam grande vulnerabilidade à instalação e desenvolvimento de processos erosivos por escoamento hídrico superficial, tanto concentrado quanto difuso. Desde o início da colonização da região, esses processos erosivos, em particular as voçorocas, se instalaram de forma alarmante e generalizada e o seu controle e prevenção tem sido um desafio constante. Vários projetos executados para controlar e recuperar áreas afetadas por voçorocas não foram bem-sucedidos e os insucessos, geralmente, estão relacionados ao conhecimento insuficiente do próprio processo erosivo, como também da organização e dinâmica do meio onde estão inseridos. Neste estudo, procede-se a um resgate das pesquisas iniciais realizadas em áreas afetadas por voçorocas, enfatizando além do efeito do uso e ocupação da terra, as situações geográficas preferenciais de ocorrência na paisagem e nelas, o papel das relações entre as formas das vertentes, a morfologia e o funcionamento hídrico da cobertura pedológica e suas relações com a ocorrência de chuvas intensas, como deflagradores da origem e evolução das formas erosivas instaladas.

Palavras-chave: Vale em berço; Vertentes; Sistema pedológico; Fluxos hídricos

Abstract: In the Northwest region of Paraná, in the Southern region of Brazil, the pedological cover is characterized by sandy and medium-textured soils that are highly vulnerable to the installation and development of erosion processes caused by surface water runoff, both concentrated and diffuse. Since the beginning of colonization, erosive processes, particularly gullies, have become alarmingly widespread, and their control and prevention have been constant challenges. Several projects aimed

at controlling and rehabilitating areas affected by gullies were not successful, with failures often attributed to insufficient knowledge of the erosion process itself, as well as the organization and dynamics of the environment in which they occur. To contribute to a better understanding of these phenomena in the region, this study presents the results obtained from research conducted in areas affected by gullies. The investigation not only considers the impact of land use and occupation but also explores the preferential geographical situations for gully occurrence in the landscape. Additionally, the study examines the role of relationships between slope forms, the structure and functioning of the pedological cover in morphological and hydric terms, and the influence of intense rainfall on the origin and evolution of erosive forms.

Keywords: Hollow; Slopes; Pedological system; Water flows.

1. Introdução

A colonização do Noroeste paranaense ocorreu principalmente a partir das décadas de 1950 e 1960, dando continuidade à expansão das lavouras cafeeiras na região Norte do Paraná. Após ocupar as áreas com os solos argilosos derivados dos basaltos do Grupo Serra Geral, as denominadas “terras roxas”, o povoamento avançou para o Noroeste sobre os solos arenosos e de textura média associados aos arenitos do Grupo Caiuá. Esse processo de ocupação foi acompanhado, como já o havia sido em outras áreas do Norte paranaense, por um rápido e descontrolado desmatamento, que não poupou as áreas de nascentes nem as margens dos cursos d’água (MAACK, 1968). Após a retirada da floresta primária, a erosão se manifestou de modo intenso e as voçorocas apareceram como os sintomas mais impactantes (MAACK, 1953; 1968). O surgimento dessas feições em áreas rurais e periurbanas tornou-se comum, assim como o seu avanço em áreas urbanas já estabelecidas, em praticamente todo o Noroeste do Paraná.

A atividade antrópica no Noroeste Paranaense, como em várias regiões do país, é reconhecida como responsável pelo desencadeamento da erosão hídrica acelerada que leva ao surgimento de voçorocas, nesta área também favorecida pela textura arenosa dos solos associados aos arenitos Caiuá (MAACK, 1953 e 1968; BIGARELLA; MAZUCHOWSKI, 1985; FASOLO et al., 1988; DERPSCH et al., 1991, entre outros). Contudo, a forma, intensidade e evolução dos processos de erosão acelerada, dependem também da interrelação e atuação de outros fatores como: distribuição e intensidade das chuvas, escoamento hídrico superficial e subsuperficial, morfologia das vertentes e dos solos, e ainda, da sua relação com a rede hidrográfica estabelecida (OLIVEIRA; MEIS, 1985; OLIVEIRA, 1989; THOMAS, 1994; POESEN et al., 2003; WELLS, 2004; MORGAN, 2005; VALENTIN; POESEN; LI, 2005; POESEN; TORRI; VANWALLEGHEN, 2011; POESEN, 2018).

No início da década de 1990, quando da elaboração das cartas de zonas de riscos à erosão em Umuarama, Paranavaí, Cianorte, Cidade Gaúcha e Nova Esperança (GASPARETTO; NAKASHIMA; NÓBREGA, 1994; 1995a, b, c), municípios dessa região, realizadas pelo convênio entre a Universidade Estadual de Maringá (UEM) e a antiga Superintendência de Controle de Erosão e Saneamento Ambiental (SUCEAM), foram mapeadas diversas voçorocas ativas na periferia urbana dessas cidades. Na atualidade, verifica-se que parte delas foi parcialmente ou totalmente controlada com execução de obras de engenharia (barragens, dissipadores de energia, lagos etc.). Na área rural também foram implementadas outras medidas como: culturas e pastagens em curvas de nível; readequação de estradas e construção de bacias de contenção para o controle dos fluxos hídricos pluviais; recuperação de matas ciliares ao longo dos cursos d’água e no entorno de nascentes. Entretanto, apesar das medidas tomadas, tanto pelo setor público quanto pelo privado, a cada período de chuvas mais intensas ainda surgem novos focos, algumas formas relativamente estabilizadas são reativadas, e, em casos extremos, até mesmo obras de controle são sumariamente desmanteladas.

Assim, desde o início da colonização dessa área, a erosão hídrica é um problema recorrente e que exige controle e prevenção como parte das medidas para alcançar qualidade ambiental e desenvolvimento econômico. Entretanto, dada a natureza dos processos envolvidos, sua contenção, reparação e prevenção exigem o conhecimento adequado da estrutura e do funcionamento geodinâmico do meio onde estão instalados, o que nem sempre é considerado. A simples transposição de experiências de outras áreas, geralmente, não contempla as especificidades geoambientais do fenômeno na região em que se instalam, razão que motivou os estudos iniciais estimulados por aquele convênio.

No desenvolvimento daquelas pesquisas, observou-se que as voçorocas apresentavam diferenças morfológicas, funcionais, de evolução e origem, aparentemente associadas aos seus locais de instalação. Assim, para contribuir com a discussão e compreensão deste problema, se objetivou identificar os locais preferenciais de

ocorrência de voçorocas na paisagem do Noroeste do Paraná, assumindo que o conjunto dos parâmetros que controlam esse processo erosivo atua de modo diferenciado para cada tipo de situação geográfica, como sugerem Poesen et al. (2003), Valentin, Poesen e Li (2005) e Poesen, Torri, Vanwallegem (2011). Os autores associam o início da erosão por ravinas e voçorocas ao rompimento de um limiar, seja em termos topográficos, de fluxos hídricos, pluviométricos, pedológicos, litológicos ou de uso das terras, e concluem que para distintas condições ambientais e de desencadeamento dessas formas erosivas, ocorrem diferentes limiares. Nesse sentido, verifica-se também que vários autores (VALENTIN; POESEN; LI, 2005; TORRI; POESEN, 2014; GOMÉZ-GUTIÉRREZ et al., 2015; YIBETAL et al., 2019; IGWE et al., 2020; AL-BAVI et al., 2021; VANMAERCKE et al., 2021, entre outros) enfatizam o papel especial dos parâmetros topográficos, associados aos hidrológicos, pedológicos, climatológicos e de uso da terra na identificação das áreas mais vulneráveis à instalação desses processos.

Deste modo, para cada situação geográfica preferencial de voçorocas identificada na região, apresenta-se exemplos, resgatados das pesquisas estimuladas por aquele citado convênio, destacando-se os aspectos topográficos e morfológicos locais, a organização da cobertura pedológica e a sua influência no comportamento hídrico e escoamento pluvial. Procura-se, deste modo, evidenciar os principais fatores responsáveis pela vulnerabilidade à instalação e evolução de tais processos no Noroeste do Paraná, além daqueles desencadeados pelo uso e ocupação das terras.

2. Área de Estudo

As voçorocas apresentadas neste estudo localizam-se na mesorregião Noroeste do Paraná (Figura 1a), no Terceiro Planalto Paranaense (MAACK, 1968), onde dominam as rochas sedimentares areníticas, sobrepostas às rochas vulcânicas (basaltos). Em termos litoestratigráficos, esses arenitos subdividem-se nas formações Rio Paraná e Goio Erê (Figura 1b), em substituição à Formação Caiuá, conforme proposta de Fernandes e Coimbra (1994, 2000), incorporada ao recente Mapa Geológico e de Recursos Naturais do Estado do Paraná (BESSER; BRUMATTI; SPISILA, 2021). Essas formações, juntamente com a Formação Santo Anastácio, que ocorre fora da área do estudo, compõem o Grupo Caiuá (Cretáceo), cujas rochas se formaram em ambiente eólico (FERNANDES; COIMBRA, 1994).

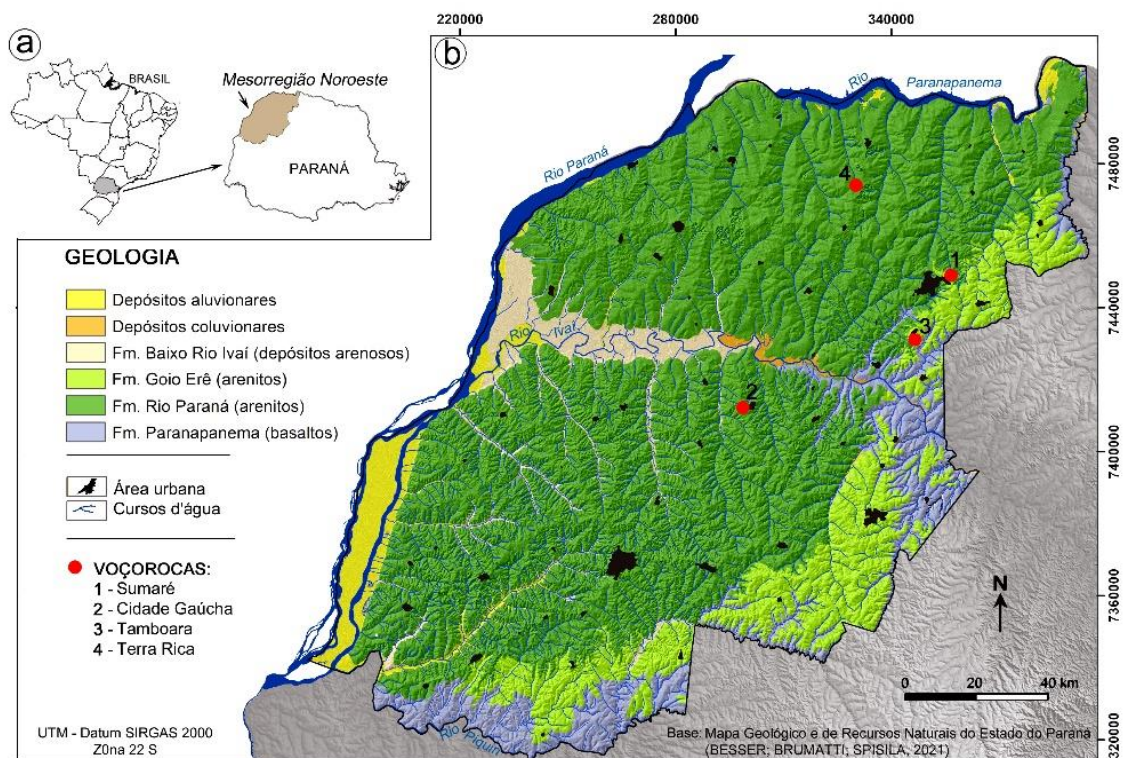


Figura 1. Localização da área de estudo; a) contexto regional da área de estudo; b) mapa geológico do Noroeste paranaense e localização das voçorocas analisadas.

A Formação Rio Paraná é constituída por arenitos marrom avermelhados a arroxeados, finos a médios, quartzosos e secundariamente subarcoseanos, com estratificação cruzada de médio a grande porte. A Formação Goio Erê é composta por arenitos marrom avermelhados a cinza arroxeados, finos a muito finos, eventualmente médios, quartzosos e frequentemente subarcoseanos, com estratificação cruzada de médio e pequeno porte (FERNANDES; COIMBRA, 1994).

A área é drenada por três bacias hidrográficas de afluentes do rio Paraná: ao norte, o rio Paranapanema e os tributários do seu baixo curso, margem esquerda; ao centro, o rio Ivaí, setor baixo da sua bacia hidrográfica; ao sul, o rio Piquiri e os seus tributários do médio e baixo curso, margem direita; e a oeste ocorrem ainda os tributários menores, afluentes diretos do rio Paraná, margem esquerda.

Essa rede de drenagem modela dois grandes interflúvios, orientados na área de estudo no sentido leste-oeste: um entalhado pela drenagem dos rios Ivaí e Paranapanema e o outro pela drenagem dos rios Ivaí e Piquiri. O interflúvio Ivaí/Paranapanema exhibe uma menor densidade de drenagem o que gerou um relevo caracterizado por colinas amplas a médias, com vertentes longas, em grande parte convexo-retilíneas, de fracas declividades (Figura 2a) e vales em “V” abertos. Nelas os Latossolos Vermelhos de textura média são dominantes (Figura 2b), geralmente recobrendo os topos e se estendendo até os setores de média vertente, enquanto os Argissolos Vermelhos, textura arenosa/média, mais restritos, ocorrem principalmente nos segmentos de média-baixa e baixa vertente.

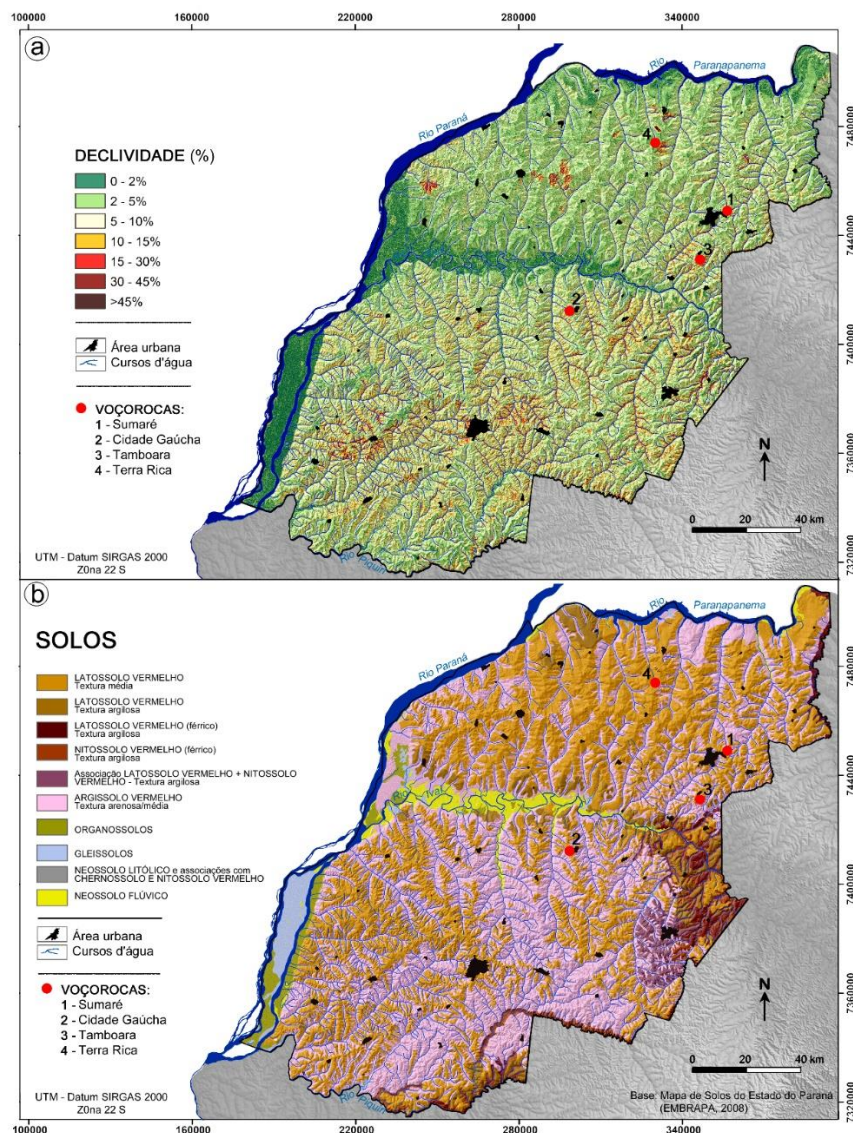


Figura 2. (a) Declividades e (b) distribuição das classes de solos da mesorregião Noroeste do Paraná. Base cartográfica: Projeto TOPODATA (VALERIANO; ROSSETTI, 2012) e mapa de solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 2008), respectivamente.

No interflúvio Ivaí/Piquiri a rede de drenagem é mais densa. As colinas médias, com vertentes mais curtas, geralmente convexas e com declividades relativamente mais altas que as verificadas no interflúvio anterior, são dominantes (Figura 2a). A cobertura pedológica (Figura 2b) é constituída principalmente pelos Argissolos Vermelhos que aí ocupam posições mais altas nas vertentes e, muitas vezes, recobrem também os topos. Os Latossolos Vermelhos de textura média restringem-se aos topos, que são mais estreitos neste interflúvio, e altas vertentes (EMBRAPA, 2008; NÓBREGA et al., 2022).

Em termos climáticos, a região está submetida a um clima de tipo Cfa (segundo a classificação de Köppen), subtropical úmido mesotérmico, sem estação seca (NITSCHKE et al., 2019). A média histórica pluviométrica acumulada anual obtida por Zandonadi e Baldo (2022) para a mesorregião é de 1501,4 mm. Entretanto, os autores constataram uma grande variabilidade nos valores médios de chuva que oscilaram entre o mínimo de 1061,3 mm e o máximo de 2297,3 mm. Essa variabilidade é atribuída, principalmente, à influência do fenômeno ENOS (El Niño/Oscilação Sul).

Em consonância com a condição climática regional, se desenvolveu a Floresta Estacional Semidecidual Submontana (RODERJAN et al., 2002) como cobertura vegetal original. No início da colonização da região, essa floresta foi retirada para dar lugar às culturas cafeeiras que, por sua vez, foram substituídas principalmente por pastagens. Atualmente as pastagens ainda predominam, mas dividem espaço com as culturas de cana-de-açúcar, que aí se ampliaram a partir de 1990 (SERRA, 2022). O binômio soja/milho também aparece, mas em grande parte restrito às áreas fronteiriças leste e sul da mesorregião, onde ocorre o contato arenito/basalto e a passagem para solos de textura mais argilosa (NÓBREGA et al., 2022).

3. Materiais e Métodos

As pesquisas iniciais enquadraram-se no Projeto de Mapeamento de Zonas de Riscos à Erosão, fruto do convênio entre a Universidade Estadual de Maringá (UEM) e a Superintendência de Controle de Erosão e Saneamento Ambiental (SUCEAN) do Estado do Paraná, vigente entre 1989 e 1995, visando identificar a distribuição e as causas do voçorocamento no entorno de algumas cidades (Umuarama, Cidade Gaúcha, Cianorte, Nova Esperança e Paranavaí) na mesorregião Noroeste do Paraná. A partir desse projeto reconheceu-se a importância das relações entre os processos erosivos instalados na região e as condições morfopedológicas das vertentes (TRICART; KILIAN, 1979; CASTRO; SALOMÃO, 2000), além dos efeitos da ação humana. Em consequência, foram propostos vários estudos em escala de detalhe sobre a morfologia dos solos, complementada por análises laboratoriais simples, e de sua sucessão ao longo das vertentes. Alguns exemplos dos estudos realizados, a partir da década de 1990, como os trabalhos de Cunha, Castro e Salomão (1999), Karling (2000), Cunha (2002), Silveira et al. (2009); Bonifácio et al. (2011) e Beckauser (2020), serviram de base para o trabalho atual.

Partiu-se, nesta abordagem, do pressuposto de que o reconhecimento da localização preferencial para o surgimento de voçorocas em uma determinada paisagem, como enfatizado por Poesen, Torri e Vanwallegem (2011), contribui para a previsão dos locais mais vulneráveis para a instalação desses processos erosivos e para a identificação dos principais fatores, suas interrelações e limiares no desencadeamento e evolução dessas formas (topografia, geologia, solos, fluxos hídricos, clima, uso da terra e tempo). Desse modo, foi realizada uma análise inicial de imagens de sensoriamento remoto de melhor resolução espacial pelo aplicativo Google Earth Pro, no período entre 2006 e 2022, para identificar as localizações preferenciais de voçorocas na região.

A partir dessa identificação selecionou-se, entre os trabalhos de detalhe realizados, as voçorocas associadas a cada uma das posições geográficas preferenciais identificadas na paisagem do Noroeste Paranaense, relacionadas a seguir: Paranavaí, distrito de Sumaré (BECKAUSER, 2020); Cidade Gaúcha (KARLING, 2000; CUNHA, 2002; CUNHA; NÓBREGA; CASTRO, 2008); Tamboara (BONIFÁCIO et al., 2011); e Terra Rica (NÓBREGA et al., 2022).

Para cada voçoroca nos locais selecionados (Figura 1b), também foram utilizadas fotografias aéreas de 1980, escala 1:25.000, e imagens orbitais de melhor resolução espacial obtidas por meio do aplicativo Google Earth Pro de diferentes períodos entre 2006 e 2022 com o propósito de verificar as condições geoambientais e realizar medidas morfométricas, incluindo extensão, recuo da cabeceira, morfologia em planta e a evolução das voçorocas analisadas.

Foram elaborados produtos cartográficos da mesorregião Noroeste do Paraná com base nos mapas disponíveis: Mapa Geológico e de Recursos do Estado do Paraná (BESSER; BRUMATTI; SPISILA, 2021), Mapa de Solos do Estado do Paraná (EMBRAPA, 2008). A elaboração desses produtos, assim como do mapa de declividade, foi realizada com o emprego do *software* QGIS 3.26.3 (QGIS DEVELOPEMENT TEAM, 2023).

As feições erosivas e os solos associados foram objeto de reconhecimento em campo, ao longo das vertentes, por meio de levantamentos de solos em topossequências (segundo metodologia de BOULET et al., 1982), acompanhado da observação morfológica direta dos perfis verticais e longitudinais, sobretudo textural, dos materiais dos taludes das voçorocas, como em Tamboara e Sumaré (Paranavaí).

As relações entre as feições erosivas, sua localização nas vertentes, condições topográficas e conectividade com a rede de drenagem, foram detectadas sobre o modelo digital de elevação da base topográfica *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)*, fornecida pelo projeto TOPODATA (VALERIANO; ROSSETTI, 2012) e analisadas com o emprego do *software* Global Mapper v.19, o qual também serviu para a construção de blocos diagrama e perfis topográficos.

Foram realizadas observações em campo das feições erosivas e dos solos associados com registro fotográfico. Para as voçorocas de Sumaré (Paranavaí), Cidade Gaúcha e Tamboara, os solos foram reconhecidos ao longo das vertentes por meio de levantamentos em topossequências (conforme metodologia de BOULET et al., 1982), acompanhados de observações diretas dos perfis verticais e longitudinais, especialmente de morfologia e textura, dos materiais expostos nos taludes das voçorocas e em trincheiras. Os dados granulométricos analisados foram extraídos dos trabalhos selecionados (KARLING, 2000; BONIFÁCIO et al., 2011; BECKAUSER, 2020) e, no caso da voçoroca de Sumaré, também foram utilizados dados de condutividade hidráulica dos horizontes de solo. Além disso, para a voçoroca de Sumaré, foram analisadas as relações entre a pluviosidade e a evolução do processo erosivo com base em registros de médias pluviométricas mensais da série histórica disponível entre 1976 e 2019 e, em especial, os dados mensais dos anos 2015, 2016, 2017 e 2018, período de maior atividade erosiva detectada. Quando necessário, foram utilizados dados diários de chuva.

Os registros pluviométricos foram obtidos em estação pluviométrica próxima da voçoroca de Sumaré (Estação Criação Estado), pertencente à rede do Instituto Água e Terra (IAT, 2022).

4. Resultados e discussão

Os levantamentos de campo, observações em fotografias aéreas e imagens de satélite (Google Earth Pro) revelam, para a paisagem regional, três tipos de localização preferencial de voçorocas: ao longo dos vales em forma de berço e suas cabeceiras; em setores de média e baixa encosta com declividades moderadas a fortes; e no interior de grandes anfiteatros definidos por rupturas marcadas, vertentes curtas e declividades fortes, e que abrigam várias nascentes de pequenos cursos d'água.

4.1. As voçorocas em vales em berço

Os vales em forma de berço (concaizados) e suas cabeceiras constituem-se em áreas de instalação preferencial de voçorocas de grandes dimensões, tanto na periferia urbana quanto na zona rural.

Na região, sobretudo no interflúvio entre os rios Paranapanema e Ivaí, os vales em berço são longos, com cabeceiras amplas, vertentes de declividades fracas a moderadas e, frequentemente, com uma extensa área de contribuição, compondo as bacias de ordem zero, como definidas por Tsukamoto (1973), associadas aos cursos de drenagem de primeira ordem, com os quais mantem uma integração hidrológica.

As formas côncavas que compõem o eixo da bacia de ordem zero, referidas aqui como “vale em berço”, foram designadas como *hollows* por Hack e Goodlett (1960). Os *hollows*, de acordo com Crozier (2004), são depressões alongadas que, mesmo não tendo fluxos hídricos permanentes, funcionam como linhas de escoamento, seja em superfície ou subsuperfície, integradas à rede de drenagem, localizados geralmente em cabeceiras de canais de primeira ordem, ou integrados a canais de ordem superior em posição similar a essa (primeira ordem).

Os vales em berço se constituem, portanto, em unidades morfológicas naturalmente concentradoras de fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais e as voçorocas instaladas nessa condição geográfica, na área analisada, são geralmente extensas, profundas e conectadas à rede de drenagem.

Para analisar o papel dessa localização preferencial da voçoroca no eixo de vales em berço e das suas relações com a morfologia, sistema pedológico e características hídricas, foram selecionados dois exemplos: um no distrito de Sumaré, no município de Paranavaí, incluindo área urbana; outro em área rural, no município de Cidade Gaúcha (Figura 1b).

a) Voçoroca de Sumaré, Paranavaí – PR – situação periurbana

Na região Noroeste do Paraná, os sítios urbanos estão localizados principalmente nos topos dos interflúvios, seguindo um modelo de urbanização semelhante ao implantado pela Companhia Melhoramentos Norte do Paraná (CMNP, 2013) na mesorregião Norte Central do estado. Devido a essa posição topográfica, as áreas periurbanas abrangem cabeceiras de drenagem e vales em forma de berço, que se constituem em áreas de concentração e descarga do escoamento superficial urbano. Voçorocas são comuns nessas áreas de descarga de drenagem pluvial, resultando em grande parte da falta de infraestrutura inicial para controlar o escoamento. A conexão dessas formas erosivas com a rede hidrográfica gera grande impacto nos cursos d'água, provocando desbarrancamentos das margens, alargamento do canal e o assoreamento pelo aumento do volume de sedimentos carregados.

Em Sumaré, a área da bacia de ordem zero onde a voçoroca está instalada é de 1,74 km². A área urbana inicialmente projetada corresponde a 15% desse total, mas ainda não está integralmente ocupada.

A cabeceira do vale em berço se situa parcialmente na zona urbana e é atravessada, transversalmente, por uma rua. A drenagem pluvial concentrada nessa via é despejada em um canal escavado na divisa entre dois lotes, grosso modo paralelo, mas fora do eixo do vale, conduzindo o fluxo pela vertente até a sua dispersão (Figura 3).

Em 1980, essa área era ocupada predominantemente por pastagens e cobertura florestal reduzida e descontínua no entorno da nascente e margens do curso d'água. Uma voçoroca com aproximadamente 260 m de extensão, pouco profunda, já estava aí instalada, acompanhando o eixo do vale, associada à degradação por erosão regressiva da nascente (Figura 3).

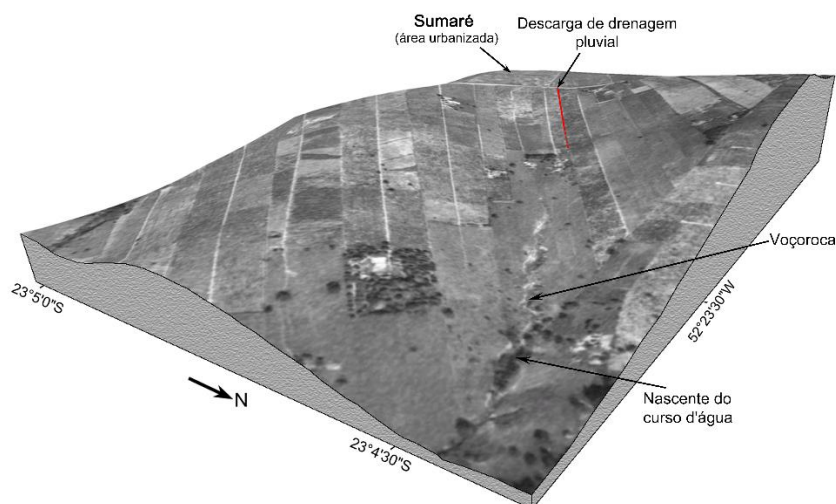


Figura 3. Visão da área da voçoroca Sumaré, em Paranavaí (PR) em 1980, mostrando o longo vale em berço, a posição original da nascente do curso d'água, a voçoroca, o ponto de descarga de drenagem urbana e o canal (em vermelho) escavado na vertente para condução da água despejada. Base: Aerofoto 1:25000, 1980, ITC-PR.

A evolução dessa voçoroca no decorrer do tempo e a sua situação no ano de 2022 é apresentada na Figura 4(a, b).

A análise das imagens de sensoriamento remoto, a partir de 2006, revela mudanças significativas na forma de ocupação do solo, com a adoção de pastagens em curvas de nível, reflorestamento ao longo do curso d'água e da área degradada da nascente e trecho a montante, englobando parte da voçoroca. Nessa época, a ocupação urbana se estendia por cerca de 4% da bacia associada ao vale em berço.

Até 2014 a voçoroca atingiu cerca de 410 m de extensão, aumentando cerca de 157 m em 34 anos, passando por fases de relativa estabilidade que possibilitaram o revestimento vegetal das margens e do fundo da incisão. A ocupação urbana correspondia a 9,5% da área da bacia. Em 2016 (Figura 4a), entretanto, o processo sofre uma reativação, e a partir desse ponto a voçoroca se ampliou em extensão, aprofundamento e largura, passando a apresentar paredes verticais com deslizamentos ativos e leito desprovido de vegetação.

No período analisado, a montante, na cabeceira do vale em berço, a urbanização também se amplia, elevando a descarga pluvial. À medida que a drenagem pluvial urbana aumenta, o canal original de descarga sofre extravasamento lateral e erosão. Sulcos e depósitos arenosos superficiais são testemunhos desse extravasamento em direção ao eixo do vale em berço (Figura 4b).

A voçoroca que se estende no sentido NE-SW inicia, ao longo de 2017 e 2018, um desvio em direção ao canal de descarga pluvial. Dessa forma, ela deixa de acompanhar o eixo côncavo do vale em berço (Figuras 4a e 5a) e passa a entalhar a vertente. Surgem ainda nessa fase, já no segmento desviado, vários ramos laterais situados na zona de extravasamento do canal. Em 2022, a cabeceira da voçoroca interceptou perpendicularmente o canal escavado de drenagem (Figura 5b), criando nessa conexão um desnível de aproximadamente 3 metros. Assim, por ocasião da descarga pluvial, ocorre uma queda d'água que acelera ainda mais o processo erosivo remontante, agora ao longo do canal de drenagem pluvial urbana.

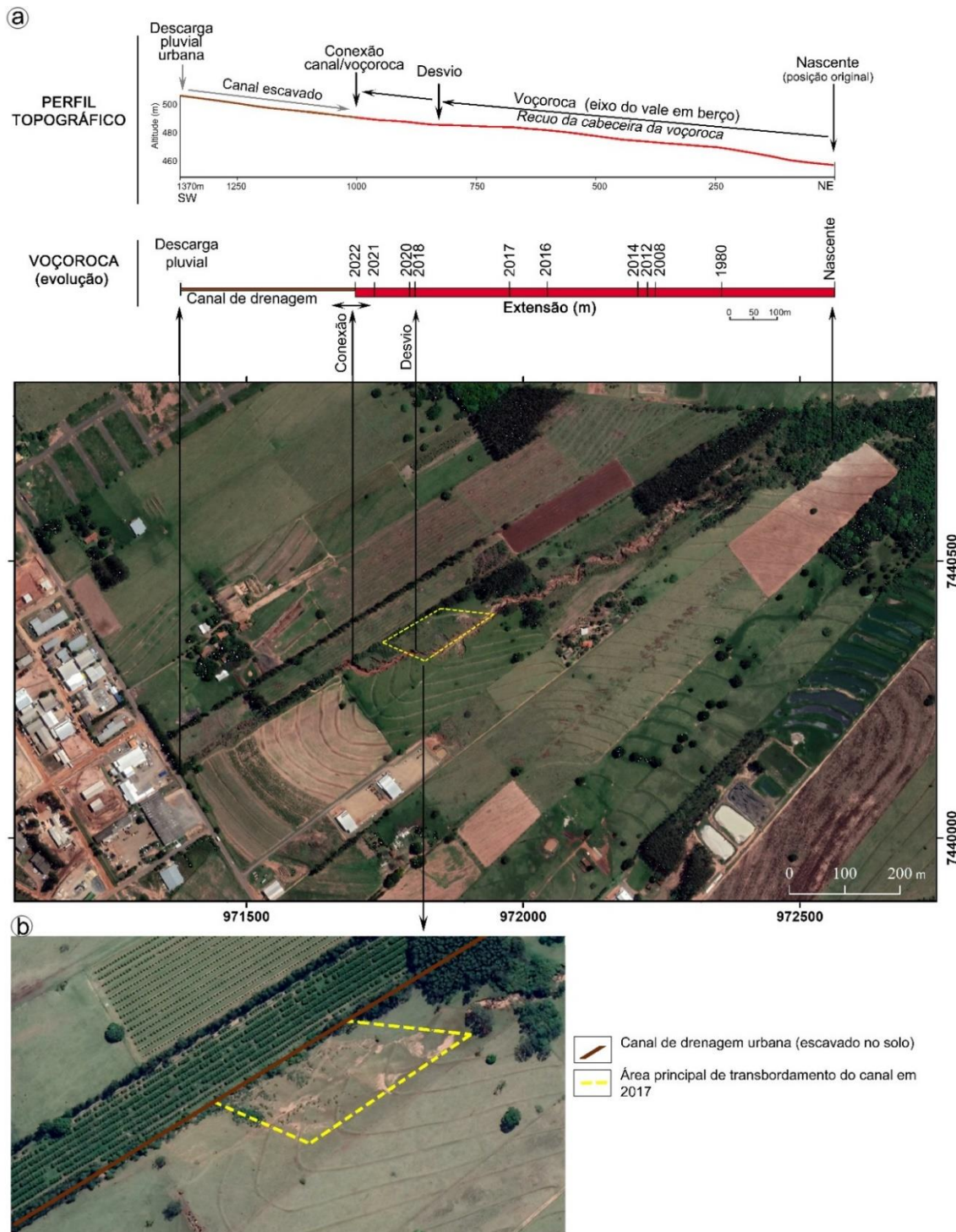


Figura 4. (a) Situação da voçoroca Sumaré em 2022 (Imagem do Google Earth de 03/10/2022) e representação esquemática da sua evolução em extensão ao longo do tempo (Grade de coordenadas métricas UTM – Zona 22 Sul – Datum SIRGAS2000); (b) Detalhe da área de transbordamento do canal de drenagem pluvial em direção ao eixo do vale em berço, em 2017 (Imagem do Google Earth de 07/09/2017).

O aumento da extensão da voçoroca se acelerou ao longo do tempo, como se constata na representação esquemática da Figura 4a e na Tabela 1. Essa aceleração é, em parte, explicada pelo aumento da urbanização a montante, que atinge 12% da área em 2022, e a consequente elevação da descarga pluvial urbana pelo canal construído. Mesmo antes da conexão do canal de descarga pluvial com a voçoroca já ocorria a contribuição desses fluxos em direção ao eixo do vale, seja em superfície por extravasamento (Figura 4b), seja pela alimentação de fluxos hídricos subsuperficiais ou saturação do solo marginal, contribuindo também para a formação mais rápida e aumento do escoamento superficial nas áreas do seu entorno.

Constata-se, ainda, que o aumento da extensão da voçoroca ocorre em ritmo desigual ao longo do tempo, mais acelerado entre 2014 e 2016, 2017 e 2018, como evidenciam os dados de recuo da sua cabeceira apresentados na Tabela 1.



Figura 5. (a) Desvio da voçoroca em relação ao eixo do vale em berço (a seta indica a posição do eixo do vale em direção a montante); (b) conexão da cabeceira da voçoroca com o canal de drenagem pluvial, vista de jusante para montante (a seta indica a posição e direção do canal de drenagem pluvial e a sua desativação em direção a jusante – segmento tracejado – após a conexão com a voçoroca).

Tabela 1. Evolução da extensão da voçoroca* de Sumaré (município de Paranaíba – PR).

Ano	Extensão (m)	Recuo da cabeceira (m)
1980	260	-
2008	375	115
2010	375	0
2012	390	15
2014	417	27
2016	650	233
2018	940	290
2020	976	36
2022	1054	78

*Dados obtidos em imagens do Google Earth Pró

Nesse caso, a intensidade e distribuição das chuvas mostram-se também como fatores relevantes a serem considerados na evolução do processo, como enfatizam diversos autores, entre eles Poesen, Torri e Vanwallegem (2011). Nesse sentido, a pluviosidade média anual no Distrito de Sumaré é de 1515 mm (BECKAUSER, 2020), entretanto, foi registrado em 2015 o total de 2437 mm de precipitação. Nesse ano, vários meses apresentaram precipitações superiores às médias históricas (Tabela 2), destacando-se o mês de novembro com o total de 518 mm, quando a sua média é de 139 mm. Em dois dias seguidos, nesse mês, foram registrados 154,7 mm de chuva. Eventos de chuvas concentradas em alguns dias também foram observados em janeiro e fevereiro de 2016. Assim, o

aumento do processo erosivo observado a partir de 2016 (Tabela 1) é resultado, principalmente, dos altos índices pluviométricos e da concentração dos eventos chuvosos ocorridos ao final de 2015 e início de 2016 (Figura 6). Esses eventos são atribuídos a um episódio do *El Niño* que resultou em diversas erosões hídricas lineares, inclusive voçorocas, na região Noroeste do Paraná (MONTANHER et al., 2023).

Do mesmo modo, verifica-se a associação entre a concentração de chuvas e pluviosidade acima da média mensal nos anos de 2017 e 2018. Em 2017, as chuvas mais intensas e concentradas ocorreram principalmente em outubro e dezembro, e em 2018 a pluviosidade do mês de janeiro somou 347,8 mm, sobrepondo a média mensal de 191 mm. Esse comportamento pluviométrico, assim como na fase anterior, é também responsável pelo recuo mais acelerado da cabeceira da voçoroca nesse período.

Tabela 2. Médias históricas mensais e anual, pluviometria mensal e anual dos anos 2015 a 2018.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL	
Média histórica (mm)	190,1	166,7	127,2	100,4	117,0	98,2	66,5	58,9	126,5	153,6	138,7	169,4	1515	
ANOS	2015	181,6	258,7	137,7	72,1	156,9	11,6	314,8	31,1	<u>231,9</u>	<u>293,6</u>	<u>518,1</u>	<u>228,5</u>	2437
	2016	<u>276,1</u>	<u>242,0</u>	72,9	85,2	154,3	112,5	61,1	127,9	52,4	100,0	21,3	184,9	1491
	2017	101,8	207,3	134,6	137,1	221,1	145,5	0	139,5	3,8	<u>279,1</u>	141,4	<u>233,3</u>	1745
	2018	<u>347,8</u>	151,0	150,7	7,4	60,6	66,5	0,5	165,4	126,2	219,8	118,5	84,7	1499

Fonte: IAT (2022).

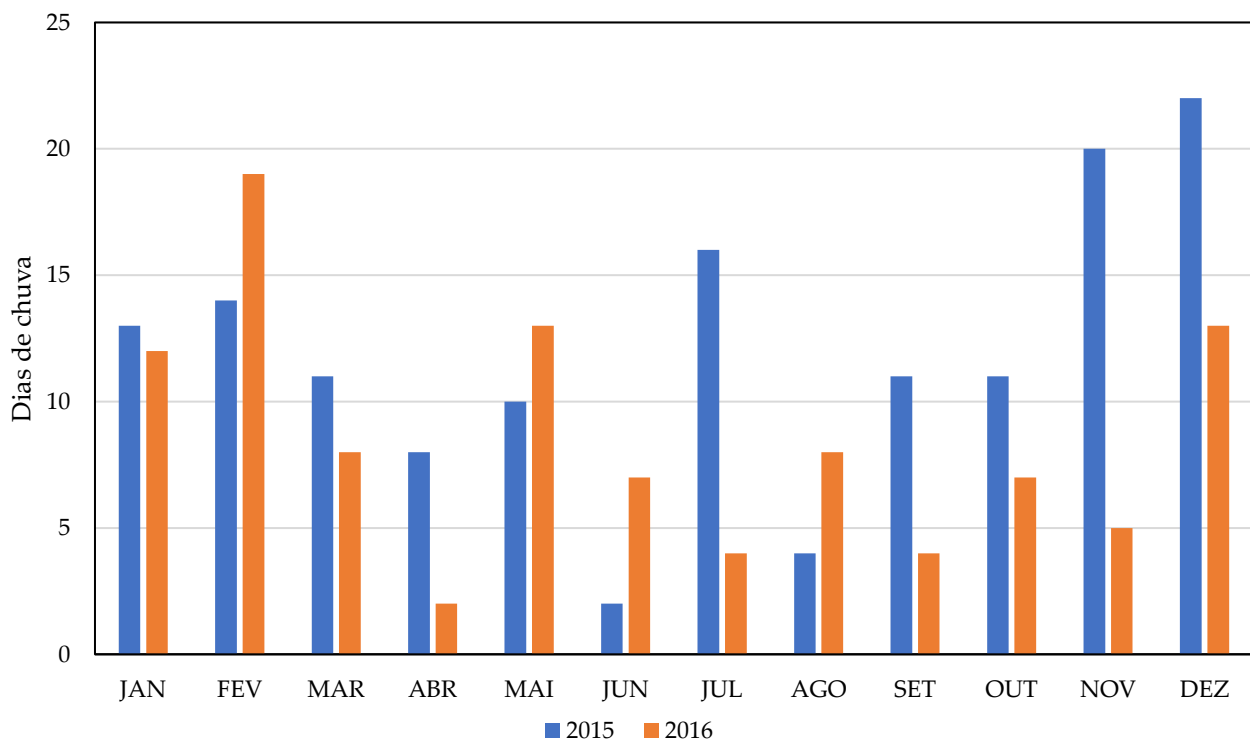


Figura 6. Frequência mensal de número de dias com eventos de chuva para os anos de 2015 e 2016.

A voçoroca, que em 2022 tinha 1054 m de extensão, ao se conectar com o canal de drenagem pluvial incorporou ao seu sistema mais 350 m. Como se observa na Figura 7 (a, b), a voçoroca remonta pelo eixo do vale em berço, a partir da área de nascente original do curso d’água, escavando segmentos com diferentes declividades, que variam entre 3% e 6%, até atingir uma área relativamente plana (1,1% de declividade) onde ocorre o desvio em direção ao canal de drenagem pluvial. O canal de drenagem, por sua vez, está situado em um segmento de vertente com 4% de declividade.

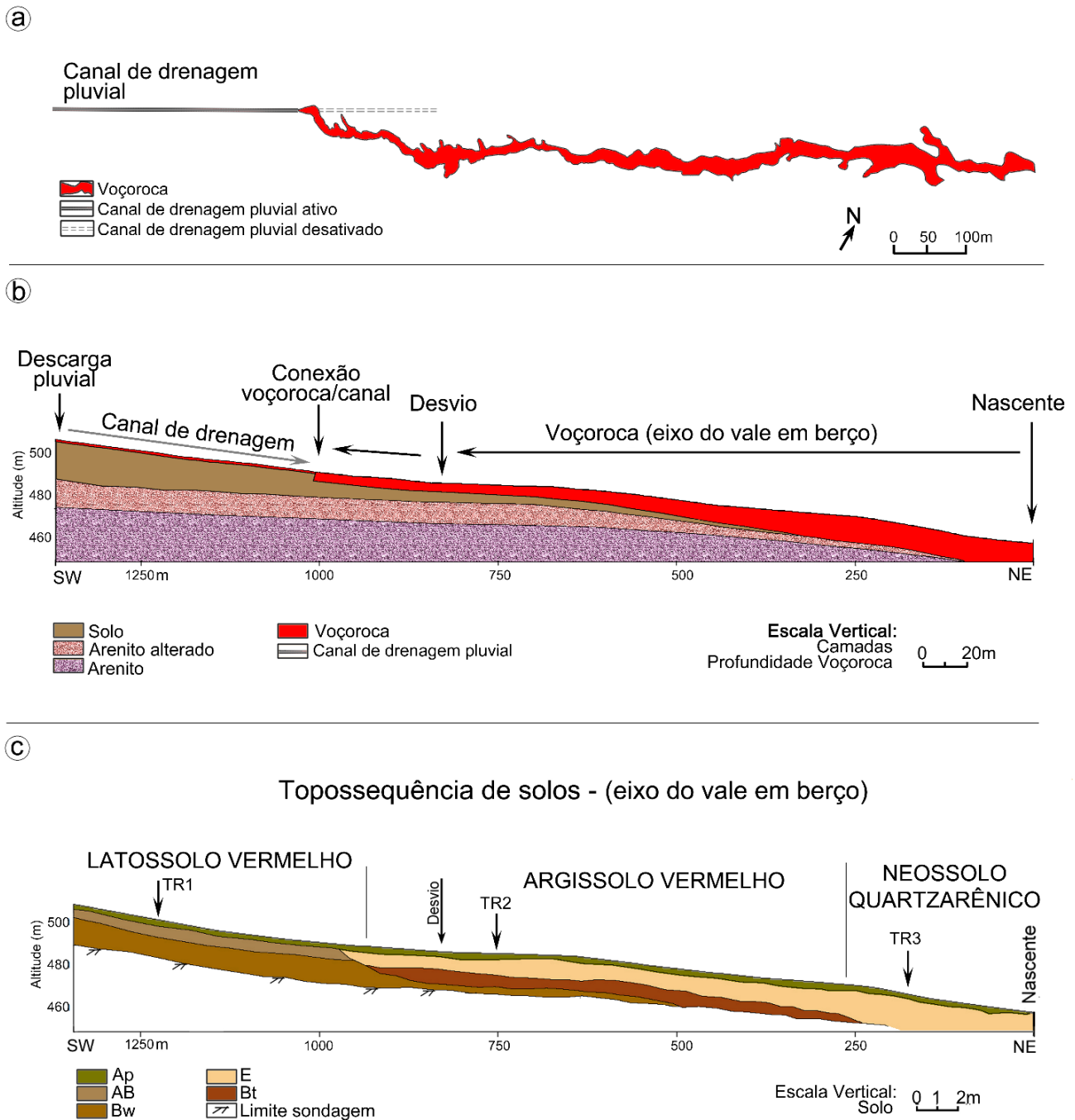


Figura 7. Características da voçoroca de Sumaré, Paraná: (a) traçado em planta da voçoroca; (b) perfil topográfico com representação esquemática do substrato (manto de alteração e rocha) e profundidades ao longo do canal de drenagem e da voçoroca; (c) topossequência de solos situada ao longo do eixo do vale em berço: da nascente até ao ponto de desvio ela acompanha a voçoroca (adaptado de BECKAUSER, 2020).

O traçado da voçoroca é sinuoso e com desenvolvimento de ramos laterais curtos (Figuras 7a e 8a). A montante, após o desvio de direção em relação ao eixo do vale em berço, com profundidades que variam entre 4 e 5 metros, a incisão é mais estreita, com paredes verticais e fundo plano (Figuras 5a, 5b e 7a). A voçoroca se aprofunda em direção a jusante, ultrapassando no trecho final a 15 m (Figura 7b). Exibe paredes retas e/ou escalonadas por abatimentos e deslizamentos, fundo plano no trecho superior e reentalhado à medida que avança para jusante. O nível freático aflora a partir do segmento médio, quando a incisão atinge a camada de alteração da rocha, a cerca de 10 m de profundidade (Figura 8b).

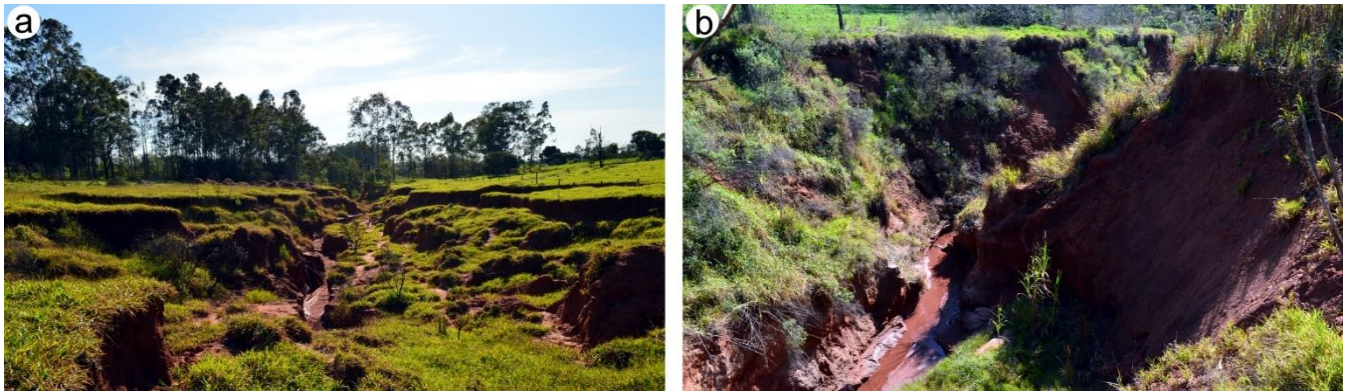


Figura 8. (a) Área alargada da voçoroca, no setor médio, plano, sobre o Argissolo, margens com reentrâncias e abatimentos produzidos por *piping* raso (fluxos hídricos subsuperficiais sobre o Bt); (b) a jusante, na passagem do setor médio para o inferior, aprofundamento, afloramento do nível freático, *piping* profundo e solapamento da base das paredes.

A toposequência de solos, levantada segundo os critérios de Boulet et al. (1982), posiciona-se ao longo do eixo do vale, e mostra a ocorrência de um sistema pedológico em transformação lateral constituído por Latossolo Vermelho (textura média) no topo – Argissolo Vermelho (textura areia/média) na vertente – Neossolo Quartzarênico (textura areia) na base (BECKAUSER, 2020). Nesse sistema, o Neossolo Quartzarênico avança para montante às expensas da destruição do horizonte Bt do Argissolo e espessamento do volume arenoso que, nesse setor, apresenta teores de argila abaixo de 20 g kg⁻¹. Por outro lado, na passagem do médio para o alto setor da toposequência, o horizonte Bt avança também remontantemente transformando o Bw. Os dados granulométricos apresentados pela autora (Tabela 3) mostram o enriquecimento em argila do horizonte Bt, que alcança cerca de 227 g kg⁻¹, enquanto o Bw do Latossolo, a profundidades similares, apresenta 192 g kg⁻¹. Esse sistema pedológico também se reproduz nas vertentes do entorno, alterando, contudo, os limites das transições: mais avançadas em direção a montante no caso do eixo do vale.

Tabela 3. Granulometria e condutividade hidráulica dos horizontes de solo ao longo da toposequência de Sumaré (BECKAUSER, 2020).

Horizonte	Profundidade (cm)	Granulometria (g kg ⁻¹)			Kfs (mm h ⁻¹)
		Areia	Silte	Argila	
TR1 - LATOSSOLO VERMELHO					
Ap	0 - 32	892	24	85	32,50
AB	32 - 66	854	30	116	35,00
Bw ₁	66 - 122	801	29	170	52,24
Bw ₂	122 - 200	778	30	192	52,24
TR2 - ARGISSOLO VERMELHO					
Ap	0 - 34	885	35	80	89,98
E	34 - 71	840	28	132	29,74
Bt	71 - 183	751	22	227	7,50
Bw	183 - 200	787	29	184	62,02
TR3 - NEOSSOLO QUARTZARÊNICO					
Ap	0 - 36	962	20	18	237,40
C ₁	36 - 67	961	25	14	480,20
C ₂	67 - 200	977	15	8	480,20

*Kfs - Condutividade hidráulica saturada do solo

O enriquecimento em argila, aliado às condições estruturais do Bt, é responsável por mudanças no comportamento hídrico ao longo da topossequência. Enquanto a condutividade hidráulica é crescente em profundidade no setor dominado pelo Latossolo, como mostram os dados apresentados por Beckauser (2020), Tabela 3, no Argissolo ocorre uma forte redução no horizonte Bt.

Cria-se, deste modo, condições para a formação de fluxos hídricos subsuperficiais sobre o horizonte Bt, como também constataram Cunha, Castro e Salomão (1999) e Cunha, Nóbrega e Castro (2008) em topossequências de solos em Umuarama e Cidade Gaúcha. Tais fluxos subsuperficiais gerados pelo contraste textural entre os horizontes superiores (A e E) e o Bt, segundo Thomas (1994), em virtude da anisotropia do meio, potencialmente produzem dutos (*pipes*), que contribuem na origem, dinâmica e evolução regressiva e lateral das voçorocas. No caso dessa voçoroca de Sumaré, os efeitos de *piping* são observados, sobretudo, no segmento médio com topografia plana. Nesse trecho, os taludes da voçoroca exibem um maior número de reentrâncias que evoluem para a formação de pequenos ramos e abatimentos associados (Figura 8a). Entretanto, em direção à jusante, à medida que a declividade aumenta a incisão se aprofunda, o nível freático é exposto e os taludes passam, sobretudo, a evoluir lateralmente por deslizamentos produzidos pelo solapamento da base por efeito de *piping*, agora mais profundo, sem relação direta com o horizonte Bt.

O Neossolo Quartzarênico, inicialmente de cor avermelhada na transição com o Argissolo, próximo da área da nascente original do curso d'água, apresenta coloração mais clara (esbranquiçado) e está mais empobrecido em argila. Torna-se em um material essencialmente arenoso, com predomínio de areia fina e média, e com alta condutividade hidráulica (BECKAUSER, 2020). O reduzido teor de argila lhe confere baixa ou nula coesão, tornando-o muito suscetível à erosão hídrica, sobretudo quando exposto, como ocorre na jusante da voçoroca.

Quanto ao canal de drenagem pluvial, diretamente escavado no solo, como já informado, verifica-se pelas imagens analisadas até 2016, que a dispersão desse fluxo ocorria ao longo da vertente, mas derivando eventualmente em direção ao eixo do vale em berço, no seu segmento médio. Entretanto, quando ocorre a aceleração da incisão observada na imagem de 2016, aparecem evidências efetivas de extravasamento do canal em direção ao eixo côncavo, e que se ampliam em 2017 (Figura 4b), quando se inicia o desvio da cabeceira da voçoroca.

Em 2022, última situação registrada, a caixa coletora e a tubulação junto à rua asfaltada estavam desmanteladas, sem cumprir a sua função de coleta e controle do escoamento pluvial. O canal, em todo o seu trecho inicial, apresentava-se degradado por erosão, um processo que se intensificou a partir de 2018.

Constata-se, nesse sistema erosivo diferentes morfologias e dinâmicas ao longo da sua extensão. Enquanto a voçoroca se inicia a partir do desmatamento e erosão na área da nascente do curso d'água e evolui de modo regressivo ao longo do eixo do vale em berço, em direção a montante, o canal escavado para a drenagem pluvial urbana se degrada por incisão erosiva progressiva em direção a jusante. A conexão entre essas duas formas de incisões se produz pelo desvio da cabeceira da voçoroca em um segmento de menor declividade, dominado pelo Argissolo, onde ocorrem os fluxos hídricos subsuperficiais acima do Bt e saturação mais rápida do solo, combinados ao extravasamento do escoamento pluvial urbano concentrado pelo canal, favorecendo a incisão nessa direção (Figura 4b). Após a conexão, os processos erosivos que produzem o recuo da cabeceira da voçoroca passaram também a atuar ao longo do traçado do canal de drenagem urbana, acelerando a degradação da área, de modo similar ao proposto pelo modelo conceitual de Oliveira e Meis (1985) e Oliveira (1989, 2005), para a evolução de canais erosivos.

b) Voçoroca de Cidade Gaúcha – PR – situação de área rural

O outro exemplo desse tipo de localização preferencial de voçoroca situa-se em Cidade Gaúcha, no interflúvio entre as bacias hidrográficas dos rios Ivaí e Piquiri. Nesse interflúvio, onde dominam as colinas médias e a rede de drenagem é mais densa, os vales em forma de berço são, em geral, relativamente mais curtos do que aqueles observados no interflúvio Paranapanema/Ivaí (Figura 1b).

O vale selecionado (Figura 9a), está ocupado por pastagem e apresenta 1,1 km de comprimento no seu eixo maior e uma área de contribuição de drenagem de 1,9 km², correspondente à bacia de ordem zero. Uma voçoroca com aproximadamente 170 m de extensão se instalou, a partir da área de nascentes, ao longo do eixo desse vale em direção a montante. O processo erosivo regressivo foi controlado com a construção de uma barragem e recuperação da mata ciliar. A montante da barragem, ao longo do eixo côncavo, se desenvolveu uma área úmida

com cerca de 550 m de comprimento e 120 m na sua parte mais larga, e que apresenta alagamento temporário nos períodos mais chuvosos.

O relevo do vale em berço é dissimétrico. Suas vertentes são mais longas na margem direita, chegando a 1300 m de comprimento, enquanto que na margem esquerda atingem 560 m. As declividades nas vertentes variam entre 6% e 7% do topo até o início da concavidade, e ao longo do eixo côncavo chega no máximo a 5%.

A cobertura pedológica associada a essa área foi estudada por Karling (2000), também na forma de topossequências, como representado na Figura 9b.

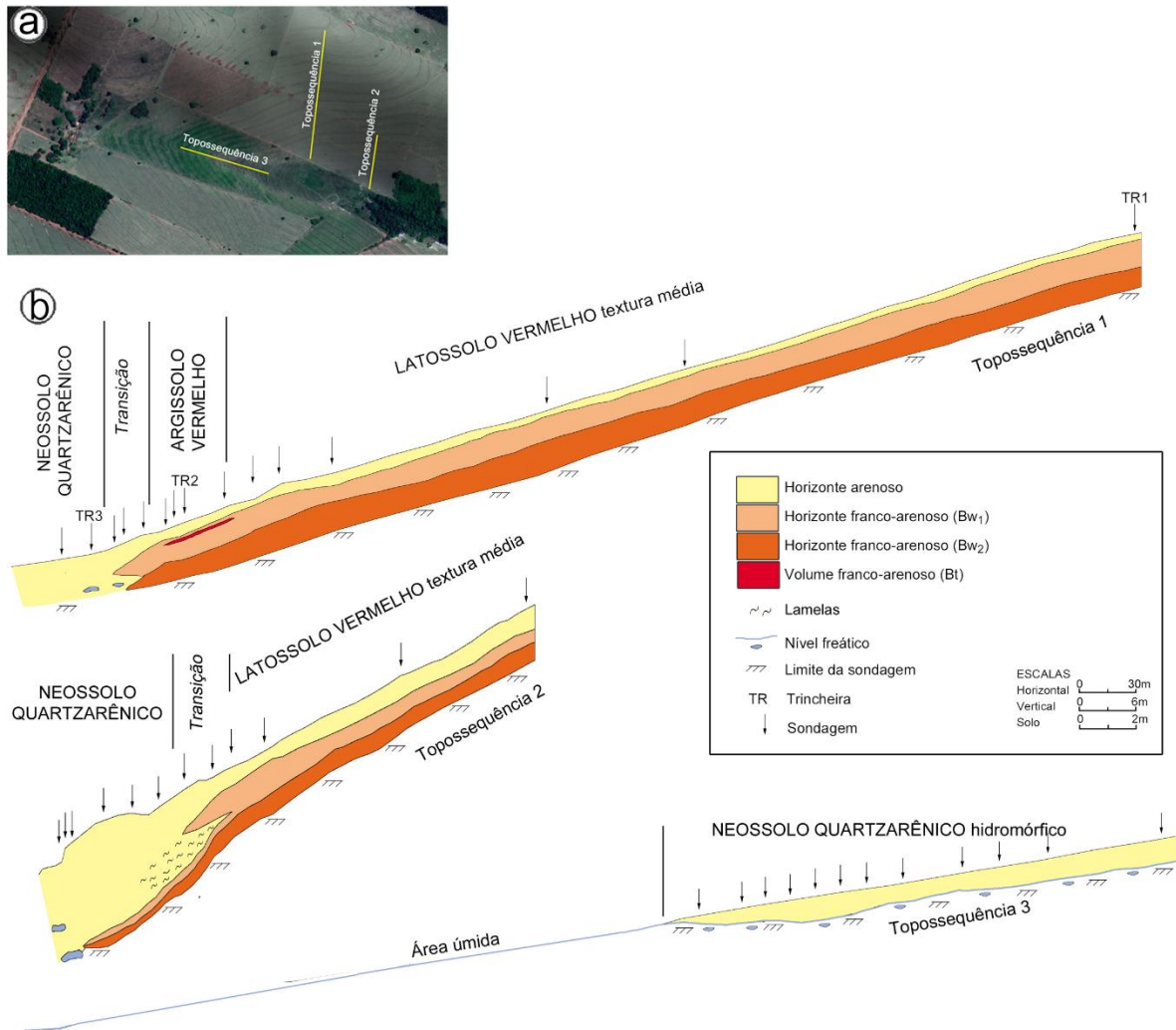


Figura 9. (a) Localização das topossequências analisadas (imagem do Google Earth de 20/09/2017). (b) Topossequências de solos: duas ao longo das vertentes (topossequências 1 e 2) e uma ao longo eixo da concavidade (topossequência 3), em cabeceira de drenagem, a montante de voçoroca, em Cidade Gaúcha (adaptado de KARLING, 2000).

A topossequência 1 apresenta 440 m de comprimento, 7% de declividade e está localizada perpendicularmente ao eixo côncavo do vale, em um segmento intermediário entre a sua cabeceira e o início da voçoroca. É uma vertente convexo-retilínea-côncava (Figura 9b), com o Latossolo Vermelho de textura média se estendendo desde o topo até a baixa vertente, quando passa ao Argissolo Vermelho, que se apresenta como uma faixa estreita e curta e que, na sequência, transiciona para o Neossolo Quartzarênico.

A granulometria indica que o teor de argila para o horizonte Bw é, em média, de 160 g kg⁻¹, sendo que no horizonte Bw₁ é sempre mais baixo do que essa média, enquanto no Bw₂, o teor é relativamente mais alto, variando frequentemente entre 170 e 180 g kg⁻¹ (KARLING, 2000). Os horizontes superficiais são mais empobrecidos em argila, criando um gradiente textural entre o horizonte A e o B, sem apresentar, contudo, indícios de migração e acumulação dessa partícula por iluviação nos horizontes sotopostos (Bw₁ e Bw₂), o que indica que está ocorrendo

uma degradação das características superficiais do Latossolo por perda de finos. O aparecimento de um Bt, resultante de iluviação de argila, só foi constatado na baixa vertente, mais próximo à concavidade. Trata-se de um horizonte estreito e curto (Figura 9b), com mais argila, em meio a horizontes arenosos.

No sopé do segmento côncavo os horizontes são franco-arenosos, constituindo os horizontes Bw₁ e Bw₂, os quais desaparecem cedendo lugar ao espesso horizonte arenoso, contendo entre 70 e 85 g kg⁻¹ de argila, compondo o Neossolo Quartzarênico. Os limites em cunha (Figura 9b) dos horizontes Bw e a perda gradual de argila que apresentam, de montante para jusante, indicam a sua destruição em favor do avanço do volume arenoso do Neossolo no sopé da vertente.

A topossequência 2, localizada próximo à barragem e à voçoroca (Figura 9b), se estende por 187 m até a média vertente. Observa-se, no segmento de baixa vertente, um depósito de material coluvial com menos de 40 g kg⁻¹ de argila recobrimo o horizonte A do solo. Verifica-se, também, o avanço maior do volume arenoso que compõe o Neossolo Quartzarênico em direção a montante e, ao mesmo tempo, o espessamento do volume arenoso superficial que recobre os horizontes Bw até a média vertente. O volume franco-arenoso intermediário apresenta-se mais estreito, o que indica que o espessamento do volume arenoso superior se produziu por perda lateral de argila do topo do horizonte Bw. Os teores de argila permanecem baixos, equivalentes àqueles observados nos horizontes Bw₁ e Bw₂ da topossequência 1 (KARLING, 2000). Esses fatos evidenciam a atuação de fluxos hídricos laterais subsuperficiais de modo mais intenso ao longo da topossequência 2, situada mais próxima à barragem.

A topossequência 3, ao longo do eixo do vale em berço (Figura 9b), mostra a ocorrência do horizonte arenoso e a presença de nível freático a pouco menos de um metro de profundidade, não permitindo o prosseguimento das sondagens a trado. Parte dessa concavidade apresentava-se, no momento do levantamento, alagada e/ou encharcada.

O sistema pedológico é composto pelo Latossolo Vermelho – Argissolo Vermelho – Neossolo Quartzarênico, que também ocorre recobrimo a vertente mais longa da margem direita, onde o Argissolo tem presença mais expressiva, como evidenciou o levantamento de campo, semelhante ao observado em Sumaré (Paranaíba – PR). O Neossolo Quartzarênico apresenta características hidromórficas, passando gradualmente a montante para o Latossolo Vermelho

Tal sistema pedológico indica que nas vertentes do vale, ocorrem fluxos hídricos subsuperficiais, além do escoamento pluvial em superfície, que promovem a retirada lateral de argila, tornando mais arenosos os horizontes superficiais do solo. Ao longo do seu eixo, entretanto, tanto os fluxos superficiais quando os subsuperficiais são mais volumosos e eficientes na retirada das partículas finas, sobrando apenas um volume espesso arenoso, não coesivo, que compõe o Neossolo Quartzarênico e que avança gradualmente nas vertentes marginais às expensas da degradação dos horizontes do Latossolo Vermelho e do Argissolo.

Nesta situação geográfica a formação de voçoroca é favorecida inicialmente pela retirada da vegetação original e degradação das nascentes, que geralmente ocorrem no Noroeste Paranaense em área de Neossolos Quartzarênicos, e pela atuação da erosão regressiva ao longo do vale em berço associado. Todo o processo é potencializado com a concentração e volume superficial e subsuperficial dos fluxos hídricos ao longo do eixo do vale considerando-se, sobretudo, a ampla área de captação de drenagem.

A técnica adotada de contenção do avanço dessa voçoroca tem se mostrado eficiente ao longo do tempo. A análise das imagens orbitais pelo aplicativo Google Earth revela, na área rural, vários casos com a adoção de barragens ao longo do eixo do vale em berço, instaladas de modo preventivo para o controle da erosão. É frequente, também, o surgimento de áreas úmidas, como a observada em Cidade Gaúcha, a montante desses barramentos, ou mesmo o surgimento de lagoas. Verificou-se, entretanto, que ao longo do tempo algumas dessas estruturas são rompidas e destruídas e os processos erosivos reinstalados.

4.2. A cobertura pedológica e as voçorocas nas baixas e médias encostas

Os setores de média e baixa encosta, sobretudo na área rural, com declividades moderadas a fortes, constituem-se em áreas preferenciais de ocorrência de ravinas que podem evoluir para voçorocas, associadas ou não à existência de concavidades. Esses processos ocorrem com maior frequência em áreas ocupadas por cultivos sazonais como a cana de açúcar (THOMAZ; MARCATTO; ANTONELLI, 2022) e a mandioca (THOMAZ; FIDALSKI, 2020), se instalando principalmente durante as fases de preparação do solo, plantio e estágios de germinação, como revela o levantamento realizado a partir das imagens de satélite.

Nesta situação as voçorocas tendem a ser mais curtas e menos profundas, mas podem se apresentar mais ramificadas e/ou dispostas, grosso modo, de forma paralela entre si (Figura 10). As voçorocas ramificadas geralmente resultam do rompimento e conexão entre trechos de curvas de nível ao longo da vertente. Nas encostas, as voçorocas podem estar tanto conectadas quanto desconectadas da rede de drenagem.

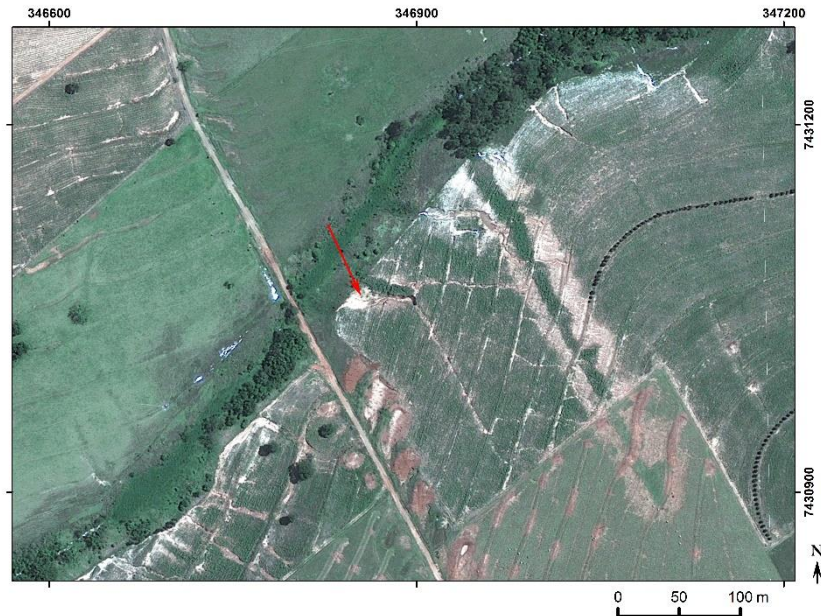


Figura 10. Ravinas e voçorocas situadas na baixa encosta em Tamboara (Imagem do Google Earth de 27/10/2010). A seta vermelha indica a posição da voçoroca analisada. Grade de coordenadas métricas UTM – Zona 22 Sul – Datum SIRGAS2000.

Como exemplo da organização da cobertura pedológica em área onde ocorrem voçorocas em setores de média e baixa encosta apresenta-se o caso de Tamboara (BONIFÁCIO et al., 2011), Figuras 1 e 10. A voçoroca analisada mede 62 m de extensão a partir do sopé da vertente e está conectada, a montante, a duas ravinas: uma com 140 m de extensão, instalada em um segmento de baixa-média encosta com 5% de declividade, e outra com 103 m de comprimento. A voçoroca se afunila a montante e se alarga mais a jusante, com o afloramento do nível freático a partir do seu segmento médio (Figuras 10 e 11a), onde também exibe a maior profundidade, atingindo 3 m. O alargamento ocorre quando a incisão atinge um nível endurecido, ferruginizado (petroplintita) e localmente alveolar (Figura 11a, b), que está parcialmente recoberto pelos sedimentos depositados a jusante, em forma de leque, nas margens planas do curso d'água. O nível freático aflora sobre a petroplintita.

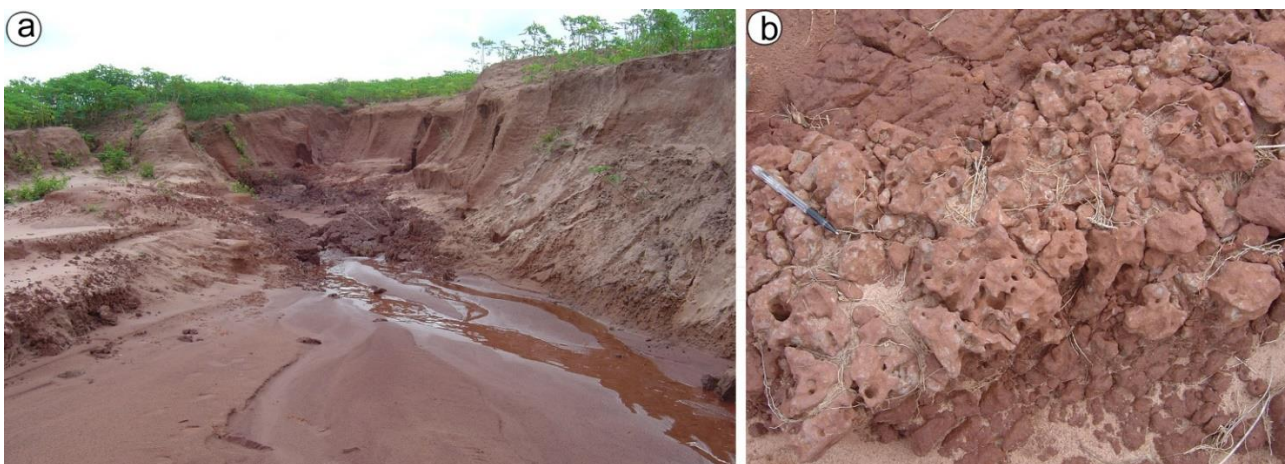


Figura 11. Voçoroca em Tamboara: (a) aspecto geral da forma da voçoroca e do leito onde ocorre o nível endurecido ferruginoso (petroplintita); (b) detalhe do nível ferruginoso endurecido.

A organização da cobertura pedológica, analisada diretamente nos taludes da forma erosiva e complementada por sondagens a trado a montante da voçoroca, é apresentada na Figura 12.

Domina nesse vale, ao longo das vertentes convexo-retilíneo-côncavas, o sistema pedológico constituído por Latossolo Vermelho – Argissolo Vermelho – Neossolo Quartzarênico.

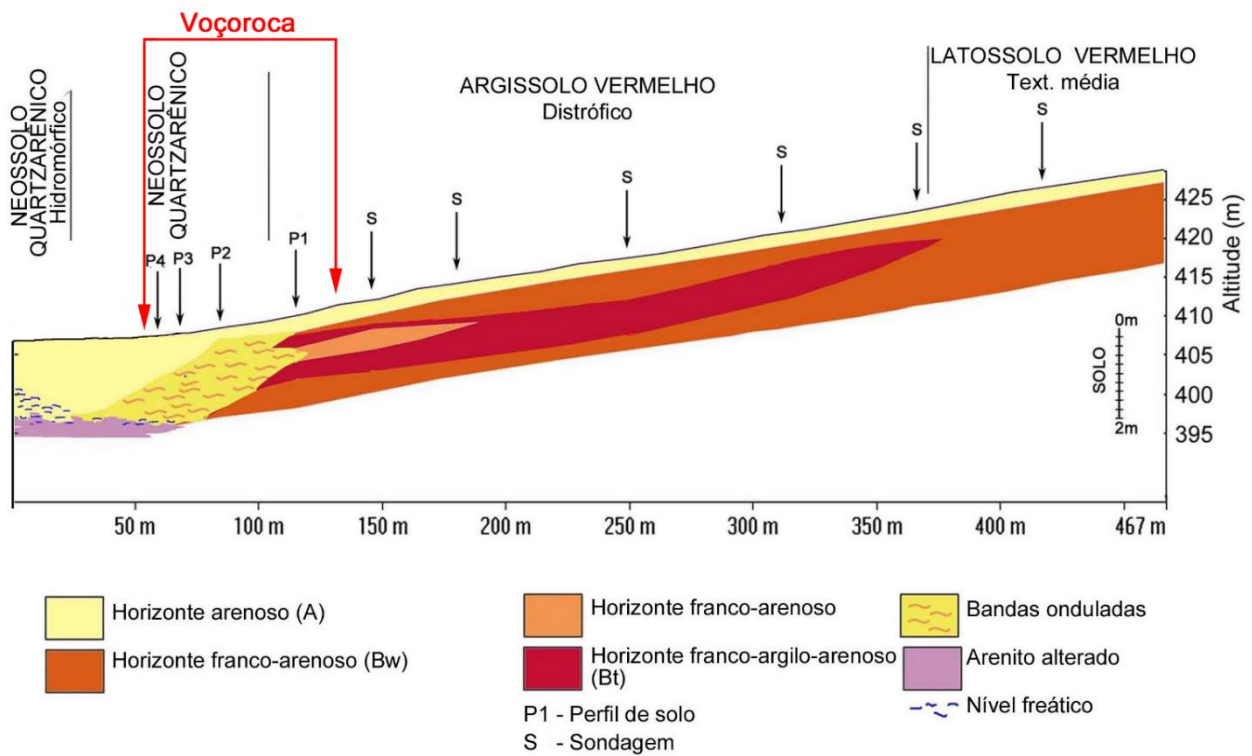


Figura 12. Organização da cobertura pedológica ao longo da vertente em Tamboara (adaptado de BONIFÁCIO et al., 2011).

A voçoroca está instalada na baixa vertente onde ocorre a transição entre o Argissolo Vermelho e o Neossolo Quartzarênico (Figura 13a). A morfologia observada ao longo dos perfis 1 e 2 (P1 e P2, Figura 12) indica que está ocorrendo a destruição remontante do horizonte Bt, o que é evidenciado pela presença de bandas onduladas, constituídas por material com mais argila, ao longo do perfil P2 (Neossolo Quartzarênico). Essas bandas amarelo avermelhadas, consideradas resquícios do Bt, indicam a sua transformação em um volume muito arenoso de coloração mais clara (Figura 13b).



Figura 13. Voçoroca de Tamboara (PR): (a) segmento de baixa vertente onde ocorre a transformação do Argissolo Vermelho em Neossolo Quartzarênico; nos perfis abertos e limpos é possível verificar o clareamento da cobertura pedológica, de montante para jusante; (b) aspecto das bandas onduladas (lamelas) presentes no Neossolo Quartzarênico e relacionadas a resíduos da destruição do horizonte Bt, observadas no Perfil P2.

No segmento dominado pelo Latossolo Vermelho, os teores de argila variam entre 15% e 18% no horizonte Bw, predominando a fração areia fina com teores que oscilam entre 43% e 52%. A fração areia grossa tende a ser maior em superfície e diminuir em profundidade. No segmento do Argissolo, o horizonte Bt apresenta teores de argila que variam entre 23% e 29%, criando um contraste textural significativo com os horizontes superiores, cujos teores estão compreendidos entre 8% e 13% (BONIFÁCIO et al., 2011). Esse contraste textural favorece a ocorrência de fluxos hídricos subsuperficiais sobre o horizonte Bt, como já relatado nos casos anteriores, promovendo a ocorrência de *piping* ao longo das paredes da voçoroca, especialmente nos segmentos de montante (Figura 14), facilitando o avanço regressivo da feição erosiva e a sua ramificação.



Figura 14. Ocorrência de *piping* no segmento superior da voçoroca de Tamboara, evidenciado pelos dutos expostos nos taludes

No sopé côncavo da vertente, o Bt dá lugar ao horizonte cada vez mais arenoso em direção à jusante, onde os teores de argila raramente ultrapassam 5%. A fração areia grossa também aumenta gradualmente para jusante, aproximando-se dos teores de areia fina, mas sem suplantá-los (BONIFÁCIO et al., 2011). Fica evidente, deste modo, que não é apenas a fração argila que se desloca nessa cobertura, mas também a areia fina, embora em menor proporção.

Várias outras ravinas e voçorocas se instalaram nesse setor de alto vale do curso d'água à época ocupado por cultura de mandioca. Entretanto, a vertente oposta, recoberta por pastagens, não exhibe feições erosivas semelhantes.

Constata-se, neste caso, que nesse segmento da vertente, a organização pedológica se apresenta mais vulnerável quando submetido a uso com culturas temporárias, como o plantio da mandioca (THOMAZ; FIDALSKI, 2020). O baixo recobrimento vegetal da superfície do solo facilita o aparecimento de ravinas e a sua evolução para voçorocas, fenômeno potencializado pela ocorrência de fluxos hídricos subsuperficiais sobre o horizonte Bt dos Argissolos e pela destruição do horizonte Bt, a jusante, favorecendo o espessamento dos horizontes arenosos, não coesivos, do Neossolo Quartzarênico, como já observado em outras áreas do Noroeste do Paraná (CUNHA; CASTRO; SALOMÃO, 1999; KARLING, 2000; OLIVEIRA; SANTOS; CALEGARI, 2020; SANTOS; OLIVEIRA, 2023 entre outros). O limite do aprofundamento do entalhe foi, em parte, imposto pelo nível endurecido ferruginoso (petroplintita).

4.3. As voçorocas em anfiteatros de cabeceiras

A terceira situação observada ocorre associada a uma morfologia de cabeceiras em forma de grandes anfiteatros, delimitados por rupturas de declividade marcada e onde estão instaladas várias nascentes de pequenos

cursos d'água. As voçorocas ocorrem conectadas ou desconectadas da rede de drenagem, com dimensões e formas variadas, algumas mais largas e profundas a montante e mais rasas e estreitas a jusante, principalmente quando localizadas em posições mais próximas às rupturas que delimitam os anfiteatros (Figura 15). Essas formas estão presentes principalmente nos municípios de Terra Rica, Guairaçá e Loanda.



Figura 15. Voçoroca em anfiteatro de cabeceira de drenagem, município de Terra Rica (PR).

As fotografias aéreas do levantamento de 1980 mostram que as cabeceiras em anfiteatro situadas no município de Terra Rica, o exemplo adotado para esta análise (Figura 16), encontravam-se desmatadas, assim como a maior parte da área, e ocupadas por pastagens e culturas, principalmente de algodão herbáceo. Ao longo do fundo côncavo desses anfiteatros observa-se a ocorrência de profundas e extensas incisões, com até 1 km de comprimento e mais de 100 m de largura, todas atingindo posições relativamente próximas às rupturas marcadas que definem os anfiteatros. Enquanto em algumas áreas a vegetação original foi mantida ao longo do fundo, em outras observa-se o reentalhe por uma incisão mais recente e estreita. Deduz-se, portanto, que se trata de formas erosivas geradas em períodos anteriores à ocupação desse território e que foram, em parte, reativadas pela colonização da área. Goulart e Santos (2014) e Marcolin et al. (2023), em pesquisas realizadas no município de Loanda (PR), se referem a paleovoçorocas para designar formas similares, sugerindo a sua formação ainda no Quaternário, mas sob condições climáticas e edáficas distintas das atuais.

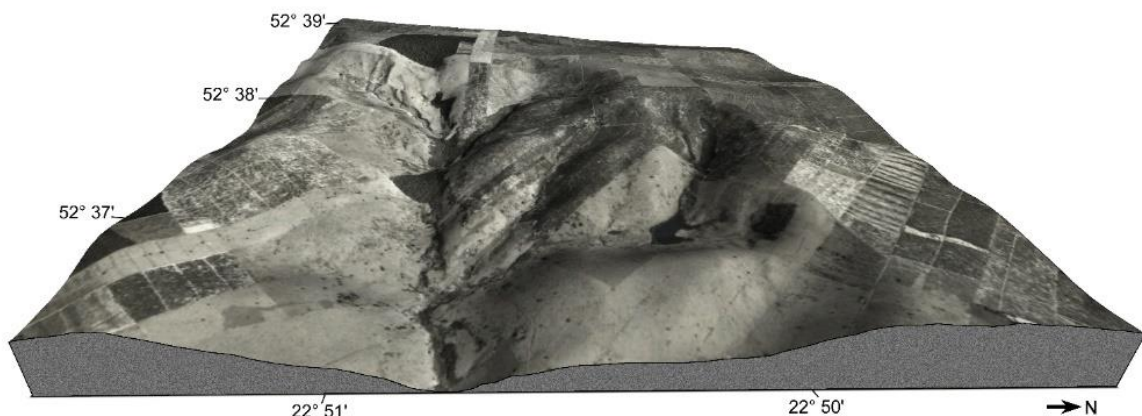


Figura 16. Aspecto geral das cabeceiras em anfiteatros marcados e das voçorocas existentes em 1980, no município de Terra Rica. Base: Aerofoto 1:25000, 1980, ITC-PR.

No interior dos anfiteatros (Figuras 16 e 17a), nas vertentes que, de modo geral, apresentam perfis convexo-retilíneo-côncavos, se alternam lateralmente formas côncavas (*hollows*) e convexas (*noses*), como definidas por Hack e Goodlett (1960), criando uma morfologia mais complexa. A partir do topo achatado, com declividade inferior a 2%, ocorre a ruptura convexa e, na sequência, os segmentos de alta encosta com declividades de 12% a 14%,

atingindo 17% no setor médio (Figura 17a, b). Na ruptura côncava do sopé, as declividades variam entre 5% e 8%. A cobertura pedológica é constituída principalmente pelo Argissolo, que se estende do topo até a baixa vertente quando, eventualmente, passa para Neossolo Quartzarênico.

Em imagens de sensoriamento remoto posteriores, observa-se a área principalmente ocupada por pastagens, empregando curvas de nível, e um aumento da cobertura do solo por vegetação florestal, sobretudo nas áreas de fundo de vale e baixas vertentes. Em alguns casos, essa cobertura se estendeu para segmentos mais elevados. Entretanto, na imagem da Figura 18 (Google Earth, 30/07/2016), mesmo com a adoção de medidas conservacionistas, observa-se a ocorrência de numerosas voçorocas que se formaram após 1980.

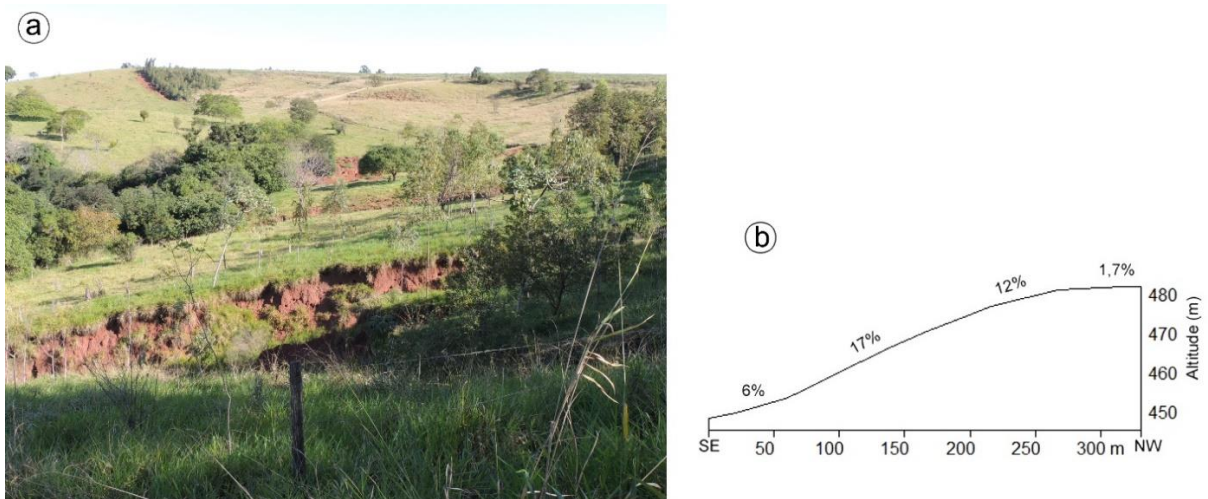


Figura 17. Anfiteatro em Terra Rica (PR): (a) morfologia no interior do anfiteatro: no primeiro plano destaca-se uma voçoroca e, na sequência, a alternância de áreas côncavas (*hollows*) e convexas (*noses*) e os segmentos das vertentes associadas.; (b) perfil topográfico da vertente vista em primeiro plano com a indicação das declividades (exagero vertical 3X).

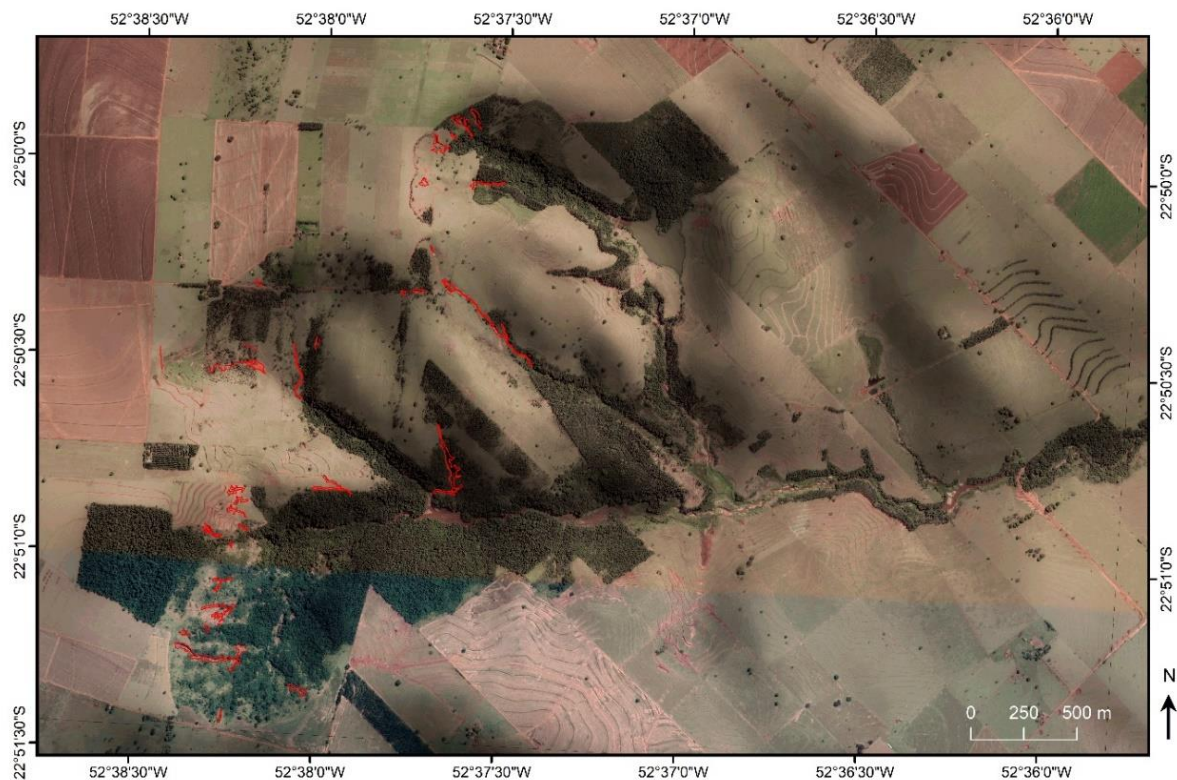


Figura 18. As condições dos anfiteatros em 2016 (Imagem do Google Earth de 30/07/2016): aumento da cobertura florestal e ocorrência de voçorocas em posições mais altas nas vertentes (destacadas em vermelho). Grade de coordenadas geográficas – Datum SIRGAS2000.

Nesta nova fase, as incisões aparecem nos segmentos de alta e média encosta, geralmente ao longo das concavidades (*hollows*). Estas novas voçorocas que ocorrem em setores mais altos nas vertentes, em vários casos, estão inicialmente desconectadas da rede de drenagem, onde é comum a ocorrência de cones de dejeção ao final da incisão. Por outro lado, a conexão com a rede de drenagem ocorre à medida que o processo avança progressivamente na vertente (OLIVEIRA; MEIS, 1985; OLIVEIRA, 1989; OLIVEIRA; LEMOS; PINTO, 2023) e/ou é capturado pelo avanço regressivo de outro processo já conectado.

As voçorocas atuais, situadas nos setores de altas a médias encostas, tendem a ser mais curtas, com muitas delas medindo menos de 200 m de extensão. Geralmente assumem formas dendríticas ou de bulbos (Figura 19a, b), mais amplas a montante e estreitas a jusante (RĂDOANE; RĂDOANE, 2017). As voçorocas mais extensas são estreitas e lineares ou pouco ramificadas, estendendo-se para posições mais baixas nas vertentes e frequentemente apresentando conexão com a rede de drenagem.

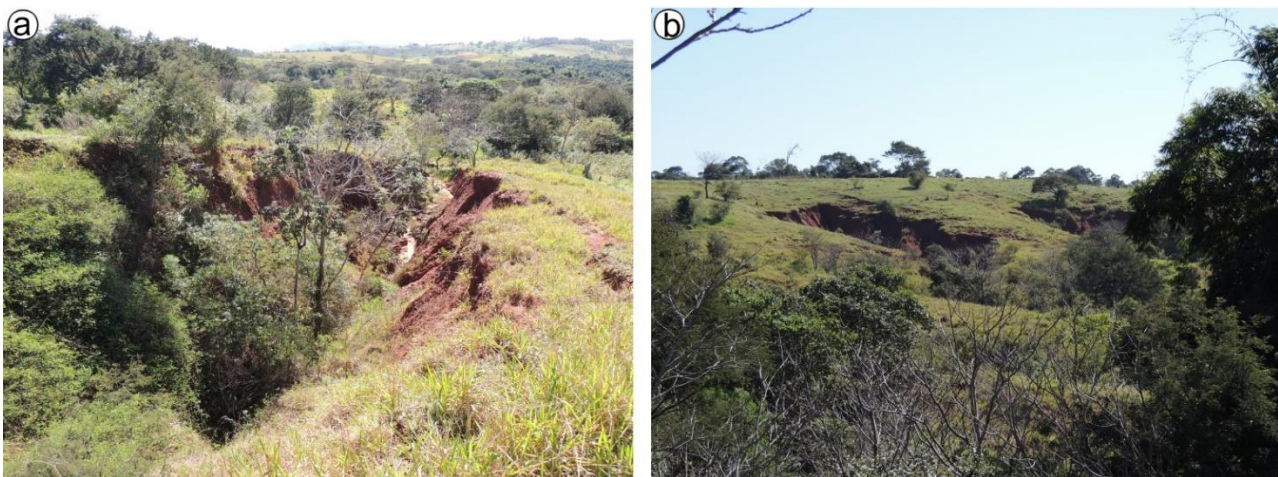


Figura 19. a) e b) Voçorocas curtas e em forma de bulbos que ocorrem nos altos e médios setores das vertentes.

A complexidade morfológica composta por áreas côncavas (*hollows*), convexas (*noses*) e vertentes associadas, se reproduz na formação e comportamento dos fluxos hídricos (RUHE, 1975), alternando no interior do anfiteatro diferentes zonas de concentração e dispersão de água, tanto em superfície quanto subsuperfície. A esse fato soma-se o papel da cobertura pedológica, constituída essencialmente pelo Argissolo Vermelho abrupto, e as condições topográficas com segmentos na alta e média encosta, classificados como moderadamente inclinados, de acordo com Young (1972).

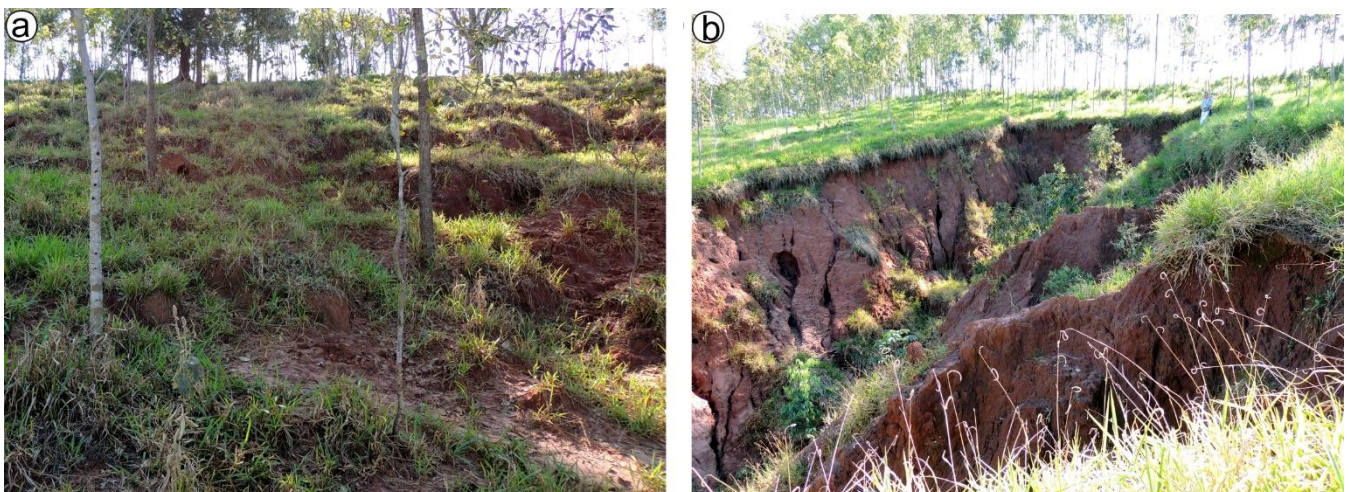


Figura 20. (a) Movimentos em massa dos horizontes superficiais do solo associados à saturação hídrica e *piping*, em área a montante de cabeceira de voçoroca. (b) Morfologia da cabeceira da voçoroca com a evidente atuação de *piping* na evolução das paredes.

Nesse contexto, a atuação dos fluxos hídricos laterais subsuperficiais sobre o horizonte Bt, que possibilitam a formação e atuação de *pipes*, e erosão por vazamento (*seepage erosion*) juntamente com a saturação rápida dos horizontes superficiais, quando associada às declividades mais acentuadas, fragiliza essas camadas e favorece o desencadeamento de movimentos em massa. Embora esses movimentos ocorram em uma escala reduzida (Figura 20a, b), são suficientes para concentrar fluxos em superfície e iniciar incisões. A erosão por vazamento tem sido atribuída como o principal processo na morfologia de cabeceiras em forma de grandes anfiteatros (ONDA, 1994; MICALLEF et al., 2020; SOCKNESS; GRAN, 2022).

5. Conclusões

Os exemplos de voçorocas ora analisados evidenciam que, em cada situação geográfica, o conjunto de fatores que as geram apresentam combinações particulares, tanto para a origem do processo quanto para a sua evolução morfológica.

As voçorocas mais extensas estão associadas aos longos eixos dos vales em berço, integrantes das bacias de ordem zero, com grande área de captação de águas do escoamento pluvial e subsuperficial, conectadas à rede de drenagem. Constatou-se que suas cabeceiras evoluem de modo regressivo ao longo dos eixos côncavos, com declividades fracas, alcançando segmentos mais altos no relevo. Quanto aos solos, na origem, a ocorrência de Neossolos Quartzarênicos facilita a instalação e avanço do processo para montante, enquanto os segmentos dominados pelo Argissolo, com a ocorrência de fluxos hídricos subsuperficiais, por ocasião dos períodos chuvosos, tendem a se alargar (evolução lateral) mais e a se ramificar. Áreas consideráveis estão degradadas, como aquela de Sumaré (Paranavaí – PR) e grandes volumes de solos são perdidos, descarregados nos cursos d'água.

Nos segmentos de baixa e média encosta, as voçorocas são mais curtas e relativamente mais rasas. Surgem, sobretudo, associadas ao manejo das áreas cultivadas, frequentemente vinculadas ao rompimento de curvas de nível e atuação de *piping* gerado pelos fluxos hídricos subsuperficiais sobre o horizonte Bt dos Argissolos. Geralmente são corrigidas por ocasião de novos preparos do solo, apesar das profundidades que atingem (superiores a 1 m).

As incisões erosivas nos grandes anfiteatros ocorrem em vertentes com declividades mais acentuadas, superiores a 12%, mas são curtas, mais profundas e alargadas a montante e mais rasas e estreitas a jusante. Atualmente aparecem em áreas ocupadas por pastagens. A atuação dos fluxos hídricos subsuperficiais sobre o horizonte Bt, também desempenha um papel importante no seu desencadeamento e evolução.

De modo geral, o uso da terra e o comportamento dos fluxos hídricos em combinação com a morfologia das vertentes e da cobertura pedológica são apontados como os principais fatores que controlam o aparecimento e evolução de voçorocas. No Noroeste do Paraná, os principais tipos de uso da terra são as pastagens e as culturas de cana-de-açúcar e mandioca, todos realizados em nível. Nos levantamentos em campo e nas observações realizadas em imagens de sensoriamento remoto, verificou-se que as voçorocas ocorrem sob qualquer condição de uso, mas com maior frequência associadas a áreas de cultivo. A condição desse fator de controle, além da homogeneidade do substrato geológico (os arenitos do Grupo Caiuá), possibilitou avaliar o papel que as vertentes e os solos desempenham na dinâmica dos fluxos hídricos e na origem e evolução dessas formas erosivas na região, assim como, prever os locais preferenciais de sua ocorrência na paisagem. São informações relevantes que contribuem para o reconhecimento da vulnerabilidade das áreas a esses processos erosivos e contribuem, também, para a adoção de práticas de controle e prevenção mais adequadas.

Contribuição dos autores: M. T. N: Concepção, Metodologia, Validação, Investigação, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição, Visualização, Supervisão. H. S: Concepção, Metodologia, Investigação, Redação – versão inicial, Supervisão. J. E. C: Concepção, Investigação, Redação – versão inicial. M. C. B: Investigação. C. M. B: Investigação. M. C. B: Investigação.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. AL-BAVI, A. J.; AL-ABADI, A. M.; PRADHAN, B.; ALAMRI, A. M. Assessing gully erosion susceptibility using topographic derived attributes, multi-criteria decision-making, and machine learning classifiers. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 12, n. 1, p.3035-3062, 2021. DOI:10.1080/19475705.2021.1994024
2. BECKAUSER, M. C. **Os solos e a dinâmica erosiva ao longo de uma voçoroca no distrito de Sumaré em Paranavaí – PR**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós- Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2020. 104p.
3. BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, J. Z. **Visão integrada da problemática da erosão**. Maringá: ABGE/ADEA, 1985. 232p. (Livro Guia: Simpósio nacional de controle da erosão, Maringá)
4. BONIFÁCIO, C. M.; SANTOS, R. M.; NÓBREGA, M. T.; SILVEIRA, H. Los sistemas pedológicos y susceptibilidad a la erosión en Tamboara, región Noroeste de Paraná - Brasil. In: International Geographic Union, 2011, Santiago, Chile. **Anais...** Santiago: International Geographic Union, 2011, p. 1-10.
5. BOULET, R.; CHAUVEL, A.; HUMBEL, F.X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et pédologie I. Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de couverture pédologique: les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. **Cahiers ORSTOM** (ser. Pédol.) v. 19, n. 4, p. 309-322, 1982.
6. BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. A. L. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Paraná**. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Curitiba: SBG-CPRM, 2021. Escala 1:600.000.
7. CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Compartimentação morfopedológica e sua aplicação: considerações morfológicas. **GeoUSP Espaço e Tempo**, v. 4, n. 1, p.27-37, 2000. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2000.123401
8. CMNP (COMPANHIA MELHORAMENTOS NORTE DO PARANÁ). **Colonização e Desenvolvimento do Norte do Paraná**. 3ª. Ed. CMNP, 2013, 254p.
9. CROZIER, M. J. Hillslope hollow. In: GOUDIE, A. S. (Ed.) **Encyclopedia of Geomorphology**. New York: Routledge, 2004. V. 1, p. 521-523.
10. CUNHA, J. E. **Funcionamento hídrico e suscetibilidade erosiva de um sistema pedológico constituído por Latossolo e Argissolo no município de Cidade Gaúcha-PR**. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002. 175p.
11. CUNHA, J. E.; CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Comportamento erosivo de um sistema pedológico de Umuarama, Noroeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.23, p. 943-951, 1999.
12. CUNHA, J. E.; NÓBREGA, M. T.; CASTRO, S. S. Infiltração da água no solo no sistema pedológico Campus do Arenito, Cidade Gaúcha, Noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.32, p. 1837-1848, 2008.
13. DERPSCH, R.; ROTH, C. N.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Londrina: GTZ - IAPAR, 1991. 272p.
14. EMBRAPA. **Mapa de Solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. Escala 1:600.000. 2008.
15. FASOLO, P. J.; CARDOSO, A. P.; CARVALHO, A. P.; HOCHMÜLLER, D. P.; RAUEN, M. J.; PÖTTER, R. O. **Erosão: Inventário de áreas críticas no Noroeste do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1988. 19p. Boletim Técnico 23.
16. FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n.3, p. 164-176, 1994.
17. GASPARETTO, N. V.; NAKASHIMA, P.; NÓBREGA, M. T. **Notícia Explicativa da Carta de Zonas de Risco de Umuarama**. Maringá: Convênio UEM/SUCEAM, 1994.
18. GASPARETTO, N. V.; NAKASHIMA, P.; NÓBREGA, M. T. **Notícia Explicativa da Carta de Zonas de Risco de Paranavaí**. Maringá: Convênio UEM/SUCEAM, 1995a.
19. GASPARETTO, N. V.; NAKASHIMA, P.; NÓBREGA, M. T. **Notícia Explicativa da Carta de Zonas de Risco de Cidade Gaúcha**. Maringá: Convênio UEM/SUCEAM, 1995b.
20. GASPARETTO, N. V.; NAKASHIMA, P.; NÓBREGA, M. T. **Notícia Explicativa da Carta de Zonas de Risco de Cianorte**. Maringá: Convênio UEM/SUCEAM, 1995c.
21. GOMÉZ-GUTIÉRREZ, A.; CONOSCENTI, C.; ANGILERI, S. E.; ROTIGLIANO, E.; SCHNABEL, S. Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. **Natural Hazards**, n. 79, p.291-314, 2015. DOI: 10.1007/s11069-01501703-0
22. GOULART, A.; SANTOS, L. Evolução temporal e espacial das paleovoçorocas presentes no município de Loanda/PR. **Revista Geonorte**, v. 5, n.21, p.81-86, 2014.
23. HACK; J. T.; GOODLETT, J. **Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the Central Appalachians**. U.S. Geological Survey, 1960, 66p. (Prof. Paper 347).

24. IAT. Instituto Água e Terra. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Governo do Estado do Paraná. 2022. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas>. Acesso em: 30 nov.de 2022.
25. IGWE, O.; JOHN, U. I.; SALOMON, O.; OBINA, O. Gis-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. **Geoenvironmental Disasters**, 7:32, p.1-16, 2020. DOI: 10.1186/s40677-020-00166-8
26. KARLING, G. **Estudo da morfologia e estrutura da cobertura pedológica em cabeceira de drenagem na área rural de Cidade Gaúcha**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2000. 71p.
27. MAACK, R. As consequências da devastação das matas no estado do Paraná. **Arq. De Biol. E Tecnol. Curitiba**, v. VIII, p.459-472, 1953.
28. MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. Curitiba: Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas, 1968. 350p.
29. MARCOLIN, L.; CALEGARI, M. R.; SANTOS, L. J. C.; CAMARGO, P. B. Phytoliths, $\delta^{13}\text{C}$ and Charcoal: Holocene environmental memories from a paleogully in northwestern Paraná State. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i00.2328
30. MICALLEF, A.; SAADATKHAH, N.; SPITERI, J.; RIZZO, E.; CAPOZZOLI, L.; DE MARTINO, G.; PACE, L.; BURRIL, C.; GATT, M.; SCHMIDT, M.; GUPTA, S. Groundwater seepage is a key driver of theater-headed valley formation in limestone. **Geology**, v. 50, n. 6, p.686-690, 2020. DOI: 10.1130/G49938.1
31. MONTANHER, O.C.; MINAKI, C.; DE MORAIS, E.S.; DE PAULA SILVA, J.; PEREIRA, P. Geosystemic Impacts of the Extreme Rainfall Linked to the El Niño 2015/2016 Event in Northern Paraná, Brazil. **Applied Sciences**, v. 13, 9678, 2023. DOI: 10.3390/app13179678
32. MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3rd Ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 298p.
33. NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. D. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR. 2019. 210p.
34. NÓBREGA, M. T.; CUNHA, J. E.; SILVEIRA, H.; BONIFÁCIO, C. M. A morfopedologia e a dinâmica das paisagens no Noroeste Paranaense em face da erosão. In: SERRA, E.; SILVEIRA, H; NÓBREGA, M. T (Org.). **Noroeste Paranaense. Paisagem e desenvolvimento rural**. Maringá: PGE Ed. UEM, 2022. p. 71-114.
35. OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C.; CALEGARI, M. R. Relação solo-relevo em sistema pedológico Argissolo-Neossolo Quartzarênico na região Noroeste do estado do Paraná: caso de Amaporã. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i3.1786
36. OLIVEIRA, M. A. T. Erosion disconformities and gully morphology: a three-dimensional approach. **Catena**, v. 6, n. 4/5, p.413-423, 1989.
37. OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.) **Erosão e conservação dos solos**. 2^a Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p.57-99.
38. OLIVEIRA, M. A. T.; LEMOS, R.; PINTO, L. R. Pode uma voçoroca resultar da evolução de voçorocas conectadas e desconectadas? **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i00.2372
39. OLIVEIRA, M. A. T.; MEIS, M. R. M. Relações entre geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada (Bananal, SP). **Geociências**, n. 4, p.87-99, 1985.
40. ONDA, Y. Seepage erosion and its implication to the formation of amphitheatre valley heads: A case study at Obara, Japan. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 19, n. 7, p. 627–640, 1994. DOI:10.1002/esp.3290190704
41. POESEN, J. Soil erosion in the Anthropocene: research needs. **Earth Surface Processes Landforms**, n. 43, p. 64-84, 2018. DOI: 10.1002/esp.4250
42. POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, n. 50, p. 91-133, 2003. DOI: 10.1016/s0341-8162(02)00143-1
43. POESEN, J.; TORRI, D.; VANWALLEGHEM, T. Gully erosion: procedures to adopt whe modelling soil erosion in landscapes affected by gullyng. In: MORGAN, R. P. C.; NEARING, M. A. (Ed.). **Handbook of erosion modelling**. Oxford: Willey-Blackwell, 2011. p. 91-133.
44. QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System (versão 3.26.3)**. 2023. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>.
45. RĂDOANE, M.; RĂDOANE, N. Gully erosion. In: RĂDOANE, M.; VESPREMEANU-STROE, A. (Ed.). **Landform dynamics and evolution in Romania**. Spring Geography, 2017. p. 372-396. DOI: 10.1007/978-3-319-32589-7-16
46. RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y. S.; & HATSCHBACH, G. G. As unidades fitogeográficas do estado do Paraná, Brasil. **Ciência & Ambiente**, v. 24, n. 1, p. 75-92, 2002.

47. RUHE, R. V. **Geomorphology: geomorphic processes and superficial geology**. Boston: Houghton Mufflin, 1975. 246p.
48. SANTOS, L. J. C.; OLIVEIRA, J. G. Evolução de Neossolos Quartzarênicos com base em estudo de caso na região Noroeste do Paraná. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 2, 2023.
49. SERRA, E. Noroeste do Paraná: pasto e cana nas terras da última fronteira do café. In: SERRA, E.; SILVEIRA, H.; NÓBREGA, M. T (Org.). **Noroeste Paranaense. Paisagem e desenvolvimento rural**. Maringá: PGE Ed. UEM, 2022. p.09-45.
50. SOCKNESS, B. G.; GRAN, K. B.: An experimental study of drainage network development by surface and subsurface flow in low-gradient landscapes. **Earth Surface Dynamics**, v. 10, n. 3, p. 581–603, 2022. DOI: 10.5194/esurf-10-581-2022, 2022.
51. SILVEIRA, H; PAIVA, R.G.; SANTOS, R.M.; GONÇALVES, F.A.; NÓBREGA, M.T. A morfopedologia e as unidades de paisagem no município de Francisco Alves – PR: potencialidades e vulnerabilidades. In: XIII Simp. Bras. Geografia Física Aplicada, 2009, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009, V.1, p.1-15.
52. THOMAS, M. F. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 460p.
53. THOMAZ, E. L.; FIDALSKI, J. Interrill erodibility of different sandy soils increases along a catena in the Caiuá Sandstone Formation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, e0190064, 2020. DOI: 10.36783/18069657rbc20190064
54. THOMAZ, E. L.; MARCATTO, F. S.; ANTONELI, V. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: An overview. **Geography and Sustainability**, v. 3, n. 2, p. 129-138, 2022. DOI: 10.1016/j.geosus.2022.05.001
55. TORRI, D.; POESEN, J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. **Earth-Science Reviews**, 130, p.73-85, 2014. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.12.006
56. TRICART, J.; KILIAN, J. **L'éco-géographie et l'aménagement du milieu naturel**. Paris: Maspero, 1979. 325p.
57. TSUKAMOTO, Y. Study on the growth of stream channel (I). Relationship between steam channel growth and landslides occurring during heavy storm. **Journal of Japan Erosion Control Society**, v. 25, n. 4, p. 4-13, 1973 (em japonês).
58. VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: impacts, factors and control. **Catena**, n. 63, p. 132-153, 2005. DOI: 10.1016/j.catena.2005.06.001
59. VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography (Sevenoaks)**, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.05.004
60. VANMAERCKE, M.; PANAGOS, P.; VANWALLEGHEM, T.; HAYAS, A., FOERSTER, S.; BORRELI, P.; ROSSI, M.; TORRI, D.; CASALI, J.; BORSELLI, L.; VIGIAK, O.; MAERKER, M.; HAREGEWEYN, N.; De GEE, S.; ZGTOBICKI, W.; BIELDERS, C.; CERDÀ, A.; CONOSCENTI, C.; FIGUEIREDO, T.; EVANS, B.; POESEN, J. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: a state of art. **Earth-Science Reviews**, v. 128, 2021, p.1-34. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103637.
61. YIBETAL, M.; TSUNEKAWA, A.; HAREGEWEYN, N.; ADGO, E.; MESHESHA, D. T.; MASUNAGA, T.; TSUBO, M.; BILLI, P.; EBABU, K.; FENTA, A. A.; BERIHUN, M. L. Morphological characteristics and topographic thresholds of gullies in different agro-ecological environments. **Geomorphology**, n. 341, 2019, p.15-27. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.05.012.
62. WELLS, N. A. Gully. In: GOUDIE, A. S. (Ed.). **Encyclopedia of Geomorphology**. New York: Routledge, 2004. V. 1, p.503-506.
63. YOUNG, A. **Slopes**. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1972. 288p.
64. ZANDONADI, L.; BALDO, M. C. Características climáticas e o fenômeno das secas na mesorregião Noroeste Paranaense. In: SERRA, E.; SILVEIRA, H.; NÓBREGA, M. T (Org.). **Noroeste Paranaense. Paisagem e desenvolvimento rural**. Maringá: PGE Ed. UEM, 2022. p. 115-155.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.