

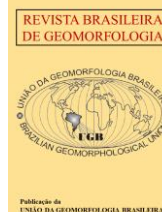


<https://rbgeomorfologia.org.br/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, nº ESPECIAL (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2318>



*Artigo de Revisão*

# Interações recíprocas entre relevo, água e voçorocas: estudo de caso da região do Complexo Bação – Minas Gerais

*Reciprocal interactions between relief, water and gullies: a case study in the Bação Complex region – Minas Gerais*

Luis de Almeida Prado Bacellar <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, Ouro Preto, Brasil. [bacellar@ufop.edu.br](mailto:bacellar@ufop.edu.br)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1670-9471>

Recebido: 13/03/2023; Aceito: 01/12/2023; Publicado: 05/12/2023

**Resumo:** A importância da água na gênese e evolução de voçorocas é conhecida, mas ainda há poucos estudos sobre sua interação com o relevo e o voçorocamento. O objetivo deste trabalho é avançar neste tema numa região do embasamento cristalino (Complexo Bação), no Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, com a revisão de trabalhos científicos desenvolvidos desde 1991. O trabalho envolveu a análise integrada de dados de caracterização geológica, geomorfológica e geotécnica, de monitoramento hídrico e de simulações numéricas de fluxo. Os resultados indicam que a evolução destas voçorocas é consequência do espesso perfil de saprolitos erodíveis e da ação da água subterrânea controlada por fatores geomorfológicos. Com o rebaixamento do aquífero no entorno das voçorocas, a recarga e, conseqüentemente, a exfiltração da água nos taludes das voçorocas é retardada. Contudo, no interior destas predomina o escoamento superficial, resultando no incremento das vazões e inundações no período chuvoso e de redução do fluxo de base na estiagem. A exfiltração atrasada de água nos taludes induz movimentos de massa e *pipings*, mesmo no período seco, mobilizando expressivas cargas de sedimentos que serão transportados nas primeiras chuvas do período úmido. Portanto, as voçorocas no Complexo do Bação são condicionadas e modificam a dinâmica hídrica, proporcionando variados danos econômicos e socioambientais.

**Palavras-chave:** erosão; regime hidrológico; embasamento cristalino; movimentos de massa.

**Abstract:** The importance of water in the genesis and evolution of gullies is well-known, but there are still few studies on its interaction with relief and gullyng. This work aims to advance in this subject in a region of crystalline basement (Bação Complex) in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais state, Southwest region of Brazil. The work involved integrated geological, geomorphological, and geotechnical data analysis, water monitoring, and numerical flow simulations. The results indicate that the evolution of these gullies is a consequence of the thick profile of erodible saprolites and the action of groundwater controlled by geomorphological factors. With the lowering of the water table around the gullies, recharge and exfiltration of water in their slopes are delayed. However, inside the gullies, runoff predominates, resulting in an increase in flows and flooding in the rainy season and a reduction in baseflow in the dry season. The delayed exfiltration of water on the slopes induces mass movements and piping, even in the dry period, mobilizing significant sediment loads that will be transported in the first rains of the wet period. Therefore, Bação Complex's gullies are conditioned and modify the water, causing various economic and socio-environmental damages.

**Keywords:** erosion; hydrological regime; crystalline basement; mass movements.

## 1. Introdução

A erosão hídrica, seja laminar como em canais (sulcos, ravinas e voçorocas), se constitui num processo natural no tempo geológico e que pode ser acelerado por interferências antrópicas. Neste trabalho adota-se a definição de voçoroca como a feição erosiva em canais com seção transversal em forma de U, que se desenvolve por ação combinada de fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, e que se diferenciam das ravinas, que apresentam formas mais lineares e perfil transversal em V, devido ao desenvolvimento exclusivo por fluxos superficiais concentrados (IWASA; PRANDINI, 1982; BACELLAR, 2000). As voçorocas constituem uma forma agressiva de erosão, passível de acarretar uma série de danos socioeconômicos e ambientais, como a perda de áreas férteis, o assoreamento de corpos d'água, impactos na qualidade da água ou na flora e fauna (LAL, 1990; XU, 1996; BACELLAR, 2000; VALENTIN; POESEN et al., 2003; WANTZEN, 2006; BARROS; RAPOSO; MAGALHÃES JÚNIOR, 2009; KIRKBY; BRACKEN, 2009; POESEN, 2011; KHALILI et al.; 2013; KUHN et al., 2023). Na literatura geomorfológica, há relatos de interações recíprocas entre processos, formas de relevo e organismos (CORENBLIT et al., 2008; ORGIAZZI; PANAGOS, 2018). Ou seja, um determinado processo geomorfológico pode gerar uma forma de relevo que afetará por retroalimentação no processo, sob influência de organismos.

Neste sentido, os fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais são agentes influenciados pelo relevo e reconhecidamente importantes na gênese e evolução das voçorocas, como atesta o expressivo número de pesquisas com este foco (WELLS; ANDRIAMIHAJA, 1993; BACELLAR; LACERDA; COELHO NETTO, 2005; POESEN 2011). Por outro lado, como voçorocas de grandes dimensões ocorrem com elevada frequência em diversos ambientes geológicos e geomorfológicos no Brasil e no mundo, é de se supor também que elas exerçam forte impacto nos recursos hídricos, seja em escala local como regional, num típico caso de interação recíproca. A relevância deste tema é inquestionável, até porque muitas das regiões afetadas por voçorocas sofrem também com problemas de disponibilidade hídrica. Contudo, verifica-se que a influência das formas erosivas nos recursos hídricos é tema ainda pouco estudado, ou então objeto de pesquisas muitas vezes focadas em processos isolados ou na escala de detalhe (FITZJOHN; TERNAN; WILLIAMS, 1998; POESEN, 2011; CHEN; MUKESH, 2016; GAO et al., 2016; CHEN et al., 2020).

A região do Complexo Metamórfico Bação, localizado no interior do Quadrilátero Ferrífero (MG), é adequada para avançar no entendimento destas relações recíprocas, por apresentar grande intensidade de voçorocas sobre as quais há um expressivo volume de trabalhos científicos. Contudo, muitos destes são de abrangência local ou envolvem temas muito específicos, como estudos sobre erodibilidade de solos, gênese de voçorocamento e ordenamento territorial (PARZANESE, 1991; BACELLAR, 2000; SILVA, 2000; SOBREIRA, 2000, SANTOS, 2007). Portanto, o objetivo do presente trabalho é entender as relações recíprocas entre relevo, voçorocamento e água através da revisão e síntese dos resultados de trabalhos prévios nesta região. Acredita-se que esta pesquisa poderá vir a contribuir para o desenvolvimento deste tema para esta região como também de outras com características geológicas e pedogeomorfológicas similares.

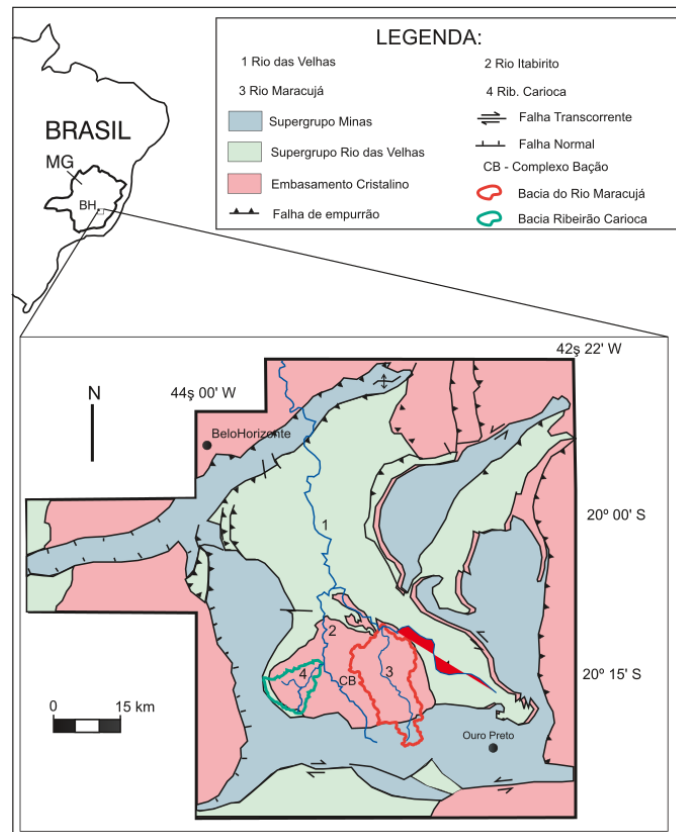
## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Área de Estudo

O Complexo Bação (DORR, 1969; ALKMIN; MARSHAK, 1998; ENDO et al., 2020), com aproximadamente 385 km<sup>2</sup>, constitui o embasamento cristalino mesoarqueano de sequências supracrustais metavulcanossedimentares neoarqueanas (Supergrupo Rio das Velhas) e metassedimentares do proterozóico inferior (Supergrupo Minas) do Quadrilátero Ferrífero (MG). Este complexo aflora numa janela estrutural entre tais supracrustais (Figura 1). É composto predominantemente por gnaisses bandados e migmatitos de composição tonalítica-throndjemítica-granodiorítica, intrudidos por granitóides e, secundariamente, por rochas máficas e ultramáficas (GOMES 1986; NOCE; MACHADO; TEIXEIRA, 1998; LANA; CASTRO; LANA, 2013), além de corpos reliquiais de rochas do Supergrupo Rio das Velhas preservados sobre o complexo (JOHNSON, 1962).

O Complexo Bação é em grande parte drenado por duas bacias hidrográficas afluentes do Rio das Velhas, tributário do Rio São Francisco: a Bacia do Rio Maracujá, a leste, e a Bacia do Rio Itabirito, a oeste (Figura 1). Os estudos aqui apresentados se concentraram em duas das áreas com maior densidade de voçorocas do complexo, na Bacia do Rio Maracujá, com 140 km<sup>2</sup> de área, e na Bacia do Ribeirão Carioca, com 65,9 km<sup>2</sup> de área, este afluente do Rio Itabirito (Figura 1)

No mapeamento em escala de 1:25.000 de todo Complexo Bação, sintetizado num mapa de escala de 1:150.000, Endo et al. (2020) identificaram três grandes suítes gnáissicas principais no complexo além de granitóides diversos: suíte Funil, composta por gnaisses bandados tipo TTG e migmatitos; suítes Amarantina e Glaura, composta por gnaisses finamente laminados, pouco bandados e migmatizados. Nas bacias do Rio Maracujá e do Ribeirão Carioca os granitóides e as suítes Amarantina e Glaura foram agrupadas, por serem menos anisotrópicos que a suíte Funil (figuras 2a e 3a). Rochas supracrustais dos Supergrupos Minas e Rio das Velhas ocorrem nas cabeceiras destas bacias e, no caso da última, também como relictos no interior do complexo, e não serão detalhadas neste trabalho porque a densidade de voçorocas nestas unidades é significativamente menor em relação às demais (Figuras 2b e 3b).

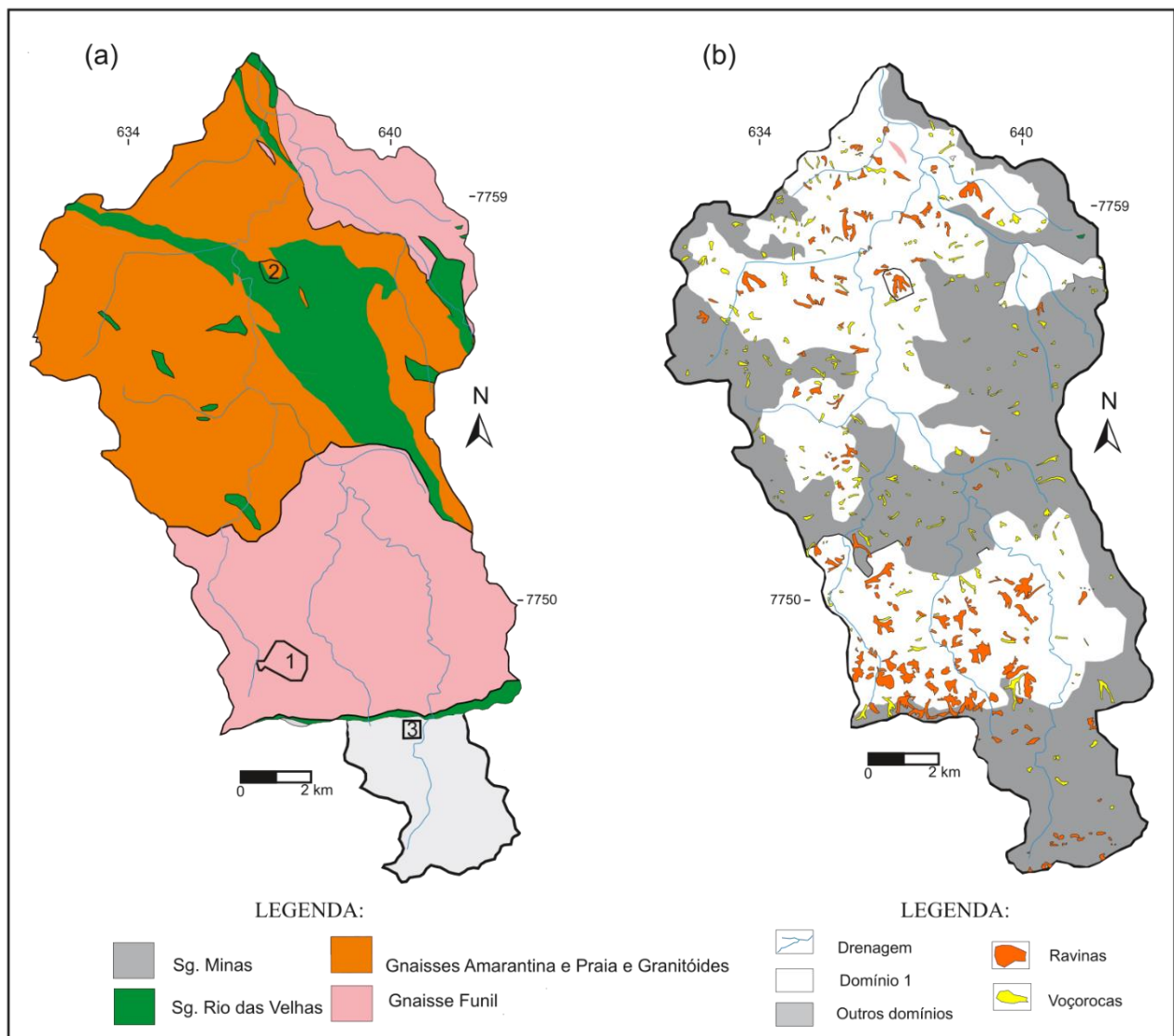


**Figura 1.** (a) Mapa de localização do Complexo Bação (CB) no interior do Quadrilátero Ferrífero (MG) e das bacias hidrográficas do Rio Maracujá e Ribeirão Carioca.

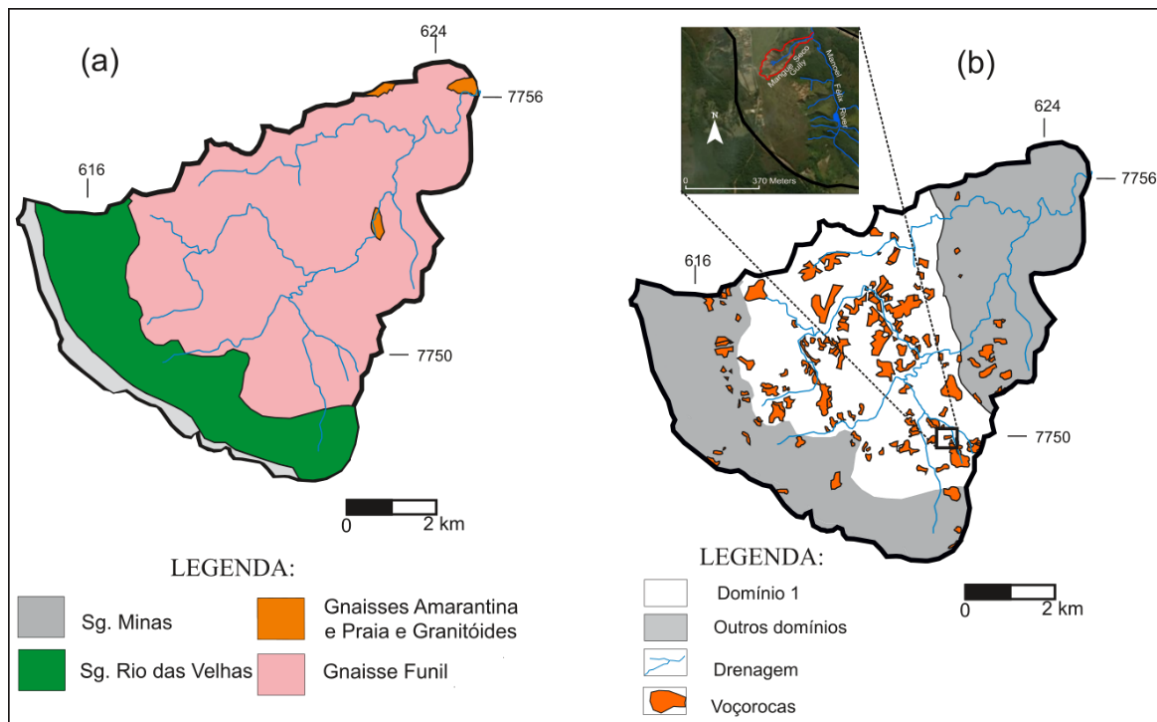
No complexo predominam colinas e morrotes com topos policonvexos (relevo de “mares de morros”) e drenagem dendrítica ou angular dendrítica (BACELLAR, 2000). O perfil de intemperismo é espesso, localmente atingindo 50 m, onde se desenvolvem Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, nas áreas de relevo mais suave, e de Cambissolos háplicos Tb distróficos, nas áreas mais íngremes (UFV, CETEC, UFLA, FEAM, 2010). O horizonte pedológico C (saprolito) é de textura predominantemente siltosa e chega a apresentar dezenas de metros de espessura, enquanto os horizontes superiores (A e B) são mais delgados e com textura predominantemente argilosa (PARZANESE, 1991; BACELLAR, 2000). As voçorocas são abundantes em domínio geomorfológico denominado 1, caracterizado por baixas amplitudes altimétricas, < 70-100 m, em taludes com declives médios inferiores a 30%, mas geralmente inferiores a 15% (BACELLAR, 2000; SANTOS e SOBREIRA, 2008). Nos demais domínios, com predomínio de morros com maiores amplitudes, o manto inconsolidado é mais delgado e o nível d’água subterrâneo se encontra geralmente nas fraturas do maciço rochoso subjacente, fatores que impedem o desenvolvimento de voçorocas (BACELLAR, 2000; BACELLAR et al., 2005).

De fato, no complexo ocorre um sistema aquífero de baixa disponibilidade hídrica (BEATO; MONSORES; BERTACHINI, 2005), constituído por um aquífero fissural no embasamento cristalino, superposto por um aquífero com porosidade intergranular no saprolito. Nas áreas de relevo mais acidentado, predomina o aquífero fissural, enquanto nas áreas mais suaves, o nível d’água normalmente se aloja na base do saprolito (BACELLAR, 2000)

O clima no Complexo Bação se enquadra na classificação de Koppen como de transição de CWb (temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente) nos setores mais elevados para Cwa (temperado úmido com inverno seco e verão quente) nas zonas mais baixas no interior do próprio complexo (SÁ JÚNIOR, 2009). As chuvas se concentram entre outubro e março, e a estação seca ente abril e setembro. A precipitação média anual é de 1.348mm, variando entre 1.024 mm e 1.744 mm (Bacellar, 2000), muito superior à evapotranspiração, resultando em comportamento efluente do sistema de drenagem. A vegetação na região do complexo é considerada como zona de transição entre os domínios do Cerrado e da Floresta Atlântica, classificada como Floresta Estacional Semidecídua (FARIAS, 1992).



**Figura 2.** Bacia hidrográfica do Rio Maracujá: (a) Mapa geológico (modificado de Endo et al., 2020); (b) Mapa de domínios geomorfológicos e das formas de erosão em canais (modificado de BACELLAR, 2000). As estações de monitoramento Holanda, Córrego Maracujá e Piracicaba estão indicadas pelas áreas limitadas pelos números 1, 2 e 3 no mapa geológico.



**Figura 3.** Bacia hidrográfica do Ribeirão Carioca: (a) Mapa geológico (modificado de Endo et al., 2020); (b) Mapa de domínios geomorfológicos e das formas de erosão em canais. Modificado de Netto e Sobreira (2006) e Santos e Sobreira (2008). A localização da voçoroca da Estação de Monitoramento Mangue Seco está representada na imagem Google.

Nestas áreas de relevo mais suave do domínio geomorfológico 1 nas bacias do Rio Maracujá e Ribeirão Carioca há uma grande concentração de voçorocas de grandes dimensões, que atingem 400-500 m de comprimento, 150m de largura e de 50m de profundidade (BACELLAR; LACERDA; COELHO NETTO, 2005). Estas feições se iniciam com pequenos sulcos retilíneos de erosão devido ao escoamento superficial concentrado, que, com o aprofundamento, se transformam em ravinas. Embora os horizontes pedológicos superficiais (A e B) sejam resistentes à erosão (Parzanese, 1991; Bacellar, 2000; Moraes, 2003), a concentração de água de escoamento, facilitada por diversas atividades humanas desde o final do século XVII na região (BACELLAR, 2000), tem capacidade para erodi-lo. Com a continuidade da incisão pela ravina, o saprolito é atingido e se a superfície freática situada em sua base é alcançada, a voçoroca se inicia e se alarga devido à atuação da força de percolação centrípeta (BACELLAR, 2000). Por serem mais resistentes à erosão, os horizontes pedológicos superficiais formam uma cobertura protetiva ao saprolito, resultando em taludes de voçorocas de grandes amplitudes e íngremes, não raramente subverticais nos terços médio e superior.

## 2.2. Desenvolvimento metodológico

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi seguido o seguinte roteiro metodológico. Inicialmente, diversos produtos foram compilados, como: mapas geológicos; pedológicos; topográficos (modelos digitais de relevo obtidos a partir de imagens orbitais de Radar); imagens de sensoriamento remoto (aerofotos; diversas imagens Google Earth; imagens de levantamentos geofísicos, tanto terrestres, como levantamentos de eletrorresistividade e de Georadar, como orbitais, como os levantamentos radiométricos, gravimétricos e magnetométricos; e banco de dados geológicos, pedogeomorfológicos, geotécnicos e hidrológicos/hidrogeológicos sintetizados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Relação das principais fontes pesquisadas de trabalhos da região do Complexo Bação.

Dados	Fonte
Geológicos	Door (1969); Gomes (1986); Alkmin e Marshak, (1998); Noce, Machado e Teixeira (1998); Campos (2006); Lana et al. (2013); Endo et al. (2020).
Pedológicos	Parzanese (1991); Figueiredo et al. (2004); UFV, CETEC, UFLA, FEAM (2010).
Geomorfológicos	Bacellar (2000); Santos et al. (2002); Santos (2007); Carvalho (2014); Lana, Castro e Lana (2022).
Geotécnicos	Bacellar (2000); Sobreira (2000); Silva, (2000); Futai, (2002); Santos, Sobreira e Coelho Netto (2002); Futai e Almeida (2005); Morais (2003); Morais, Bacellar e Sobreira (2004); Hernandez (2020); Hernandez, Bacellar e Araújo Júnior (2022).
Hidrogeológicos/Hidrológicos	Fernandes (1990); Costa (2005); Drumond (2006); Drumond e Bacellar (2006); Costa e Bacellar (2007) Santos, Sobreira e Coelho Netto (2002); Ferreira e Bacellar (2010); Freitas (2012); Freitas e Bacellar (2013); Lima (2016); Lima e Bacellar (2017); Hernandez (2020); Hernandez, Bacellar e Araújo Júnior (2022).
Modelagem hidrogeológica e geotécnica	Lima (2016); Lima, Bacellar e Drumond (2018); Hernandez (2020); Hernandez, Bacellar e Araújo Junior (2022).

### 3. Voçorocas no Complexo do Bação

#### 3.1. Condicionantes geológicos e geomorfológicos do desenvolvimento de voçorocas da região

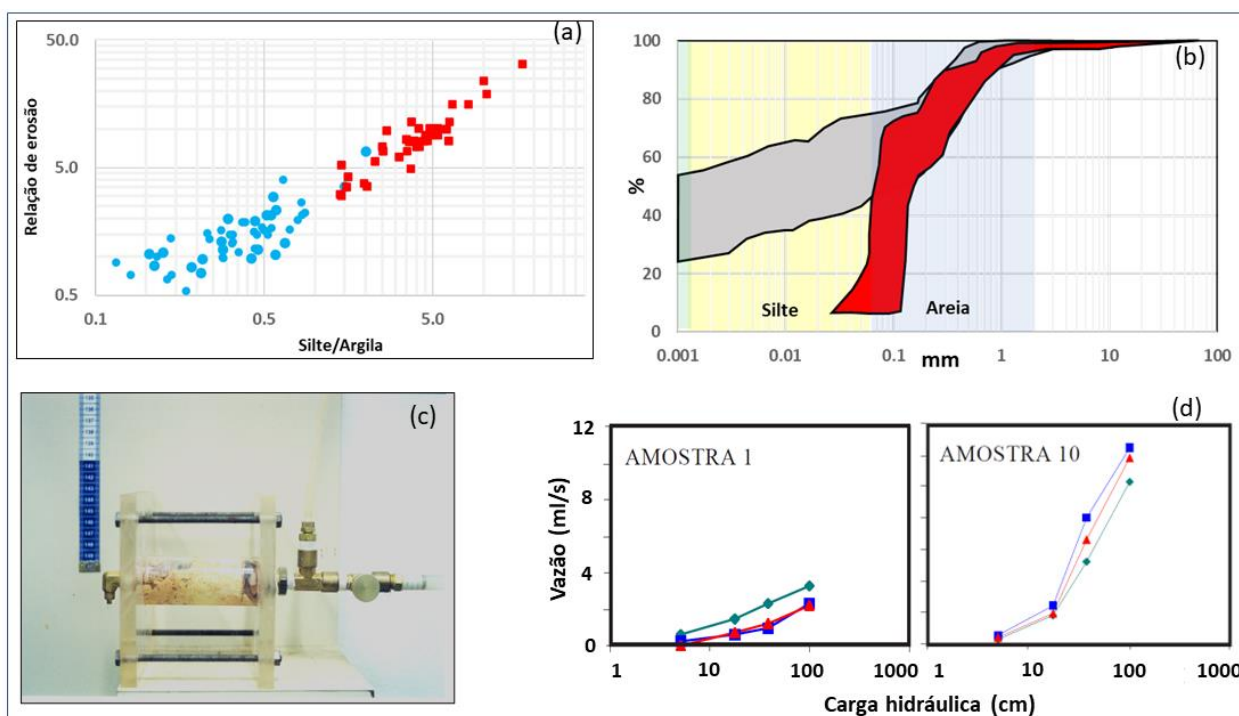
Voçorocas se desenvolvem preferencialmente sobre rochas com potencial de gerar perfis de intemperismo espesso com solo erodível. Como a água subterrânea é fundamental para a transformação de ravinas em voçorocas, é preciso que o perfil de intemperismo detenha certa condutividade hidráulica e capacidade de armazenamento de água. Portanto, voçorocas são mais comuns em rochas sedimentares ou metassedimentares de granulação média, como (meta) arenitos e siltitos e em rochas do embasamento cristalino com potencial de gerar perfis de intemperismo com textura siltosa ou arenosa, como granitos, gnaisses e migmatitos de complexos cristalinos (BACELLAR, 2000). No mapa do Quadrilátero Ferrífero na escala de 1:150.000, Endo et al. (2020) apresentam a síntese do levantamento geológico do Complexo Bação feito originalmente na escala de 1:25.000. Neste mapa, evidencia-se não ser possível correlacionar a concentração de voçorocas do complexo com as diversas tipologias de rochas descritas. De fato, embora haja uma concentração ligeiramente maior de voçorocas na Suite Funil nas bacias do Rio Maracujá e do Ribeirão Carioca, há trechos expressivos com esta unidade desprovidas de voçorocas e outros das demais unidades menos bandadas (Amarantina, Prais e granitóides) com certa proporção de voçorocas (figuras 2 e 3). Como será discutido a seguir, a concentração de voçorocas na região é mais influenciada pela diferenciação geomorfológica induzida pela tectônica, também perceptível por dados aerogeofísicos.

Esta variação de litotipos identificados no Complexo Bação (ENDO et al., 2020) aparentemente não influencia significativamente no desenvolvimento dos perfis de solos. De fato, quando se analisa globalmente a composição mineralógica e textural dos solos coletados especialmente na parte leste do Complexo Bação, na Bacia do Rio Maracujá, verifica-se uma razoável uniformidade, especialmente dos saprolitos (horizonte C), que são essencialmente compostos por feldspatos caulinitizados ou caulinita, quartzo e micas, com predominância de textura silto-arenosa ou areno-siltosa (PARZANESE, 1982; BACELLAR, 2000; FUTAI, 2002). Os horizontes pedológicos A e B (i.e., solum), apesar da uniformidade mineralógica (goethita, hematita, gibbsita e quartzo), apresentam maior diversidade textural e estrutural, influenciados pelo contexto pedo-geomorfológico em que se encontram (PARZANESE, 1991; BACELLAR, 2000; FUTAI, 2002). Nestes horizontes predominam solos com certa plasticidade, resultantes da textura argilo arenosa, com desenvolvimento de Latossolos Vermelho-Amarelos nas áreas de relevo mais suave e de Cambissolos nas área de relevo mais acidentado (PARZANESE, 1991; FIGUEIREDO et al., 2004; SANTOS; SOBREIRA, 2008; UFV, CETEC, UFLA, FEAM, 2010). No campo, constata-se rampas coluvionares sobrejacentes a saprolitos ou a depósitos aluviais (BACELLAR, 2000). Estes colúvios se assemelham muito ao solum, tanto em termos composicionais como texturais, apresentado comportamento

geotécnico similar, de solo laterítico, conforme definição de Nogami e Villibor (1995). Por tal razão, nem sempre é fácil distingui-los no campo por critérios macroscópicos (Bacellar, 2000), motivo pelo qual será utilizado neste trabalho o termo solum para ambos.

Diversos ensaios de determinação de erodibilidade têm sido feitos em grande número na região por muitos autores (PARZANESE, 1991; BACELLAR, 2000; SILVA, 2000; SANTOS, SOBREIRA E COELHO NETO, 2002; MORAIS, 2003; MORAIS, BACELLAR E SOBREIRA, 2004), com destaque para: estabilidade de agregados, razão silte-argila; razão de argila (BOUYOUCOS, 1935); ensaio de Inderbitzen; parcelas experimentais de campo; ensaio de furo de agulha (SHERARD et al., 1976). Maiores informações sobre estes ensaios podem ser obtidas nos trabalhos citados. Os resultados destes sistematicamente reforçam a ideia de que os saprolitos são via de regra muito erodíveis e que o solum exibe baixa erodibilidade. Esta elevada erodibilidade é explicada pela elevada razão silte/argila e razão de argila (Figura 4a) e baixa agregação dos saprolitos (PARZANESE, 1991; BACELLAR, 2000; SILVA, 2000; MORAIS, 2003). O solum, por outro lado, se caracteriza por baixa razão silte/argila e por expressiva agregação. De fato, muito embora a proporção de argila seja elevada, nestes solos as partículas estão fortemente agregadas por óxidos e hidróxidos de ferro, comportamento conhecido de solos tropicais de comportamento laterítico (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Como consequência, em ensaios de determinação granulométrica sem emprego de defloculante ou em ensaios de estabilidade de agregados, o solum apresenta textura predominantemente arenosa (Figura 4b). Por este motivo, embora a proporção de fração argila em ensaios com defloculante de algumas amostras de solum supere 60%, a condutividade hidráulica é elevada, equivalente a de uma areia (BACELLAR, 2000; MORAIS, 2007).

Um dos processos mais frequentemente citados como de relevância para o desenvolvimento de voçorocas em áreas do embasamento é a erosão interna pelas águas subsuperficiais (AUGUSTIN; ARANHA, 2006). Um dos testes mais empregados para avaliação de erosão interna concentrada em dutos (*piping* ou *concentrate leaks*, FELL et al., 2018) de solos dispersíveis é o *pinhola test* (SHERARD et al., 1976), no qual uma amostra cilíndrica de solo indeformado e com um pequeno orifício no centro é submetida a gradientes hidráulicos crescentes (Figuras 4c, d). Morais (2003) concluiu com estes testes que os saprolitos da região são potencialmente suscetíveis a este mecanismo de erosão e que esta suscetibilidade se eleva conforme a razão silte-argila. Este autor repetiu estes ensaios sem o orifício central para avaliar a suscetibilidade ao mecanismo de erosão interna por carreamento (*suffosion erosion*, FELL et al., 2018), sem descontinuidade prévia. Mesmo com gradientes hidráulicos muito elevados, Morais (2003) demonstrou que estes saprolitos não são erodíveis a este processo de erosão. Isto ocorre provavelmente devido a sua textura contínua, sem gaps, condição essencial para desenvolvimento do carreamento (FELL et al., 2018).



**Figura 4.** Exemplos de resultados que ilustram a erodibilidade de solos do Complexo Bação: (a) Gráfico de relação de erosão pela razão silte argila separando saprolitos erodíveis (em vermelho) de solum pouco erodível (em azul) (Bacellar, 2000); (b) Envoltória de curvas granulométricas de vinte amostras de solum do Complexo Bação, feitas sem emprego de agente defloculante (vermelho) e com defloculante (cinza) (BACELLAR, 2000); (c) Aparato para execução do ensaio de erodibilidade do furo de agulha (*pinhole test*) (MORAIS, 2003); (d) Resultados de ensaios *pinhole*, com representação da variação das vazão pela diferença de carga hidráulica aplicada para duas amostras indeformadas de saprolitos, a amostra 1 e 10, com razões silte-argila baixa e alta, respectivamente (MORAIS, 2003).

É importante destacar que os dois tipos pedológicos mais frequentes na região (Latosolos e Cambissolos) se desenvolvam nos taludes, seja nas áreas de elúvios e colúvios, e variações na erodibilidade entre estes tipos sejam possíveis, a erodibilidade dos saprolitos aos processos de erosão superficial e subsuperficial é tão maior, que as variações naqueles se tornam pouco significativas. Talvez em consequência disto, ainda não se tenha conseguido relacionar a diferenciação pedológica com a intensidade de desenvolvimento de voçorocas na região (PARZANESE, 1991; BACELLAR, 2000; SANTOS; SOBREIRA, 2008).

Se a distribuição espacial variável das voçorocas não pode ser explicada pela diversidade litológica do Complexo Bação, o mesmo não pode ser dito quanto ao possível controle estrutural. Isto porque em diversos trechos do complexo notam-se elevadas concentrações destas feições limitadas por longos lineamentos, de extensão quilométrica. Levantamentos estruturais de campo comprovam que a orientação predominante destes lineamentos, NW e ENE, se repete na concentração de fraturas em escala de afloramento (BACELLAR, 2000; CAMPOS, 2006). Tais lineamentos representam extensas falhas geológicas desenvolvidas em eventos tectônicos pretéritos e muitas vezes reativadas, que regulam um arcabouço geral de blocos elevados e abatidos, também identificados em levantamentos geofísicos magnetométricos (CAMPOS, 2006; BRITO, 2018). Os blocos abatidos se separam dos elevados por *knickpoints* alinhados, como o de direção ENE no sudeste do Complexo, na porção média da bacia do Rio Maracujá (Figura 5a). De fato, os *knickpoints* dificultam a incisão fluvial a montante, resultando num domínio geomorfológico (domínio 1) com relevo com menor amplitude topográfica (Figura 5b), maior retenção de sedimentos aluvionares e coluvionares no tempo geológico e a consequente preservação de espessos perfis de intemperismo, especialmente de saprolitos, e na formação de solos mais desenvolvidos (Latosolos). Esta configuração é marcante não somente na parte sudeste do Complexo Bação, onde a montante dos *knickpoints* o relevo é mais suave, como também na bacia do Ribeirão Carioca (Figura 3b). A jusante dos *knickpoints*, o relevo tende a ser mais ondulado (Figura 5b), com amplitudes e declives superiores aos do domínio geomorfológico 1, o que pode ser reflexo de seu maior grau de dissecação no tempo geológico. Como será discutido no próximo item, ao delimitar uma ruptura significativa nas condições pedogeomorfológicas, com os consequentes reflexos no regime hidrológico, os *knickpoints* de origem estrutural controlam a distribuição, intensidade e tipologia das feições erosivas (ravinas e voçorocas). A concentração de voçorocas à montante de *knickpoints* já foi também relatada em outras regiões com rochas do embasamento cristalino (MOREIRA, 1992).

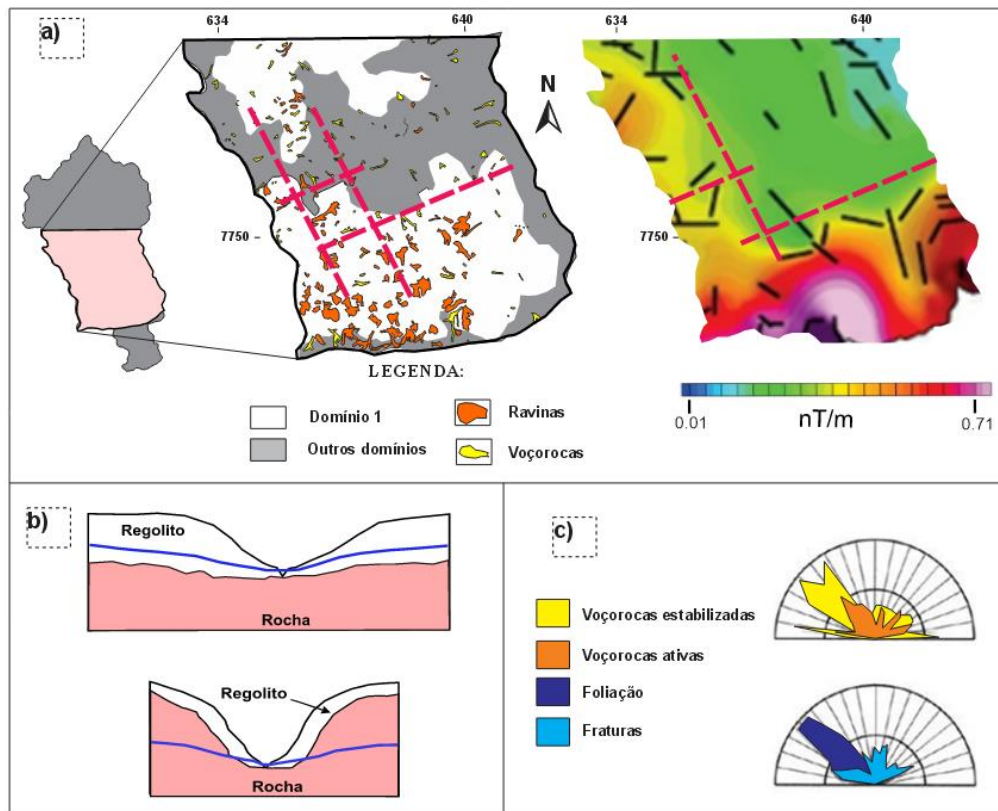
A relevância do controle estrutural também se manifesta na escala de detalhe. Levantamentos estruturais de campo (Figura 5c) também indicam boa correspondência entre as direções das foliações e de fraturas identificadas nos saprolitos e rochas do embasamento e o de ramificações de desenvolvimento remontante de voçorocas (BACELLAR, 2000; CARDOSO et al., 2022). Isto ocorre porque tais estruturas representam ou direções de menor erodibilidade ou mais favoráveis à condução de água.

Se na escala regional o condicionante estrutural é relevante, na escala local as formas das encostas se manifestam como outro condicionante importante. De fato, entre as mais de 200 voçorocas mapeadas na bacia do Rio Maracujá, 64% (Bacellar, 2000) se desenvolvem em encostas com formas anfeátricas, côncavas em planta e perfil (*hollows*, HACK; GOODLET, 1960). Tais formas de relevo tendem a concentrar tanto os fluxos hídricos superficiais como subsuperficiais, favorecendo a gênese e desenvolvimento da erosão. Muitos destes *hollows* representam voçorocas estabilizadas ou paleovoçorocas de idade pleistocência superior ou holocênica (BACELLAR, 2000; BACELLAR; COELHO NETTO; LACERDA, 2005).

Em estudo de caracterização detalhada envolvendo aquisição de dados de sondagens e geofísicos (georadar e eletrorresistividade), Bacellar (2000) demonstrou que uma das voçorocas da Estação Holanda (figuras 2 e 6a) está evoluindo remontantemente acompanhando um paleocanal erosivo no saprolito, atualmente preenchido por colúvios (Figura 6b), em vez de se desenvolver no sentido do aclave topográfico, como esperado. Estes dados de campo indicam também que o paleocanal é margeado a norte por uma banda mais quartzosa do gnaíse, mais



resistente e menos suscetível ao intemperismo. Cabe ressaltar que este paleocanal não é perceptível na superfície devido ao reafeiçoamento superficial subsequente no tempo geológico. Ressalta-se, com este exemplo, a importância de uma boa investigação geológica de subsuperfície, sempre que haja riscos geológico-geotécnicos à associados à ocupação. Em suma, o desenvolvimento de voçorocas na região apresenta expressivo controle estutural, reflexo da tectônica de blocos abatidos em escala regional, e da formas de relevo e dos padrões estruturais em escala local.



**Figura 5.** a) Porção central da bacia do Rio Maracujá com lineamentos com conferidos pela união de knickpoints nos canais de drenagem (esquerda) e mapa aerogeofísico de magnetometria (direita) com os correspondentes lineamentos magnéticos indicando estruturação de blocos estruturais abatidos; b) Seção geológica típica em área do domínio geomorfológico 1 (acima), com colinas de baixa amplitude e de baixas declividade e dos demais domínios geomorfológicos (abaixo), caracterizados com relevo mais íngreme, com o nível d'água subterrâneo (azul) normalmente alojado na rocha fraturada; c) Diagramas de rosetas ilustrando correspondência de direções de voçorocas ativas e estabilizadas com as direções de foliação e de fraturas do saprolito e das rochas do embasamento.

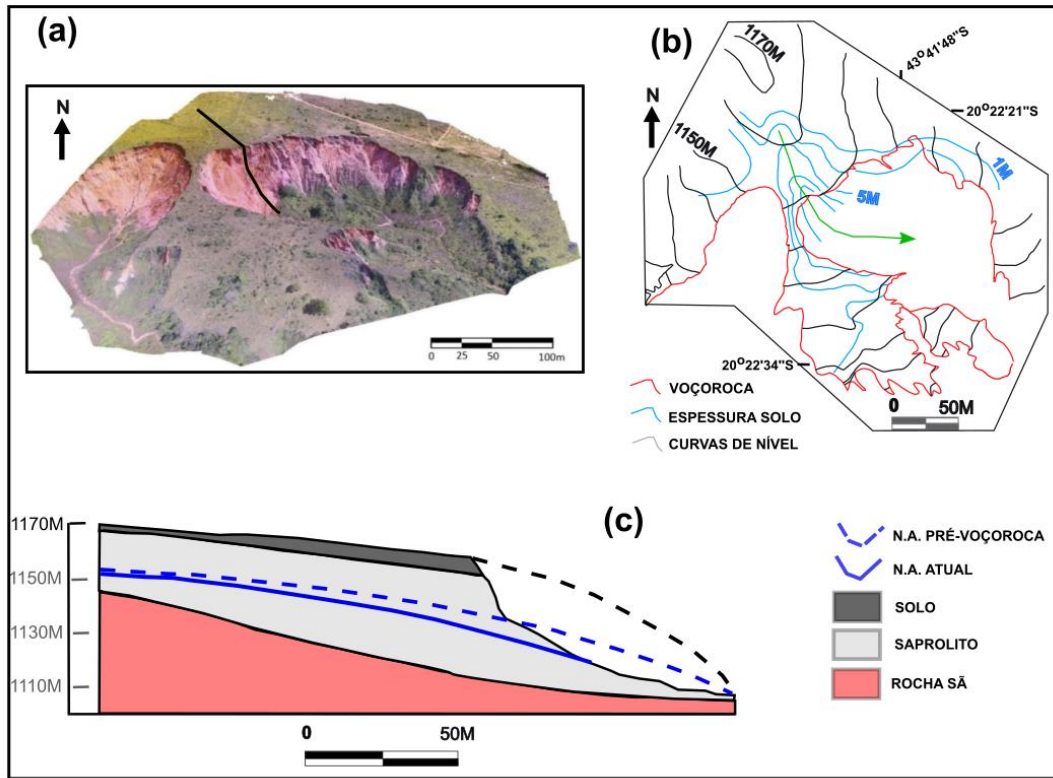
Alem destes fatores geológicos e pedogeomorfológicos, destaca-se também o fator antrópico na iniciação e desenvolvimento das voçorocas da região. Bacellar (2000) demonstrou que cerca de 70% das voçorocas e ravinas da bacia do Maracujá ocorrem em continuidade de valos, como eram denominadas as trincheiras empregadas desde o Brasil Colônia na região para separar propriedades. Na ausência de afloramentos de rochas foliadas para edificação de muros de pedra seca ou de argamassa ou cercas, os valos se constituíam na única opção. A água de enxurrada concentrada e com fluxos turbulentos ao longo destes valos, muitos escavados perpendicularmente às curvas de nível, apresenta erosividade suficiente para erodir o solum mais resistente (BACELLAR, 2000). A importância destas trincheiras para a iniciação de ravinas e voçorocas já foi descrita em outras regiões do Brasil (BACELLAR, 2000). Ainda hoje é possível identificar por todo o Complexo do Bação voçorocas que crescem remontantemente no sentido dos valos ainda remanescentes, como também nas vizinhanças de rodovias de terra com sistema de drenagem mal dimensionado. Ou seja, as formas erosivas em canais e ravinas se desenvolvem frequentemanete na continuidade destas trincheiras, que podem evoluir para voçorocas preferencialmente nas formas de relevo anfiteátricas no domínio geomorfológico 1.

### 3.2. Interações recíprocas entre voçorocas e os fluxos hídricos na região

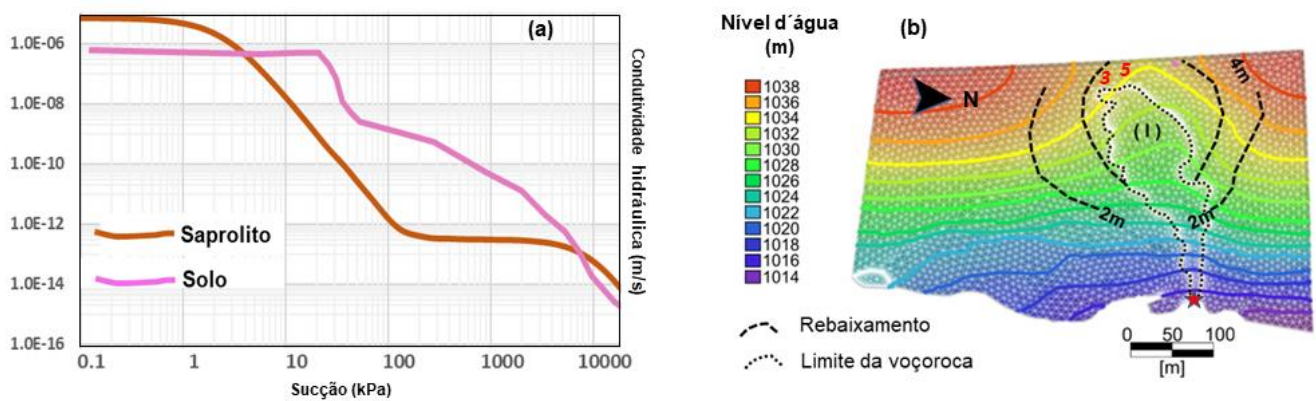
Os condicionantes geológicos e geomorfológicos das voçorocas da região se refletirão significativamente no regime hídrico: a jusante dos *knickpoints*, em grande parte dos taludes a superfície freática se aloja no embasamento cristalino fraturado (Figura 5b, imagem superior), constituindo aquíferos fissurais; a montante, a superfície freática se situa preferencialmente no regolito (Figura 5b, imagem inferior), especialmente na base do saprolito (BACELLAR, 2000). Esta diferenciação pedogeomorfológica justifica a diferença da concentração de voçorocas na região. A jusante dos *knickpoints*, o fluxo hídrico superficial é maior nos taludes mais íngremes, favorecendo o desenvolvimento de erosão laminar e de ravinas lineares ortogonais às curvas de nível, que se aprofundam até se estabilizarem quando o maciço rochoso não saturado é atingido. Por outro lado, a montante dos *knickpoints* a recarga dos aquíferos é favorecida nos taludes mais suaves e com topos, e a superfície freática na base dos saprolitos erodíveis comandam o desenvolvimento de voçorocas, que passam a ter formas progressivamente mais circulares devido aos fluxos subterrâneos centrípetos. Bacellar, Lacerda e Coelho Netto (2005) demonstraram a importância da recarga dos aquíferos no desenvolvimento de grandes voçorocas no sudeste do Complexo Bação, ao comprovar não somente o controle por *knickpoints*, mas também pela maior incidência destas no entorno de morrotes e colinas com topos aplainados, com declividades inferiores a 15%. Nestes, os solos tendem a ser mais antigos, como os Latossolos Vermelho-Amarelos, devido à menor taxa de erosão superficial no tempo geológico. As baixas taxas de erosão favorecem a infiltração da água e a lixiviação e, conseqüentemente, o desenvolvimento progressivo da condutividade hidráulica (Morais, 2007), como apresentado previamente. A maior proporção de voçorocas com as formas de relevo côncavas em planta e perfil (anfiteatros) também pode ser creditada ao maior afluxo de águas superficiais e subsuperficiais nestes setores do relevo (Hack e Goodlet, 1960), discutido acima.

Além de atuar como agente para o desenvolvimento das voçorocas, a dinâmica da água em subsuperfície também é afetada por estas feições, num processo geomorfológico clássico de interação recíproca. No seu desenvolvimento, as voçorocas eliminam grandes volumes de solo (figuras 6a,c) e passam a atuar como verdadeiros drenos, atraindo os fluxos subterrâneos e, conseqüentemente, rebaixando o aquífero freático no entorno. Devido a extensa área superficial que ocupam, de aproximadamente 20.000 m<sup>2</sup> em média no domínio geomorfológico 1 (Bacellar, 2000) e a grande profundidade alcançam, de até 50 m, as voçorocas podem rebaixar a superfície freática por uma extensão de algumas dezenas de metros no seu entorno, aumentando a espessura da zona não saturada no saprolito (Figura 6c).

Como o saprolito apresenta baixa condutividade hidráulica saturada (na ordem de  $K < 10^{-6}$  m/s, Bacellar, 2000; Hernandez, 2020), e condutividade não saturada, determinada com o método de Fredlund, Xing e Huang (1994), de até quatro ordens de magnitude menor (Figura 7a), a recarga no entorno destas voçorocas tende a ocorrer com um atraso e temporalmente mais distribuída que a situação original, pré voçoroca (WU, ZHANG e YANG, 1996). Simulações numéricas de fluxo subterrâneo pelo método dos elementos finitos na área da Estação de Monitoramento Mangue Seco, na bacia do Ribeirão Carioca (Figura 3), a sudoeste do Complexo Bação, apontaram para um rebaixamento do aquífero livre de mais de 2 metros numa faixa deprimida entre 50 a 100 metros de largura no entorno das cabeceiras da voçoroca denominada Mangue Seco (Figura 7b).



**Figura 6.** Voçorocas da Estação de Monitoramento Holanda: (a) Imagem levantada com drone das duas voçorocas. Notar que os taludes localizados nos segmentos inferiores das voçorocas estão sendo progressivamente ocupados por vegetação. A linha negra indica a seção geológica representada na figura 6c. (b) A voçoroca localizada a leste está evoluindo remontantemente na direção de um paleocanal (indicado pela seta verde) preenchido por solum (colúvio); (c) Seção geológica ilustrando a situação em 2020 e a possível conformação do talude e do nível d'água (linhas tracejadas, respectivamente previamente ao desenvolvimento da voçoroca.

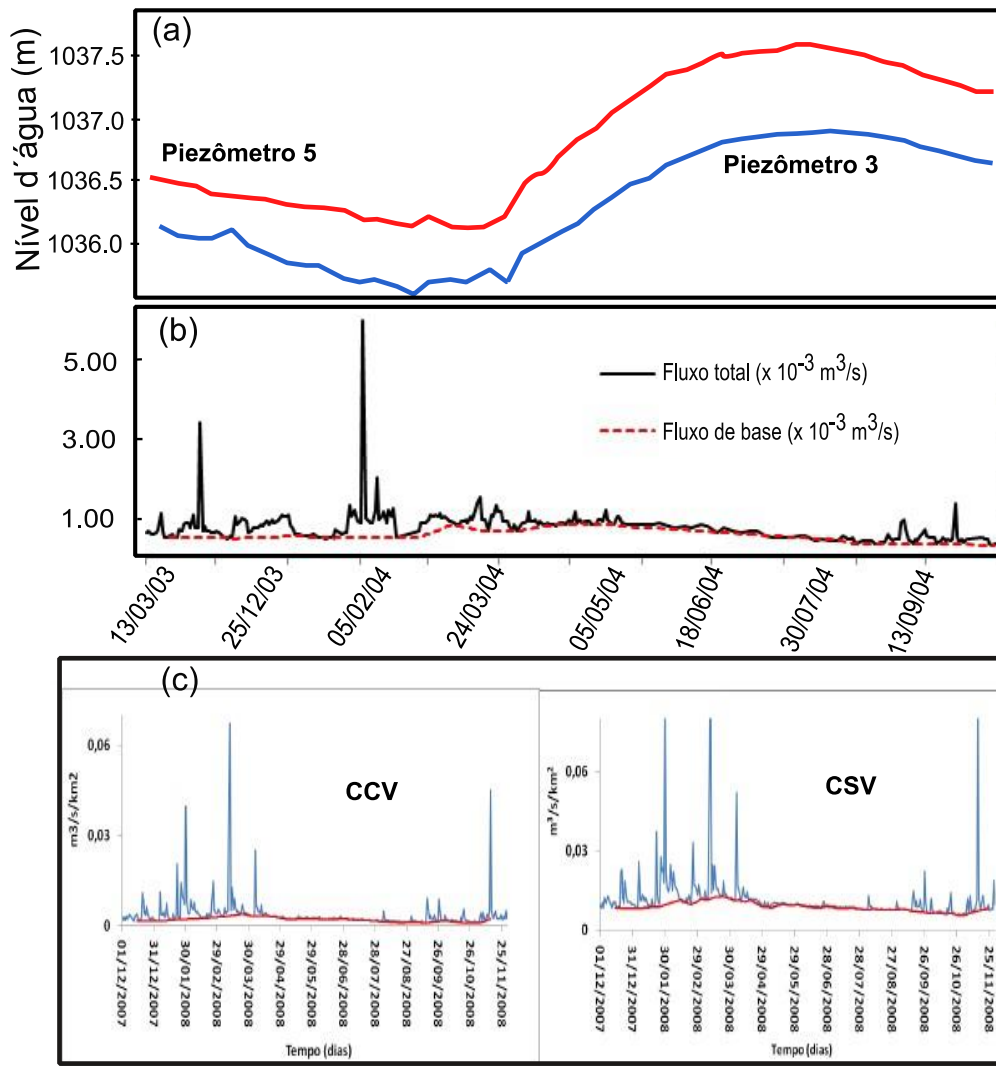


**Figura 7.** (a) Exemplo de curvas de condutividade hidráulica não saturada pela sucção para o saprolito e para o solum (horizonte pedológico B). Notar que a condutividade hidráulica do solo é quase uma ordem de magnitude maior e que a condutividade de ambos decresce de duas a quatro ordens de magnitude nas condições prevalentes de umidade do solo em campo, entre a capacidade de campo (10kPa) e o ponto de murcha permanente (1500 kPa). Fonte de dados: Hernandez (2020); (b) Resultados de simulação numérica por elementos finitos do nível d'água atual e do possível rebaixamento do aquífero provocado pela voçoroca Mangue Seco (I), na bacia do Ribeirão Carioca (localização na figura 3b). Os números 3 e 5 em itálico representam a posição dos piezômetros 3 e 5, respectivamente. A estrela representa a posição do vertedor, no exutório da bacia (coordenadas 20°20'44''S e 43°49'59''W). Fonte de dados: LIMA (2016).

Piezômetros instalados próximos ao divisor topográfico na faixa com o aquífero deprimido pela proximidade da voçoroca Mangue Seco (Figura 7b), indicaram um atraso significativo do tempo de recarga (DRUMOND, 2006; DRUMOND; BACELLAR, 2006). De fato, num trecho da faixa, onde o aquífero se encontra a cerca de 20 m de profundidade (de 1 a 3 m abaixo do nível médio modelado pré-voçoroca, Lima, 2016) ocorreu um atraso de cerca de 5 meses entre o auge da estação chuvosa (novembro a março) e o ápice da recarga, quando o nível piezométrico ficou mais elevado, entre maio a julho (Figura 8a). Simulações numéricas de fluxo não saturado feitas por Hernandez (2020) comprovaram que o tempo de recarga pode ser de fato significativamente aumentado no entorno de uma voçoroca com o desenvolvimento desta, ou seja, com seu aprofundamento e alargamento. Isto porque quanto mais profunda ou larga a voçoroca, mais extenso será o rebaixamento em sua periferia. Como será descrito a seguir, a elevação do tempo de recarga dos aquíferos provoca modificações significativas do regime hidrológico das voçorocas da região.

Com efeito, o monitoramento diário feito por Drumond (2006) das vazões no canal exutório (coordenadas 20°20'44''S e 43°49'59''W) da voçoroca Mangue Seco (Figuras 3b e 7b) por um ano hidrológico possibilitou a divisão de componentes de fluxo por separação de hidrogramas com o método *smoothed minima* (NATAHN; MACMAHON, 1990; COSTA, 2005). Esta separação possibilita avaliar as componentes da vazão do canal em fluxo de chuva, durante o período chuvoso, e do fluxo teoricamente proveniente do aquífero (fluxo de base). Com este procedimento, constatou-se um comportamento bimodal do volume do fluxo de base (Figura 8b): verificou-se um aumento do fluxo de chuva e um pequeno incremento - em relação à estação seca precedente - do fluxo de base durante o período da estação chuvosa; e uma segunda elevação do fluxo de base, agora mais expressivo, entre março e junho. Esta elevação extemporânea do fluxo de base na estação seca se deve a configuração dos taludes das voçorocas. Antes do surgimento da feição erosiva, o talude era contínuo e dotado de uma superfície freática mais concordante com a superfície topográfica (Figura 6c), como é o usual em regiões litologicamente homogêneas e de relevo suave. Com o desenvolvimento da voçoroca, com taludes caracteristicamente subverticais e de grande amplitude na região (Figura 6c), especialmente nas suas cabeceiras, o comportamento se torna muito diferencial. No interior da voçoroca, onde muitas vezes aflora a rocha sã, predomina o escoamento superficial rápido. No entorno da voçoroca, contudo, onde a superfície freática se encontra rebaixada, a percolação pela zona não saturada até a recarga do aquífero é mais lenta que na condição pré voçoroca. Isto resulta numa consequente exfiltração com atraso na base dos taludes das voçorocas (HERNANDEZ, 2020; HERNANDEZ; BACELLAR; ARAUJO JUNIOR, 2022).

Este comportamento é ressaltado quando se compara os hidrogramas do ano hidrológico 2007/2008 de bacias hidrográficas de 2ª e 3ª ordem hierárquica (*sensu* Strahler, 1957), de pequenas dimensões (< 0,6 km²), situadas na porção central da bacia do Maracujá, na estação de monitoramento Córrego Maracujá (Figura 2a). Tais bacias apresentam características geológicas e pedogeomorfológicas similares, mas graus distintos de voçorocamento (bacias CCV e CSV, Figura 8c). Na bacia hidrográfica desprovida de ravinas e voçorocas (CSV, com exutório nas coordenadas 7756949N - 635529E) o fluxo de base é maior e mais duradouro, enquanto na bacia com 12% de sua área ocupada por voçorocas (CCV, com exutório nas coordenadas 7756998N - 635563E), o fluxo de base é reduzido e a vazão praticamente se extingue em setembro, no auge da estação seca (Figura 6c). Comportamento similar já havia sido identificado por Costa e Bacellar (2007) em duas bacias hidrográficas de 2ª ordem hierárquica na porção superior da bacia do rio Maracujá, em área com rochas supracrustais (Estação Piracicaba, Figura 2a).



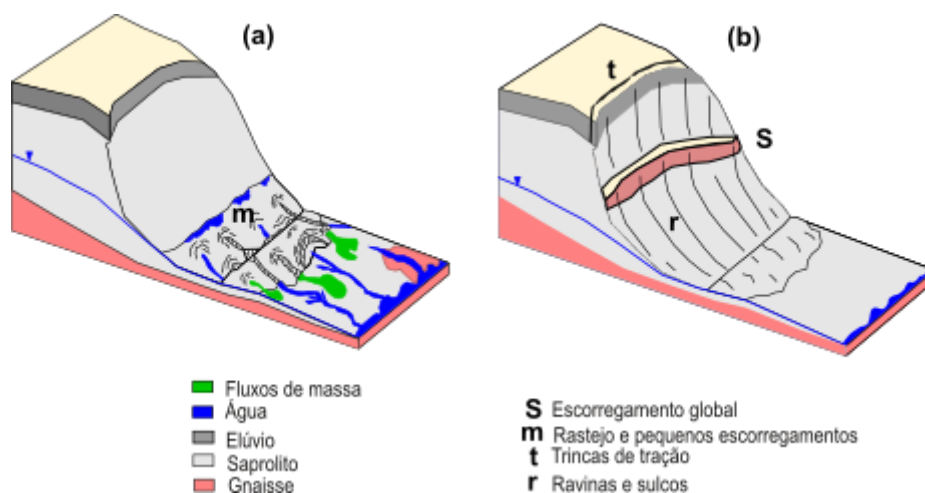
**Figura 8.** (a) Variação do nível d'água em dois piezômetros localizados nas cabeceiras da voçoroca Mangue Seco (para localização, ver figura 7b). Fonte de dados: DRUMOND (2006) (b); Hidrograma com separação do fluxo de base (linha tracejada vermelha) do fluxo total (linha preta) no exutório da voçoroca Mangue Seco. Fonte de dados: DRUMOND (2006); (c) Hidrogramas em termos de vazão específica de duas bacias hidrográficas, uma com voçoroca (CCV) e outra sem voçorocas (CSV). A linha vermelha representa a vazão do fluxo de base determinada com o método *smoothed minima*. Fonte de dados: FREITAS (2012).

Na região do Complexo Bação há mais de 200 voçorocas (COSTA; SOBREIRA, 2001) de grandes dimensões, em média com cerca de 240m de comprimento, 95 m de largura e 30 m de profundidade Bacellar (2000). O impacto do regime hidrológico modificado localmente por uma voçoroca pode ser significativo em escala regional, dada a elevada concentração destas feições no complexo. Considerando-se que as voçorocas ocupam uma área superficial de 3% e 4% dos 385 km<sup>2</sup> deste Complexo (BACELLAR, 2000), Lima e Bacellar (2017) estimaram uma redução do fluxo de base nesta região entre 3,4 e 4,6 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano. Ou seja, o conjunto de voçorocas têm potencial de reduzir as vazões do sistema de canais de drenagem regional na estação seca e, conseqüentemente, de elevar substancialmente na estação chuvosa, incrementando a incidência de enchentes e do transporte de sedimentos. Esta questão é grave, pois a disponibilidade hídrica da região já é naturalmente baixa (FERNANDES, 1990; BEATO; MONSORES; BERTACHINI, 2005; FERREIRA; BACELLAR, 2010; BRITO et al., 2019) e a redução das vazões no período seco interfere nas atividades agrícolas, como na irrigação e na dessedentação animal. Além disto, a variação do regime hídrico acelera os próprios processos erosivos, por retroalimentação, o assoreamento de várzeas e de reservatórios, impactando a fauna e flora.

O regime hidrológico alterado modifica os processos de desenvolvimento das voçorocas da região (Figura 9a,b). O incremento do escoamento superficial na estação chuvosa eleva a erosão laminar, em sulcos e ravinas,

tanto nos taludes como no fundo da voçoroca. O solapamento das bases dos taludes e a elevação das pressões hídras laterais em trincas de tração nos topos preenchidas com água desencadeiam escorregamentos rotacionais de amplitudes decamétricas, envolvendo todo regolito (Figura 9b). O solum, menos erodível, pode se instabilizar por queda livre devido ao descalçamento do saprolito subjacente erodido pelo efeito cachoeira. No avançar da estação seca, esperava-se uma progressiva estabilização temporária destes taludes, mas não é isto que muitas vezes se verifica em campo. Devido à recarga atrasada do aquífero, a zona de exfiltração de água (*seepage face*) nos taludes tende a se elevar progressivamente, com vazões também crescentes, proporcionando o desenvolvimento de outros processos de erosão nesta estação (Figura 9a), tais como: erosão interna; rastejos superficiais de saprolito saturado, que podem se transformar em fluxos liquefeitos ou escorregamentos rotacionais de amplitude decimétrica a métrica e o desenvolvimento de sulcos e ravinas (DRUMOND, 2006; HERNANDEZ; BACELLAR; ARAUJO JUNIOR, 2022). O desenvolvimento destes processos ao longo da estação seca descalça progressivamente os taludes e mobiliza grandes volumes de solo, grande parte dos quais permanece retido no interior das voçorocas, pois a energia da água superficial neste período não tem capacidade para transportá-los. Contudo, nas primeiras chuvas intensas da estação úmida grandes volumes do solo mobilizado no interior das voçorocas são então transportados (DRUMOND, 2006).

As voçorocas da região progridem remontantemente até que a ação conjugada das águas superficiais e subsuperficiais não tenham mais capacidade para erodir o solo ou auxiliar no desenvolvimento de movimentos de massa. Isto tende a ocorrer a medida que a área de captação a montante diminui ou quando encontra em seu avanço uma barreira litológica, como, por exemplo, um dique de rocha básica ou pegmatítico, ou uma banda mais quartzosa de gnaíse, como descrito na Estação Holanda (BACELLAR, 2000). É importante destacar que os processos de erosão e de movimentos de massa nos taludes em processo de estabilização persistem mas com menor intensidade, reafirmando e suavizando o talude outrora instável, agora progressivamente ocupado pela vegetação, que se constitui num indicador de estabilização (Figura 6a). O início da sucessão vegetal ocorre com a ocupação dos taludes por samambaias do gênero *Gleichenia*, adaptáveis a terrenos íngremes e com solos com deficit hídrico e de má fertilidade (FARIAS, 1992). A atuação de processos erosivos e o nível d'água ainda muito raso no sopé dos taludes recém instabilizados dificulta a instalação de vegetação de maior porte, por serem as espécies endêmicas intolerantes à condição de solo saturado (FARIAS, 1992). De fato, esta vegetação protetora somente se instala na área mais crítica, que é a base dos taludes, quando a superfície freática se encontra a maiores profundidades (FARIAS, 1992).



**Figura 9.** (a) Na estação seca, vários mecanismos atuam em resposta do nível d'água elevado em consequência da recarga atrasada do aquífero na base do saprolito: erosão por interna (*piping*), sulcos e ravinas; rastejos (*creep*) e escorregamentos rotacionais de pequeno porte; fluxos de massa em solo liquefeito. (b) Na estação úmida predominam os escorregamentos envolvendo todo o talude, induzidos pelo descalçamento basal durante a estação seca precedente, e também por pressões laterais de água em trincas de tração e erosão em sulcos e ravinas. Figuras modificadas de Hernandez, Bacellar e Araújo Júnior (2022).

#### 4. Considerações Finais

As voçorocas constituem uma forma de erosão em canais com potencial de causar severos danos econômicos e socioambientais. Na região do Complexo Bação, as voçorocas se desenvolvem preferencialmente em áreas com determinadas características geomorfológicas, que são em parte reflexo das condições tectônicas locais. De fato, as voçorocas tendem a se concentrar em domínio geomorfológico de relevo de menor amplitude e com taludes menos íngremes (domínio 1), situado à montante de *knickpoints* com controle estrutural. Estes condicionantes propiciam o desenvolvimento de espessos perfis de intemperismo e condições ótimas de recarga do aquífero, facilitando o desenvolvimento de muitas voçorocas de grande porte. Em escala local, as voçorocas da região muitas vezes se iniciam por influência antrópica, como os valos de divisa, e são também condicionadas por formas de relevo anfiatélicas, que muitas vezes representam paleovoçorocas, e por orientações de fraturas e foliação

Se por um lado, a água se constitui em agente da propagação das voçorocas, por outro ela é afetada por estas. De fato, a incisão das voçorocas da região finda quando o maciço rochoso pouco permeável subjacente ao saprolito erodível é atingido. No fundo das voçorocas o escoamento superficial, conseqüentemente, é muito elevado. Por outro lado, as voçorocas atuam como drenos, atraindo as linhas de fluxo e rebaixando o aquífero no seu entorno. Conseqüentemente, a espessura da zona não saturada, onde os fluxos são significativamente mais lentos, atrasa a recarga do aquífero, assim como a exfiltração da água na base dos taludes instáveis das voçorocas. Tal comportamento afeta a dinâmica de evolução dos taludes das voçorocas, que se instabilizam na estação chuvosa e também na estação seca, quando a superfície freática se eleva.

O regime hídrico local afetado pelas voçorocas se reflete em escala regional, com aumento das vazões e do transporte de sedimentos no período de chuvas e a redução do fluxo de base nos meses de estiagem. Além dos impactos diretos na região, conhecida pela baixa disponibilidade hídrica, a mudança no regime hídrico proporciona danos socioeconômicos e ambientais, como assoreamento de terras cultiváveis e de reservatórios, e variados e ainda em grande parte não dimensionados, impactos na flora e fauna.

Em suma, as voçorocas da região se desenvolvem por fluxos concentrados de água superficial e subsuperficial condicionados pelo relevo tectonicamente controlado e por outro lado influenciam no regime hidrológico local e regional, num típico caso de interação recíproca.

**Contribuições dos Autores:** Este trabalho foi integralmente desenvolvido pelo autor.

**Financiamento:** Esta pesquisa tem sido desenvolvida nos últimos anos com diversas modalidades de apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

**Agradecimentos:** O autor agradece aos professores Willy Alvarenga Lacerda, Ana Luiz Coelho Netto e Frederico Garcia Sobreira e aos muitos que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho, como: Fernando Morais, Fernanda Martinelli Costa, Flávio Nasser Drumond, Maria Inês B. Campos, Quênia, C. G. Ferreira, Suzy M. A. C. Freitas, Peterson G. D. Lima, Yesser M. R. Hernandez e Thais P. Brito.

**Conflito de Interesse:** O autor declara não haver conflito de interesse.

#### Referências

1. ALKMIN F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, 90, p. 29–58. 1998.
2. AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em Área De Voçorocamento, Noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 7(1): 09-18, 2006.
3. BACELLAR, L. A. P. **Condicionantes Geológicos, Geomorfológicos e Geotécnicos dos Mecanismos de Voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG**. Tese (Doutorado em Geotecnia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2000. 240p.
4. BACELLAR L. A.P.; COELHO NETTO, A.L.; LACERDA, W. A. Controlling factors of gullying in the Maracujá Catchment, southeastern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms** v. 30, n. 11:1369–1385, 2005. DOI: 10.1002/esp.1193
5. BARROS, L.; RAPOSO, A.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. Condicionantes Antrópicos na Dinâmica Erosivo-Deposicional da Bacia do Rio Maracujá – Quadrilátero Ferrífero/MG. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Viçosa 2009.

6. BEATO, D. A. C.; MONSORES, A. L. M.; E BERTACHINI, A. C; Hidrogeologia. In: CPRM/SEMAD/CEMIG, ed. Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte, Brazil. 8-A, 101. 2005
7. BOUYOCOS, G. J. The Clay Ratio as a Criterion of Susceptibility of Soils to Erosion. *Agronomy Journal*, v. 27, p. 738-741, 1935. DOI: 10.2134/agronj1935.00021962002700090007x
8. BRITO, T. P. **Avaliação do potencial hídrico de aquíferos fissurais dos complexos Bação e Bonfim Setentrional, Quadrilátero Ferrífero - MG.** Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018 115 p.
9. BRITO, T. P.; BACELLAR, L. A. P.; BARBOSA, M. S.; BARELLA, C. F. Assessment of the groundwater favorability of fractured aquifers from the southeastern Brazil crystalline basement. *Hydrol Sci Journ*, v.65, n. 3 : 442-454. 2019. DOI: 10.1080/02626667.2019.1703993
10. CAMPOS, M. I. B. **Caracterização da deformação frágil e sua relação com os processos de voçorocamento na porção sudeste do Complexo Metamórfico Bação – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado em Geociências) PPG em ECRN, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. 187p.
11. CARDOSO, L. H., BACELLAR, L. DE A. P., MARTINS, A.L. S., & BRAGIONI, D.O. Análise geofísica regional do controle litoestrutural em voçorocas da porção centro-sul do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(2), 1357–1378, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i2.2056.
12. CARVALHO, T. R. R. **Suscetibilidade a processos geodinâmicos e aptidão à urbanização na bacia do rio Maracujá, Ouro Preto, MG.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. 117p.
13. CHEN, X. E MUKESH K. Impact of gullying on hillslope hydrology at the Calhoun Critical Zone Observatory. *American Geophysical Union 2016 Fall Meeting, San Francisco, CA.* 2016.
14. CHEN, X.; KUMAR, M.; RICHTER, D. DEB.; MAU, Y. Impact of gully incision on hillslope hydrology. *Hydrological Processes*. v. 34: 3848–3866. 2020. DOI: 10.1002/hyp.13845
15. CORENBLIT, D.; TABACCHI, E.; STEIGER, J.; GURNELL, A. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*. 84. 56-86. 2007. DOI: 10.1016/j.earscirev.2007.05.004.
16. COSTA, F.M. **Análise por Métodos Hidrológicos e Hidroquímicos de fatores Condicionantes do Potencial Hídrico de Bacias Hidrográficas - Estudo de Casos no Quadrilátero Ferrífero (MG).** Dissertação (Geociências). PPG em ECRN, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005. 129p.
17. COSTA F.M.; BACELLAR L. A. P. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. *Catena* v. 69(3), p.230–238., 2007. DOI: 10.1016/j.catena.2006.05.007
18. COSTA, F. M.; SOBREIRA, F. G. Estudo preliminar das voçorocas da bacia do rio Carioca, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: VII Simpósio Nacional de Controle de erosão. 3-6. May 2001., *Anais...* Goiás. Goiania: Labogef. 1–7.
19. DOOR, J. V. N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil. *Professional paper* V. 641-A, 110 p. United States: Department of the Interior, 1969.
20. DRUMOND, F. N. **Caracterização e quantificação dos processos erosivos atuantes na evolução de uma voçoroca na bacia do riacho Manoel Felix no complexo metamórfico do Bação, Quadrilátero Ferrífero - MG.** Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2006. 99p.
21. DRUMOND, F. N.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização Hidrossedimentológica e dos Processos Evolutivos de Voçoroca em Área de Rochas Gnáissicas do Alto Rio das Velhas (MG). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 7(2), p. 87–96, 2006. DOI: 10.20502/rbg.v7i2.81
22. ENDO, I.; MACHADO, R.; GALBIATTI, H. F.; ROSSI, D.Q.; ZAPPAROLI, A.C.; DELGADO, C. E.R.; CASTRO, P.T.A.; OLIVEIRA, M. M. F. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: **Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.** CASTRO, P. T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A.L. (eds). Universidade Federal de Ouro Preto. Editora Belo Horizonte, 2020. p. 70-113.
23. FARIAS, C. A. **Dinâmica da revegetação natural de voçorocas na região de Cachoeira do Campo - MG.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1992. 63 p.
24. FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd Edition. CRC Press. 2018
25. FERNANDES, F. **Estudos preliminares da potencialidade dos aquíferos confinados na região cristalina do Complexo Bação para uso público nos distritos de Amarantina – Santo Antônio do Leite – Glaura, no município de Ouro Preto – MG.** Trabalho de graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 1990. 60p.



26. FERREIRA, Q. C. G.; BACELLAR, L. A. P. Avaliação Preliminar das Condições Hidrogeológicas na Área do Município de Ouro Preto, MG. **GEONOMOS**, v. 18, n. 1, p.13-21. 2010. DOI: 10.18285/geonomos.v18i1.63
27. FIGUEIREDO, M. A.; VARAJÃO, A. F. D. C.; FABRIS, J. D.; LOUTFI, I. S.; CARVALHO, A. P. Alteração superficial e pedogeomorfologia no sul do Complexo Bação – Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 713-729, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000400012
28. FITZJOHN, C., TERNAN, J.L., WILLIAMS, A.G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. **CATENA**, v. 32(1), p. 55-70, 1998. DOI: [10.1016/S0341-8162\(97\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00045-3).
29. FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31(4), p. 533–546, 1994. DOI: 10.0.4.115/t94-062
30. FREITAS, S. M. A. C. de. **Aplicação e técnicas de quantificação da infiltração e da recarga de aquíferos do alto Rio das Velhas (MG)**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
31. FREITAS, S. M. A. C.; Bacellar, L. A. P. Avaliação da Recarga de Aquíferos em Microbacias do Alto Rio das Velhas, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 31-38, 2013.
32. FUTAI, M. M. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçorocamento**. Tese (Doutorado em Geotecnia). PPG em Geotecnia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2002. 398p.
33. FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S. An experimental investigation of the mechanical behavior of an unsaturated gneiss residual soil. **Geotechnique** 55(3): p. 201–213. 2005. DOI : 10.0.6.144/geot.2005.55.3.201
34. GAO, X.; ZHAO, X.; WU, P.; BROCCA, L.; ZHANG, B. Effects of large gullies on catchment-scale soil moisture spatial behaviours: A case study on the Loess Plateau of China. **Geoderma**, 261, 1-10. 2016. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.07.001
35. GOMES, C. J. S. Estudos estruturais e texturais no Complexo de Bação e nos metassedimentos adjacentes, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In Congresso Brasileiro de Geologia, **Anais...** 3:1232–1245. 1986.
36. HACK, J.T., GOODLET, J.C. Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the Central Appalachians. **Geol. Surv. Prof. Paper**, 347, 1960. DOI: 10.3133/pp347
37. HERNANDEZ, Y. M. R. **Influência da Sazonalidade Climática na Estabilidade de Taludes em Voçorocas no Complexo Metamórfico do Bação**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) PPG em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2020. 117p.
38. HERNANDEZ, Y. M. R. ; BACELLAR, L. A. P.; ARAÚJO JÚNIOR, J.A. Groundwater-induced seasonal slumps in gullies of the Bação Complex, Southeastern Brazil 2022. **Natural Hazard**, v. 114 (1-2), 2022. DOI: 10.1007/s11069-022-05505-6
39. IWASA, O.Y., PRANDINI, F.L. Prevenção e correção de fenômenos erosivos: as voçorocas, exemplo da necessidade de diagnose, **Geologia Ciência – Técnica**, CEPEGE, USP, n. 7, p. 1543-1548. 1982
40. JOHNSON, R.F. Geology and ore deposits of the Cachoeira do Campo, Dom Bosco, and Ouro Branco quadrangles, Minas Gerais, Brazil. **USGS Professional Paper**, 341, 1962. DOI: 10.3133/pp341B.
41. KHALIL, A.E.; RACLOT, D.; HABAEIB, H.; LAMACH, J.M. Factors and processes of permanent gully evolution in a Mediterranean marly environment (Cape Bon, Tunisia), **Hydrological Sciences Journal**, 58:7, 1519-1531, 2013. DOI: 10.1080/02626667.2013.824086
42. KIRKBY, M. J. AND BRACKEN, L. J. Gully processes and gully dynamics. **Earth Surf. Process Landforms**, 34, p. 1841–1851. 2009. DOI:10.1002/esp.1866
43. 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, p. 597–624, 2023. DOI: 10.1007/s11069-023-05874-6.
44. LAL, R. **Soil erosion in the tropics**. McGraw Hill. New York. 1990, 580p.
45. LANA C, ALKIMIM FF, ARMSTRONG R.; CIPRIANO, R. A. S.; ROMANO, R. C. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 231, p.157–173. 2013. DOI: 10.1016/j.precamres.2013.03.008.
46. LANA, J. C.; CASTRO, P. T.A.; LANA, C. Assessing gully erosion susceptibility and its conditioning factors in southeastern Brazil using machine learning algorithms and bivariate statistical methods: A regional approach. **Geomorphology**, v. 402. 2022. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108159.
47. LIMA, P. G. D. **Mecanismos de evolução de voçorocas e quantificação dos impactos associados por modelagem matemática: estudo de caso da voçoroca Mangue Seco, São Gonçalo do Bação (MG)**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) PPG em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016. 130p.
48. LIMA P. G. D., BACELLAR, L. A. P. , DRUMOND, F. N. Quantification by numerical simulation of the impact of gullies on the water budget of a basement area, southeastern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63(12), p. 1804–1816, 2018. DOI: 10.1080/02626667.2018.1539231

49. MORAIS F. **Estudo dos processos erosivos subsuperficiais na bacia do rio Maracujá-MG**. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2003. 98p.
50. MORAIS, F. **Estudo dos fatores pedogeomorfológicos intervenientes na infiltração em zonas de recarga no complexo metamórfico Bação, MG**. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. 132 f.
51. MORAIS F.; BACELLAR L. A. P.; SOBREIRA F. G. Análise da erodibilidade de saprólitos de gnaiss. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.1055-1062, 2004. DOI: [10.1590/S0100-06832004000600014](https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600014)
52. MOREIRA, V.R.M. **Fatores condicionantes das voçorocas na sub-bacia do rio Santo Antônio, Bacia do Rio Grande, MG**. Dissertação de Mestrado, IGC -Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1992.
53. NATHAN R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, v. 26, p. 1465-1473. 1990. DOI: [10.1029/WR026i007p01465](https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465)
54. NETTO, M.M.; SOBREIRA, F.G. Os processos erosivos lineares da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Carioca, Itabirito/MG e seus condicionantes principais: observações preliminares. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, 2006.
55. NOCE, C.M.; MACHADO, N.; TEIXEIRA, W. U-Pb Geochronology of Gneisses and Granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (Southern São Francisco Craton): Age Constraints for Archean And Paleoproterozoic Magmatism and Metamorphism. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28(1), p. 95–102, 1998.
56. NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor, São Paulo, SP. 1995. 213 p.
57. ORGIAZZI, A.; PANAGOS, P. Soil biodiversity and soil erosion: It is time to get married. **Global Ecology and Biogeography**, 2018. DOI: [10.1111/geb.12782](https://doi.org/10.1111/geb.12782)
58. PARZANESE G. **Gênese e desenvolvimento das voçorocas em solos originados de rochas granitóides da região de Cachoeira do Campo, Minas Gerais**. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1991. 117p.
59. POESEN, J. Challenges in gully erosion research. **Landform Analysis**, v. 17, p. 5–9. 2011
60. POESEN J., NACHTERGAELE J., VERSTRAETEN G., VALENTIN C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**. 50 (2-4). 2003. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
61. SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2009. 101p.
62. SANTOS, C. A. D., SOBREIRA F. G., COELHO NETO A. L. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto - MG. REM: **Revista Escola de Minas**, v. 55(4), p. 285–290, 2002.
63. SANTOS, C. A. D. **Diagnóstico e análise geoambiental das bacias hidrográficas do ribeirão Carioca e dos córregos do Bação e Carioca, afluentes do Rio Itabirito (MG), como subsídio ao zoneamento ambiental**. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.
64. SANTOS, C.A.; SOBREIRA, F.G. Análise da Fragilidade e Vulnerabilidade Natural dos Terrenos aos Processos Erosivos como Base para o Ordenamento Territorial: o Caso das Bacias do Córrego Carioca, Córrego do Bação e Ribeirão Carioca na Região do Alto Rio das Velhas-MG, **Revista Brasileira de Geomorfologia**: v. 9 n. 1, 2008.
65. SHERARD, J.; DUNNINGAN, L.; DECKER, R.; STEELE, E. Pinhole test for identifying dispersive soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division** 11846, p. 69-85 1976.
66. SILVA. T. R. M. **Caracterização e erodibilidade dos solos de uma voçoroca na região de Ouro Preto, Minas Gerais** **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2000.
67. SOBREIRA, F. G. Processos erosivos acelerados (voçorocas): O exemplo de Cachoeira Campo, Ouro Preto, MG. **Solos & Rochas**: 254: p. 217-233, 2000.
68. STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Geophysical Union Trans.**, v.38, p.912-920, 1957.
69. UFV, CETEC, UFLA, FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. 2010. 1:650.000.
70. VALENTIN C.; POESEN J., LI Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, 63 (2-3 Special Iss.), p. 132-153. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>.
71. WANTZEN, K. Physical pollution: effects of gully erosion on benthic invertebrates in a tropical clear-water stream. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**. 16: 733-749. 2006. <https://doi.org/10.1002/aqc.813>
72. WELLS N.A.; ANDRIAMIHAJA B. The initiation and growth of gullies in Madagascar: are humans to blame? **Geomorphology** v. 8: p. 1–46. 1993.
73. WU, J.; ZHANG, R.; YANG, J. Analysis of rainfall-recharge relationships. **Journal of Hydrology**, 177:1–2. 1996. DOI: [10.1016/0022-1694\(95\)02935-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02935-4)
74. XU, J. Benggang erosion: the influencing factors, **Catena**, v.27, p. 249–263. 1996. DOI: [10.1016/0341-8162\(96\)00014-8](https://doi.org/10.1016/0341-8162(96)00014-8)



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.