

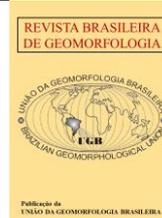


<https://rbgeomorfologia.org.br/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, nº ESPECIAL (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2368>



*Artigo de Pesquisa*

# Análise multiescalar aplicada à avaliação de erosão hídrica linear para área tropical subúmida situada na região Sudoeste do estado de Goiás - Brasil

*Multi-scale analysis applied to the evaluation of linear water erosion in a subhumid tropical area located in the Southwest region of the state of Goiás - Brazil*

Elizon Dias Nunes <sup>1</sup>, Selma Simões de Castro <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais, Goiânia, Brasil. [elizonnunes@ufg.br](mailto:elizonnunes@ufg.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5430-4841>

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, Brasil. [scastro@unicamp.br](mailto:scastro@unicamp.br).

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

Recebido: 07/03/2023; Aceito: 26/09/2023; Publicado: 24/10/2023

**Resumo:** A erosão hídrica linear envolve desagregação e transporte de materiais provenientes dos solos e resulta da energia do escoamento superficial, sendo que seu estudo pode envolver distintas variáveis e metodologias em diversas escalas. Este artigo apresenta uma proposta metodológica em etapas, destinada à análise em três sucessivas formas de abordagem envolvendo: relações entre compartimentos morfopedológicos e padrões de densidade e área de contribuição erosiva; a configuração morfométrica, morfográfica, pedológica, de uso/ocupação/manejo e magnitude das feições; e entre escoamento superficial/gradiente altimétrico, em referência à Segunda Lei da Termodinâmica, e as incisões erosivas no sistema vertente em área selecionada do município de Mineiros e arredores, região sudoeste do estado de Goiás. A proposta foi testada para 5679 feições erosivas lineares mapeadas por imagens de alta resolução espacial referentes ao período 2016 – 2020 distribuídas nos diferentes compartimentos morfopedológicos (CMP) delimitados pela relação espacial entre substrato, relevo e solos. Os resultados mostram que cada CMP apresenta padrões distintos de concentração de feições erosivas e de área de contribuição erosiva; configurações morfométrica e morfográfica próprias, bem como segmentos preferenciais onde o comprimento de fluxo, declividade e forma da vertente associadas às classes de solos e uso do solo, influenciam no padrão e área de contribuição erosiva.

**Palavras-chave:** Análise Erosiva; Escalas de Abordagem; Transferência de Energia; Sistema Vertente.

**Abstract:** Linear water erosion involves disintegration and transport of soil materials resulting from the energy of surface runoff, and its study may involve different variables and methodologies at different scales. This paper presents a methodological proposal aimed at analysis at three scales of approach involving relationships between morphological and sedimentary compartments and patterns of density and area of erosive contribution; the morphometric, morphographic, pedological, land use/occupancy/management configuration and magnitude of the features; and the relationship between surface runoff/altimetric gradient, in reference to the Second Law of Thermodynamics, and the erosive incisions in the slope system located in the município of Mineiros and surroundings, Southwest of the state of Goiás, Brazil. The proposal was tested for 5679 erosive features (gullies) mapped by high-resolution imagery between 2016 and 2020 were used where the gullies was distributed on different Morphopedological Compartments (CMP). The results showing each CMP presents: a concentration pattern of erosion features and erosive contribution area; typical morphometric and morphographic

configuration, as well as preferential segments in which the relationship between flow length, slope and slope shape, associated with soil types and land use influencing the erosive pattern and contribution area.

**Keywords:** Erosive Analysis; Scales of Approach; Energy Transfer; Slope System.

## 1. Introdução

Um dos grandes desafios no campo de geociências tem sido a análise espaço-temporal de fenômenos perceptíveis em diversas escalas, resultantes da convergência de fatores naturais e antrópicos, com considerável precisão e eficiência (MITASOVA et al., 2006). O desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia computacional aplicada ao processamento de dados geoespaciais e associada ao conhecimento geográfico tem permitido implementar procedimentos técnicos-operacionais, bem como metodologias destinadas à abordagem de fenômenos ambientais de elevada complexidade e em diversos níveis de detalhamento (BATTY, 2011). As abordagens mais completas permitem tomada de decisões mais adequadas, na medida em que permitem prognósticos decorrentes da avaliação da convergência de fatores naturais, os quais podem ser potencializados por intervenções antrópicas, culminando em situações adversas.

Neste contexto, destaca-se a análise de processos erosivos hídricos lineares, que se coloca na interface da abordagem climatológica, geomorfológica, pedológica e de uso/manejo antrópico. Tal abordagem, considerada mais integrada ou holística, tem se tornado cada vez mais viável nas últimas décadas, devido à maior disponibilidade e a possibilidade de processamento e análise de dados geoespaciais oriundos de diversas fontes (satélites, radar, fotos aéreas, drones) em que é possível contar com boa precisão e acurácia. Isto permite que fenômenos que acontecem até mesmo em grandes recortes espaciais, como grandes bacias hidrográficas, sejam analisados em elevado nível de detalhamento na escala de trabalho, algo que no contexto da cartografia analógica era restrito à pequenas áreas.

No processo de análise, por vezes, é explícita a profunda relação entre um conjunto de variáveis e o comportamento do fenômeno. Entretanto, tão importante quanto a demonstração visual da associação é o discernimento das relações, assegurando assim o domínio do princípio ativo que rege o funcionamento dos sistemas. O comportamento dos fenômenos depende da convergência de variáveis, cujas relações podem resultar em condições de intensidade crítica para a aceleração de processos no espaço e no tempo. Com isso, o sucesso de um modelo depende fundamentalmente de uma boa seleção e avaliação do comportamento das variáveis mais significantes. Esta observação é de suma importância, dada a necessidade de coerência entre as variáveis no controle no conhecimento do comportamento do fenômeno.

Assim, o desenvolvimento, a aplicação e a análise de equações ou ainda relações espaciais e matemáticas entre variáveis envolvendo dados geoespaciais de melhor acurácia tornam-se essenciais para representações espaço-temporais fidedignas dos fenômenos multifatoriais que ocorrem em sistemas como vertentes e bacias hidrográficas. Para tanto, a coleta, a sistematização, a interpretação de dados e a geração da informação geográfica em meio digital têm se mostrado de fundamental importância para novos avanços na pesquisa geográfica, exigindo uma estreita colaboração entre os conhecimentos tradicionais dessa disciplina e a ciência computacional, resultando no que se chama atualmente de Ciência da Informação Geográfica. Portanto, utilizando-se do conceito de predição, um modelo espaço-temporal que se pretenda ser de razoável desempenho deve apresentar comportamento exponencial de intensidade, na medida em que se aproxima do local ou área de ocorrência do fenômeno, o que implica em maior acurácia preditiva, proporcionando concentração de esforços e recursos, permitindo intervenções melhores e aumentando a eficiência de medidas preventivas.

Considerando o exposto, o presente trabalho objetiva apresentar proposta metodológica de análise de processos erosivos hídricos lineares em escalas sucessivas de aproximação, partindo de uma perspectiva fisiográfica considerando a variabilidade espacial de fatores não cumulativos como geologia, solo e relevo, para a variabilidade espacial de fatores cumulativos em função da convergência e acúmulo de fluxo em escala de área de contribuição no sistema vertente, contemplando assim a intensidade de fluxo de energia.

## 2. Fundamentação Teórica

A hipótese principal desta pesquisa pressupõe que a ocorrência de processos erosivos pode ser melhor compreendida a partir da variabilidade espacial de padrões face aos condicionantes morfo e pedogenéticos não cumulativos, isto é, que ainda não recebem os efeitos da convergência de fluxo ou área de contribuição, com características fisiográficas e funcionais distintas. Nestes, cada unidade tende a apresentar características geomorfométricas, pedológicas e de cobertura e uso distintas, bem como segmentos preferencias para padrões de processos erosivos. Esses segmentos preferenciais podem ser melhor caracterizados face à relação chuva - escoamento superficial, permitindo assim uma compreensão mais sistêmica em função da convergência de energia enquanto capacidade de realizar trabalho morfogenético. Assim, adotou-se como conceitos principais: formações superficiais, configuração geomorfométrica típica e nesta a relação - escoamento superficial no sistema vertente e sua área de contribuição, como apresentado a seguir.

### 2.1. Formações Superficiais

O comportamento de processos e fenômenos, como desagregação, transporte e deposição no tempo histórico em decorrência de intervenções antrópicas possui profunda dependência dos materiais provenientes das transformações mais recentes, entendidas como formações superficiais (MOTTI; SILVA, 1978; QUEIROZ NETO, 2001). Estas, sob ação de fatores tectônicos e bioclimáticos, formam uma diversificada camada de materiais resultante das transformações físico-químicas e biológicas pelas quais passam os materiais sobre e próximo da superfície terrestre emersa nos últimos milhões de anos (MENEZES et al., 2006; SIMÕES et al., 2016). Como ponto de partida entende-se que a compreensão dos padrões espaciais envolvendo formas, densidade de feições, área de contribuição erosiva, bem como ritmo de evolução de processos erosivos deve, necessariamente, passar pela compreensão do comportamento do(s) material(is) resultante(s) de transformações morfopedogenéticas ocorridas em compartimentos morfopedológicos que resultam da relação espacial entre substrato, relevo e solos (CASTRO; SALOMÃO, 2000) em uma dada área, sejam residuais ou transportados, a partir dos quais se origina a cobertura pedológica e como esta influencia na configuração e comportamento da paisagem. Na prática, considerou-se que esses produtos consistem no material a ser trabalhado pela morfogênese, em especial no tempo histórico, podendo ser potencializados por mudanças nos fluxos de energia. Desta forma, como as intervenções humanas estão frequentemente relacionadas ao início do processo erosivo, devido aos tipos de uso e manejo praticados, é compreensível que seu padrão comportamental esteja mais relacionado à estrutura, organização e composição da cobertura pedológica composta pelas diversas classes de solos presentes.

### 2.2. Sistema

Assumiu-se o exposto por Chorley e Kennedy (1971) e Christofolletti (1979) para os quais o conceito de que um sistema consiste em um conjunto estruturado de objetos e atributos que possuem componentes, variáveis, exibem relações discerníveis e operam como um todo complexo. Para tanto, faz-se necessário a identificação de seus limites, atributos, relações e respectivas unidades a serem consideradas na avaliação de seu funcionamento. Christofolletti (1999), reitera que um sistema deve ser capaz de intercambiar fluxos de matéria e energia com seu entorno condicionante, bem como adaptar sua estrutura interna em função de tais interações. Desta forma, a ideia de sistema só ganha sentido quando se leva em conta o movimento de cada parte e suas interrelações, uma vez que estes aspectos podem proporcionar o surgimento de novas propriedades denominadas de emergentes (MATTOS; PEREZ FILHO, 2004). Tais interrelações estão ligadas à noção de dinamismo que é entendida com a existência de interdependência e mecanismos de retroalimentação, o que implica em considerar os vários graus de liberdade na relação entre os constituintes (VILLATE, 2006) e em considerar duas características. A primeira refere-se ao processo de realimentação ou *feedback* alcançado por meio das interações do movimento dos diversos elementos que o compõem. A outra é a existência de limites críticos a partir dos quais o sistema se desequilibra e pode tomar outra direção na sua evolução (CHRISTOFOLETTI, 2004). Estas definem a capacidade de reequilíbrio e volta ao seu estado anterior (resiliência) ou rompimento do atual e evolução para um estágio de melhor adaptação. É levando em conta essas considerações que os atuais modelos de predição do surgimento e evolução de processos erosivos ainda apresentam limitações. Assim, partiu-se da constatação de que para erosão hídrica linear, tais aspectos nem sempre permitem modelar, por exemplo, a evolução de uma voçoroca (TAVARES;

CASTRO, 2022) e de que nem todas as feições erosivas obedecem a estágios evolutivos subsequentes como sulcos, ravinas e por fim voçorocas e ainda que as variáveis envolvidas em um dado modelo podem não contemplar o aparente caos que caracteriza o surgimento e evolução de algumas destas feições (COELHO NETTO, 2003). Portanto, há necessidade de modelar os processos erosivos hídricos lineares partindo de sistemas a serem definidos, como os baseados em compartimentos morfopedológicos, sistema produzidos pela interrelação entre substrato, relevo e solos (CASTRO; SALOMÃO, 2000), cujas dinâmicas próprias podem favorecê-los ou não.

### 2.3. *Bacia Hidrográfica*

Nos últimos 40 anos a bacia hidrográfica vem sendo reconhecida como unidade espacial de estudo, em particular no âmbito da Geografia Física, da Geomorfologia e da Pedologia. Entretanto, verifica-se que grande parte dos estudos envolvendo as feições geomorfológicas ainda é fortemente baseada em uma concepção estática do espaço e do tempo e não raro na dissociação das partes que compõem esse sistema hidrológico. No entanto, convém lembrar que uma bacia de 2º ordem (STRAHLER, 1952) ou maior, é formada por um encadeamento sistematizado de bacias de 1º ordem, nas quais as áreas de contribuição convergem por meio da associação de vertentes e canais, formando sistemas de maior porte, bem como recebendo maior volume hídrico e que as feições erosivas ocorrem em suas vertentes. O sistema vertente é formado por segmentos ou partes menores representadas por formas que expressam os processos envolvidos na sua esculturação. Neste sentido, enquanto sistema formado naturalmente, a bacia é entendida como célula básica na análise ambiental e permite conhecer e avaliar seus diversos componentes e os processos de interação que nela ocorrem (BOTELHO; SILVA, 2004). Essa visão sistêmica foi adotada neste trabalho, evidenciando o que Chorley (1962) e Coelho Netto (1995) consideraram a bacia hidrográfica como um sistema não-isolado e aberto clássico, no qual ocorre a entrada de energia via precipitação convertida em escoamento e infiltração, que mantém troca de matéria e energia com os sistemas fluviais. Desta forma, o teste metodológico adotou a bacia hidrográfica de 1ª e 2ª ordens representativas dos diferentes compartimentos morfopedológicos afetados pela erosão hídrica linear como unidades selecionadas para teste.

### 2.4. *Vertente e Sua Área de Contribuição*

O entendimento do sistema vertente recebeu importantes contribuições de Gilbert (1914), acerca da inclinação das encostas nas taxas de erosão e de Dylic (1968), sendo definido como toda superfície terrestre inclinada entre os interflúvios e os canais de drenagem, pouco ou muito extensa, e que está subordinada as leis gerais da gravidade e é continuamente modelada pelo processo de denudação. Uma vertente pode resultar de fatores endógenos e de fatores exógenos, sendo os primeiros representados pelos movimentos tectônicos e seus reflexos na mudança da topografia, e os segundos representados pela ação do clima com os fluídos da atmosfera e hidrosfera. Tricart (1957) demonstra que o balanço morfogenético neste sistema pode ser entendido pela variação da declividade em seus diversos segmentos. Destas considerações, merecem destaque os segmentos entre as formas convexas e côncavas, configurando um segmento retilíneo, onde se localiza a maior inclinação em que o recuo se mostra mais pronunciado. Por sua vez, Cruz (1982), defende a ideia de que os processos variam no espaço e no tempo e dependem de um entorno condicionante, tornando-se sujeitos a ajustes decorrentes da variação, bem como na distribuição de matéria e energia. Esse ajuste é necessário, uma vez que a vertente é um elemento geomorfológico que nasce e evolui em função da diversidade altimétrica, a qual permite troca de matéria e energia por fazer conexão entre uma superfície mais elevada e uma mais baixa, sendo elemento fundamental para o balanço energético. Na ausência de perturbações tectônicas e climáticas o sistema composto vertente – bacia hidrográfica parte de um estado de mínima disponibilidade e máxima concentração de energia, evolui para uma situação intermediária em que o predomínio de áreas convexas tende a se equiparar as áreas côncavas com máxima disponibilidade de energia, até que as áreas coletoras e dinamizadoras encontrem-se em menor disponibilidade que aquelas receptoras e dissipadoras. A relação quantitativa entre as áreas coletoras e dinamizadoras de fluxos e as áreas receptoras consiste em um dos maiores desafios da geomorfologia e seu entendimento permite avançar na aplicação do conceito de equilíbrio dinâmico, muito caro no âmbito da ciência geomorfológica (BERTOLINI, 2012). Portanto, a vertente consiste em uma das unidades mais básicas do relevo e assume significado especial para a Geomorfologia. Neste trabalho, esse significado foi compreendido por dois aspectos, sendo um natural que permite o entendimento da evolução do modelado tendo em vista a importância

das formas no entendimento dos processos visando o melhor arranjo, e outro relativo às manifestações humanas, que permite entender as potencialidades e as fragilidades/vulnerabilidades de cada dos segmentos das vertentes em face da ocupação humana e os diversos usos empreendidos no tempo e espaço (HAMELIN, 1964).

### 2.5. Entropia de Sistemas

O conceito de entropia integra os estudos da termodinâmica sendo descrito no início da década de 1850 e introduzido na ciência em 1860 por Rudolf Clausius. Se baseia na distribuição de matéria e energia e se destina à avaliação dos estágios de evolução de um sistema, e se refere à razão entre a quantidade de calor trocado e a temperatura existente em um sistema, constituindo a base da Segunda Lei da Termodinâmica. Esta define que um sistema, ao passar por processo e evoluir em direção ao estado de equilíbrio, tende a aumentar sua entropia (MATTOS; VEIGA, 2002; MOREIRA et al., 2003; PASSOS, 2003). Por constituir um conceito abrangente, suas aplicações se difundiram por diversas áreas do conhecimento (ZDENKOVIC; SCHEIDEGGER, 1989). Em particular, a aplicação deste conceito no estudo do relevo envolve a avaliação dos fluxos de energia enquanto capacidade de realizar trabalho geomorfológico (CHRISTOFOLETTI, 1979), como a erosão. Leopold e Langbein (1962) foram os primeiros a utilizar o conceito de entropia no estudo das paisagens, empregando analogias com a termodinâmica, sendo uma das formas propostas para avaliação pela equação 1:

$$S = \Delta Q/t \iff S = \Delta M/h \quad (1)$$

em que:  $S$  corresponde a entropia em ambos os sistemas;  $\Delta Q$  é a quantidade de calor ou energia transferido, e  $t$  corresponde a temperatura no sistema termodinâmico;  $\Delta M$  é a quantidade de massa transferida e  $h$  é a amplitude altimétrica no sistema geomorfológico.

Assim, a entropia, ou  $S$  no sistema geomorfológico, pode ser representada por  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ; a variação de massa,  $\Delta M$ , por  $\text{kg}$ ; e amplitude altimétrica,  $h$ , por  $\text{m}$ . Ressalta-se ainda que essa avaliação pode ser relativa, considerando o nível de base local, ou absoluta, considerando o nível médio dos mares (ZHAO et al., 2016).

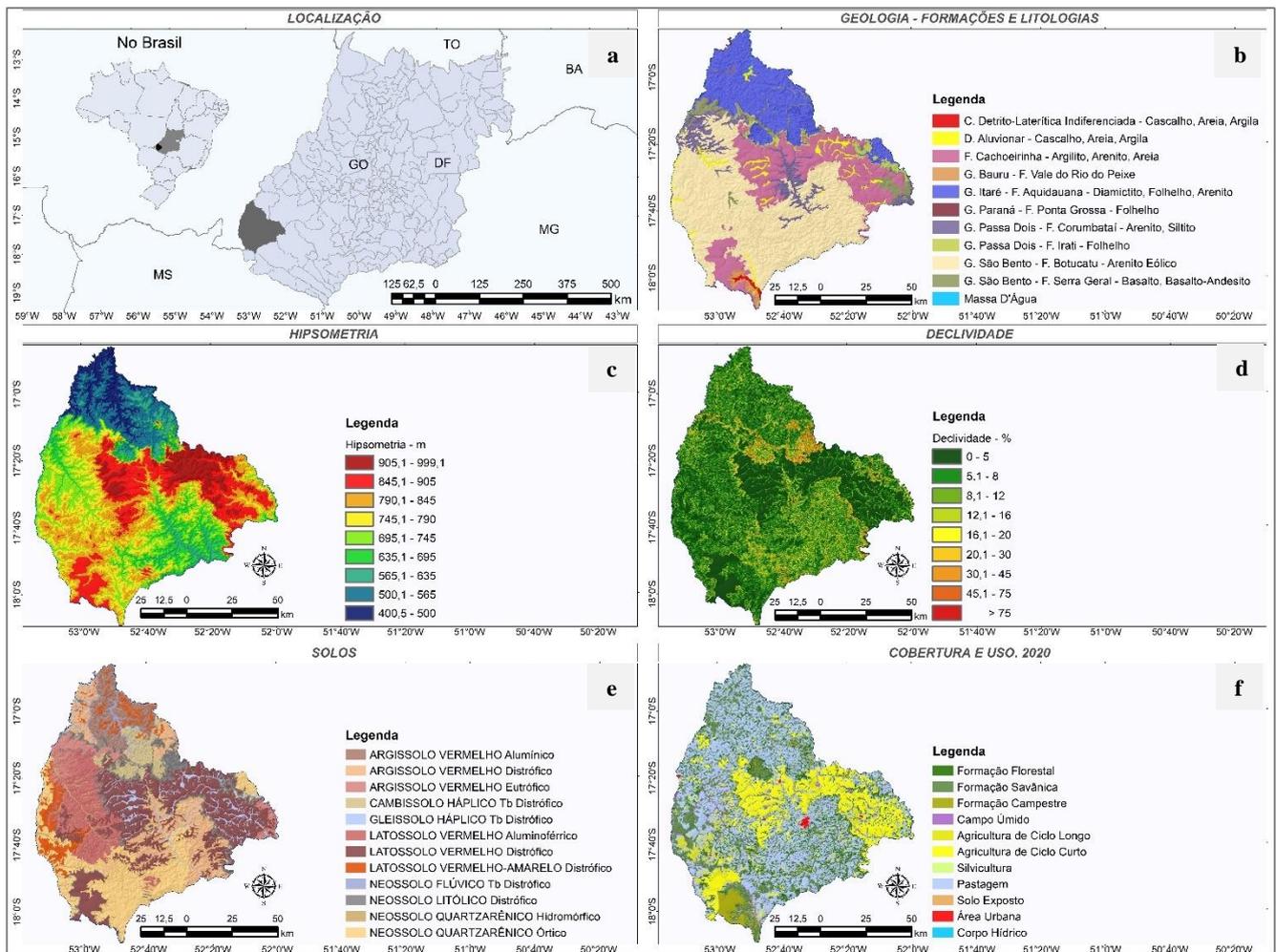
Dessa forma, enquanto a relação entre a quantidade de calor transferida e a temperatura determina o estágio evolutivo em um sistema termodinâmico, a relação entre a quantidade de massa transferida e o desnível altimétrico determina o estágio evolutivo de um sistema geomorfológico. Assim, uma alta entropia resulta de um avançado estágio de transferência de calor que, sob baixa temperatura, indica menor capacidade de fluxo de energia térmica e, por consequência, tende ao equilíbrio termodinâmico. No relevo, um estado de elevada entropia resulta de um sistema geomorfológico em estágio avançado de aplainamento que, já sob baixo desnível altimétrico, implica em menor capacidade de fluxo de energia e, por consequência, tende ao equilíbrio morfogenético, dando-se o inverso em situações de dissecação erosiva em curso, admitindo-se variações. Neste sentido, em ambos os sistemas, aumento de entropia implica em energia envolvida e, por consequência, na realização de trabalho em que a intensidade de fluxo tende a ser diretamente proporcional ao gradiente entre as partes do sistema. Marques (1994), afirma que o conceito de entropia se encontra entre aqueles de maior interesse para a ciência geomorfológica e que a distribuição de energia ao longo da vertente ou bacia hidrográfica é mais importante do que a existência maior ou menor dessa energia. Isso porque os sistemas, independentemente de seu tamanho ou capacidade, tendem sempre a evoluir na busca de um equilíbrio dinâmico. Neste trabalho admitiu-se que o processo erosivo hídrico ocorre em compartimentos morfopedológicos, pequenas bacias hidrográficas e padrões de vertentes de baixa a moderada entropia por se constituírem como trabalho geomorfológico em busca do equilíbrio dinâmico.

## 3. Materiais e Métodos

### 3.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo abrange os municípios de Santa Rita do Araguaia, Perolândia, Portelândia e parte de Mineiros e Jataí, na região de planejamento Sudoeste Goiano, compreendendo as partes mais elevadas das bacias dos rios Araguaia e Paranaíba (Figura 1 a). O substrato geológico (Figura 1 b) pertence à Bacia Sedimentar do Paraná, sendo composto por formações sedimentares diversas com predomínio de arenitos, argilitos e depósitos de areia, por vezes, permeados por intrusões basálticas e basalto-andesito. Cada formação, como apresentado a

seguir, tende a apresentar resistência específica em relação aos processos intempéricos, o que geomorfologicamente associa-se a diversos patamares altimétricos, configurando superfícies geomórficas escalonadas (Figura 1 c). Destaca-se o topônimo Serra de Caiapó, parte do Planalto Setentrional da Bacia do Paraná (AB'SABER; COSTA JÚNIOR, 1950; DRAGO et al., 1981), caracterizado por extensa área plana e elevada, sendo algumas de suas bordas delimitadas por escarpas erosivas. Os diversos patamares apresentam limites nítidos, uma vez que a transição para as áreas adjacentes é marcada pela clara redução das altitudes e aumento das declividades. São consequência direta de mudanças na litologia que, por sua vez, influenciam os padrões geomorfológicos, pedológicos e, principalmente, de cobertura e uso do solo, com reflexos diretos nos processos erosivos hídricos lineares (NUNES; CASTRO, 2021).



**Figura 1.** Localização da área de estudo (a); formações geológicas e respectivas litologias (b), hipsometria (c), declividade (d), pedologia (e); e cobertura e uso (f).

A distribuição das classes de solos na área de estudo são influenciadas pela litologia e o relevo (NUNES; CASTRO, 2015; CREMON et al., 2021). As superfícies mais elevadas e planas, como a porção central e do extremo sul da área, são sustentadas por argilitos, arenitos e depósitos de areia pertencentes à Formação Cachoeirinha (BRASIL, 1983; LACERDA FILHO; FRASCA, 2008), cujas altitudes variam de 857 a 1010 m e as declividades de 0 a 5% nos interflúvios, e no máximo 8% nas proximidades dos canais, configurando extensos planaltos denominados de Chapadas ou Chapadões com baixa densidade de drenagem (Figura 1 c). Predomina o Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa a muito argilosa em declives de até 8%, seguido de Gleissolo Háplico de textura argilosa ao longo das planícies marcadas por baixo gradiente altimétrico e declives de até 3% (ALVES et al., 2017; SANTOS et al., 2015) (Figura 1d). As áreas de Latossolo foram as primeiras a serem ocupadas por agricultura tradicional ainda na década de 1960, consolidadas na década de 1970, já com as técnicas da

modernização da agricultura associada à chamada Revolução Verde (PINTO; WANDER, 2016), com intenso uso de maquinário e de insumos no manejo.

Nas partes oeste e sudeste (Figura 1 b) predominam arenitos eólicos pertencentes ao Grupo São Bento – Formação Botucatu, entremeados por arenitos e siltitos do Grupo Passa Dois – Formação Corumbataí (BRASIL, 1983). A porção oeste assenta-se nos patamares mais elevados e preservados, com interflúvios de bordas ainda arredondadas e predomínio de Latossolo Vermelho distrófico de textura média descendentemente sucedido pelo Neossolo Quartzarênico órtico de textura arenosa, que transiciona para Neossolo Quartzarênico Hidromórfico nos fundos de vale (Figura 1 e), por vezes sedimentados/assoreados. Os usos predominantes são agricultura nas áreas de Latossolos e pastagem em áreas de solos com menor fertilidade como os Neossolos Quartzarênicos arenosos (Figura 1 f). A porção sudeste encontra-se em patamares mais rebaixados e dissecados, com interflúvios mais concavizados com o predomínio de Argissolo Vermelho de textura média e, principalmente, Neossolo Quartzarênico Órtico de textura arenosa. São áreas onde o processo de conversão para uso antrópico se intensificou ao longo da década de 1970 e principalmente 1980. A baixa aptidão para agricultura promoveu a conversão de extensas áreas em pastagem e áreas de solo exposto, sobre os quais avançam os processos erosivos hídricos lineares (NUNES; CASTRO, 2015). Já na porção norte predominam diamictitos, folhelhos, arenitos e siltitos pertencentes ao Grupo Itararé, Formação Aquidauana (BRASIL, 1983; MOREIRA et al., 2008). Trata-se de uma área mais baixa que as anteriores, com altitudes de até 413 m, dissecação erosiva avançada e já aplanada, resultando em baixo gradiente, com declives até 20% nas bordas de interflúvio e 3% nos fundos de vale. Nela, predominam Argissolos Vermelhos de textura média que transicionam para Neossolo Flúvico de textura arenosa ao longo dos canais principais. O uso é predominantemente com pastagem, sendo que nos últimos anos vem apresentando expressivas manchas de solo exposto.

Em toda a área o clima é tropical subúmido, com dois períodos bem distintos. Um seco, que vai de junho a agosto, e outro chuvoso, que vai de setembro a maio (SILVA et al., 2006), enquadrando-se no tipo *Aw* de Köppen (MONTEIRO, 1951; NIMER, 1972).

### 3.2. Estratégia de abordagem e procedimentos operacionais

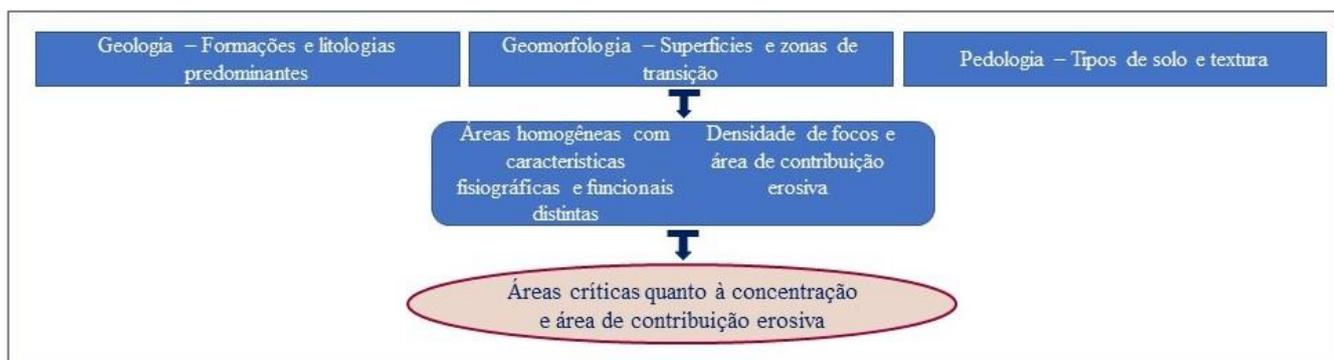
A estratégia de abordagem para a produção do modelo proposto foi multiescalar subdividida em escalas sucessivas de aproximação. De modo geral, na primeira aproximação delimitou-se a área de estudo e buscou-se contemplar a influência das formações superficiais na ocorrência de erosões em escala regional, mais abrangente, recorrendo-se à compilação dos mapas temáticos do meio físico (rever Figura 1), ao mapeamento dos focos erosivos e à delimitação de compartimentos morfopedológicos (CMP's). Estes correspondem a áreas homogêneas quanto aos padrões fisiográficos e funcionais distintos, e sua relação com o mapa de focos erosivos configura também padrões de distribuição espacial. A segunda aproximação, em escala local, compreendeu a definição e avaliação da configuração morfométrica e morfográfica, bem como da erodibilidade e do fator cobertura/uso e manejo ao longo das vertentes de cada unidade físico-ambiental identificada e sua correspondência com os padrões de concentração e área de contribuição erosiva de cada CMP. Desta forma, para cada variável analisada buscou-se a identificação de um intervalo ou classe considerada determinante, e por consequência, a identificação de áreas ou segmentos preferenciais para a ocorrência de erosões. A terceira aproximação, também na escala local, envolveu a seleção de pequenas bacias hidrográficas em que foi estabelecida a relação entre fluxo superficial e gradiente altimétrico e sua relação com a ocorrência de incisões erosivas, a qual permitiu, dentro de cada CMP e considerando intervalos ou classes de variáveis determinantes, a avaliação da concentração lateral de fluxo com a forma da vertente, permitindo avaliar a concentração tridimensional de fluxo e, portanto, a identificação mais precisa de segmentos críticos quanto a incidência de energia e sua capacidade de realizar trabalho erosivo.

#### 3.2.1. 1ª Aproximação- Formações Superficiais = Compartimentação Morfopedológica

A área total de estudo foi delimitada com base nos limites divisores das bacias do rio Araguaia e Paranaíba contemplando os municípios supracitados. Nessa área, para a avaliação das formações superficiais e seus padrões espaciais procedeu-se à compartimentação morfopedológica com base na metodologia de Castro e Salomão (2000), a qual corresponde à relação espacial entre o substrato geológico, o relevo e os solos, configurando áreas homogêneas quanto às suas características fisiográficas e funcionais. Do substrato geológico (Figura 1 a) foram

avaliadas as formações geológicas e respectivas litologias predominantes compiladas do projeto RADABRASIL (BRASIL, 1983), por Moreira et al. (2008). Para a geomorfologia foram igualmente utilizados dados provenientes do RADAMBASIL (BRASIL, 1983), atualizados com base em Latrubesse e Carvalho (2006). À análise destes foram associados à dados de altimetria (Figura 1c) e de declividade (Figura 1d) associados ao Modelo Digital de Elevação (MDE) FABDEM (HAWKER et al., 2022) com sombreamento. O FABDEM é considerado um modelo digital de terreno criado a partir do modelo Copernicus DEM, sendo que as alturas de florestas e edificações foram atenuadas (HAWKER et al., 2022). Para o estado de Goiás, o Copernicus DEM atende o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) na escala 1:50.000, classe A (CREMON et al., 2022).

Os dados de cobertura pedológica (Figura 1e) tiveram como base os trabalhos do Plano Diretor da Bacia do Rio Paranaíba (UFV; RURALMINAS, 2005), Barbalho (2002), Marinho e Castro (2003), Resende (2003), reajustados com base em variáveis morfométricas e morfográficas, bem como complementados por meio de novos levantamentos em topossequências. Após a incorporação dos novos levantamentos aos dados anteriormente existentes, o mapa resultante foi adaptado ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), 5ª edição (SANTOS et al., 2018). De porte do reconhecimento, procedeu-se à definição dos CMPs, cujos limites foram definidos com base nas rupturas de altitude e declividade marcadas com base no MDE FABDEM com tamanho de pixel de 30 metros, conforme ilustrado ao longo da Figura 2.



**Figura 2.** Formações geológicas e respectivas litologias, superfícies geomórficas e zonas de transição e classes de solo na definição de áreas homogêneas, identificação de áreas críticas quanto à densidade de focos e área de contribuição erosiva.

### 3.2.2. 2ª Aproximação - Configuração Morfométrica, Morfográfica, Pedológica e de Cobertura e Uso do Solo de Cada CMP

Nesta aproximação procedeu-se à relação espacial entre cada uma das variáveis morfométricas (declividade em %, comprimento de vertente em m, curvatura ou forma das vertentes convexa, retilínea ou côncava), os fatores erodibilidade dos solos, fator K da USLE (*Universal Soil Loss Equation* – equação universal de perda de solos), cobertura/uso e manejo dos solos, fatores C e P da USLE, e os padrões de densidade de focos (nº de erosões por km<sup>2</sup>) e área de contribuição erosiva (área da erosão mapeada em polígono). Para tanto, as feições erosivas e cada uma das variáveis foram divididas em 7 classes, perfazendo a configuração de uma matriz com 7 linhas x 7 colunas. Para cada unidade ou célula da matriz resultante estabeleceu-se a relação entre a área de contribuição erosiva associada e a área da respectiva classe de variável, como expresso na seguinte equação:

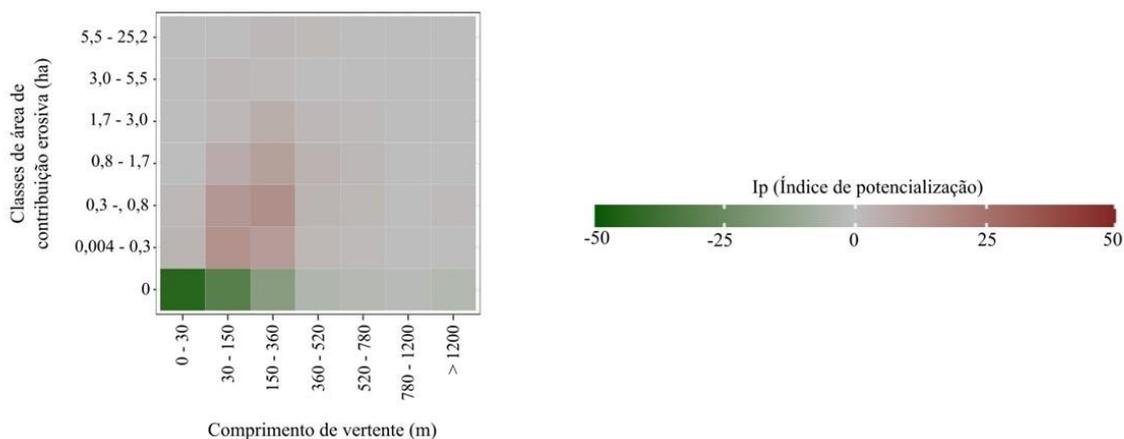
$$Ip = (Ace - Acv), \text{ em } \% \quad (2)$$

em que:  $Ip$  = Índice de potencialização;  $Ace$  = % de área de contribuição erosiva; e  $Acv$  = % de área da respectiva classe de variável.

Este procedimento resultou em três situações distintas. A primeira em que o resultado tende a ser negativo ( $Ace < Acv$ ), o qual significa que uma determinada classe de variável pode ser predominante, mas que não influencia na ocorrência de processos erosivos. A segunda em que o percentual de área de contribuição erosiva é próximo ou igual ao percentual de ocorrência da referida classe de variável, o que implica em afirmar que a

ocorrência de processos erosivos é compatível com a abrangência da referida classe. A terceira situação é aquela em que o percentual de área de contribuição erosiva em uma classe de variável supera o percentual de ocorrência da respectiva classe ( $A_{ce} > A_{cv}$ ), resultando assim em valores positivos. Tal comportamento demonstra, quantitativamente, o efeito potencializador dessa classe na ocorrência de incisões erosivas.

A título de ilustração e com a finalidade de melhor detalhar o efeito potencializador de cada classe de variável, as feições erosivas foram classificadas segundo a área de cada polígono aqui denominada área de contribuição erosiva. Isso permite avaliar a influência de cada classe de variável na ocorrência de feições, incluindo seu porte ou magnitude. Uma ilustração desta etapa metodológica é apresentada na Figura 3, utilizando para tanto a variável comprimento de vertente.



**Figura 3.** Distribuição da relação área de contribuição erosiva - área abrangida por cada classe para a variável comprimento de vertente.

A Figura 3 permite constatar que para o estabelecimento desta relação há necessidade de considerar uma classe de contribuição erosiva “0” (zero), correspondente às áreas onde não ocorrem incisões erosivas, o que resulta em valores negativos. Na interseção desta linha com as classes da variável comprimento de vertente está distribuída a quase totalidade de área do compartimento, tendo em vista a pouca área atingida por incisões erosivas se comparada a área total. Em consequência, esta classe reflete a distribuição dos percentuais de cada classe de comprimento de vertente. Já a interseção das classes com área igual ou maior do que 0,004 ha reflete os percentuais de área atingida por erosão em cada classe de comprimento de vertente. O resultado é uma representação que permite avaliar a influência do comportamento de cada classe na ocorrência de feições, considerando o porte das incisões erosivas, sem o efeito de uma eventual maior predominância de área de uma determinada classe de variável. De porte desta relação, e observando o exemplo acima, depreende-se que a classe de comprimento de vertente de 30 a 150 m potencializa a ocorrência de erosões de até 1,7 ha em aproximadamente 25%, enquanto a classe de 150 a 360 m potencializa ocorrência de erosões de até 3 há em aproximadamente 12 %.

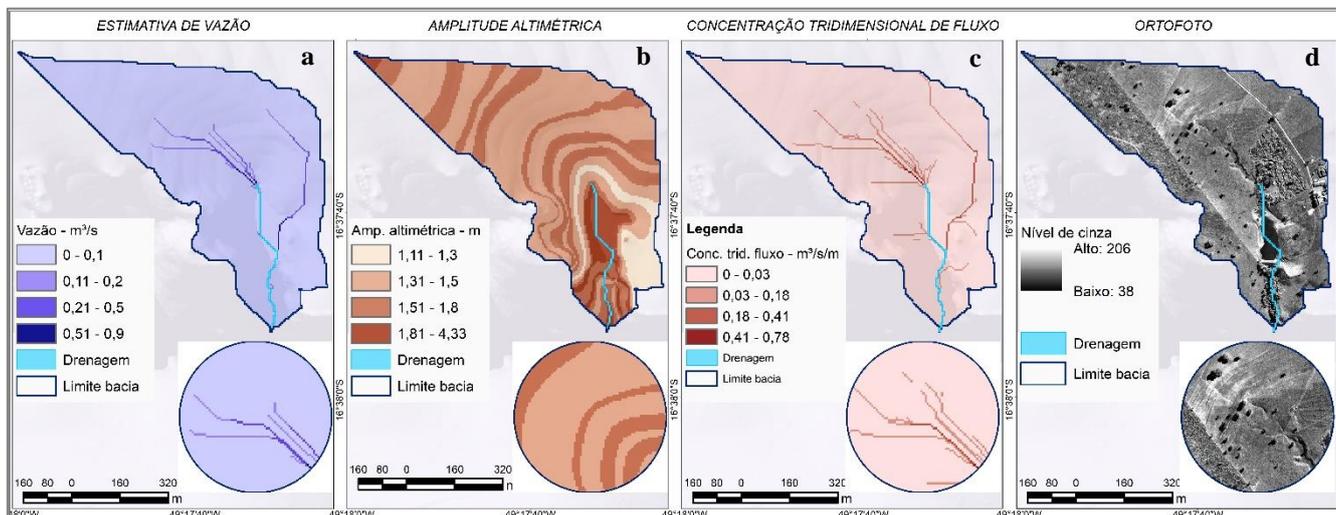
### 3.2.3. Comportamento Tridimensional da Intensidade de Fluxo no Sistema Vertente

O terceiro nível de abordagem envolveu o comportamento bidimensional de fluxo e sua relação com o gradiente altimétrico ao longo do sistema vertente. Para tanto, a análise recorreu ao modelo chuva-vazão e sua resultante em convergência lateral de fluxo, bem como sua relação com o gradiente altimétrico, perfazendo assim a fórmula destinada à avaliação do conceito de entropia preconizada por Leopold e Langbein (1962) em analogia ao sistema termodinâmico, conforme apresentado na Equação 3.

$$S = \Delta Q/t < == > S = \Delta M/h \tag{3}$$

Em que:  $S$  corresponde a entropia em ambos os sistemas;  $\Delta Q$  é a quantidade de calor ou energia transferido, e  $t$  corresponde a temperatura no sistema termodinâmico;  $\Delta M$  é a quantidade de massa transferida e  $h$  é a amplitude altimétrica no sistema geomorfológico.

Entretanto, para aplicação do conceito de entropia optou-se por substituir a massa contida no bloco-diagrama pela massa resultante do escoamento superficial ( $m^3$ ), pelo seu comportamento no tempo ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), e mantendo a amplitude altimétrica ao longo do sistema vertente, como ilustrado na Figura 4. Com isso, o conceito de entropia, além da variabilidade espacial, ao envolver fluxo de massa por unidade de tempo, passa a ser representado considerando também a intensidade ao longo do sistema, permitindo identificar além da evolução, os segmentos críticos nos quais o processo é mais intenso, portanto, de maior energia de realização de trabalho morfo genético.



**Figura 4.** Exemplo de estimativa de vazão de pico (a), gradiente altimétrico (mínima variância intraclasse hipsométrica (b), razão entre estimativa de vazão de pico e gradiente altimétrico (c) e ortofoto com feições erosivas hídricas (d) de uma pequena bacia hidrográfica.

A vazão utilizada foi a de pico ( $qp$ ) que foi estimada a partir do produto resultante da precipitação efetiva pela área de contribuição específica, distribuído pelo tempo de pico do hidrograma, correspondente ao intervalo entre o centro de gravidade da chuva e o pico de vazão, segundo a proposta de Schwab et al. (1993), com base na Equação 4:

$$qp = 0,0021 \cdot Pe \cdot A / Tp \tag{4}$$

em que:  $qp$  = vazão de pico do evento, em  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $Pe$  = precipitação efetiva ou parcela da precipitação não infiltrada e disponível para escoamento superficial, em  $mm$ ;  $A$  = área de contribuição, em  $ha$ ; e  $Tp$  = tempo de pico do hidrograma, em *hora*. Na aplicação dessa equação considerou-se um tempo de pico correspondente 0,6 do tempo de concentração para cada bacia por meio da seguinte equação:

$$Tp = 0,6 \times Tc \tag{5}$$

A precipitação efetiva ( $Pe$ ) foi determinada a partir da proposta do Serviço de Conservação do Solo (SCS – Soil Conservation Service), atual Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS – Natural Resource Conservation Service) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA – United States Department of Agriculture) (NRCS, 2004), para a qual a altura da lâmina d’água, convertida em escoamento superficial, pode ser estimada por meio da Equação 6:

$$Pe = \left[ \frac{(P - 0,2 S)^2}{(P + 0,8 S)} \right], \text{ desde que } P \geq Ia = 0,2 S \tag{6}$$

em que:  $Pe$  = precipitação efetiva ou altura da lâmina d’água resultante, em  $mm$ ;  $P$  = precipitação ou altura pluviométrica resultante do evento chuvoso, em  $mm$ ;  $S$  = potencial de infiltração do solo, em  $mm$ ; e  $Ia \Rightarrow 0,2 S$  = abstração ou perda inicial considerada, em  $mm$  (ver mais em NUNES; BORBA, 2018; NUNES; ROSA, 2020). Como observado na primeira parte da Equação 6, na precipitação efetiva considera-se uma perda inicial correspondente

a 20% do potencial de infiltração em decorrência da interceptação pela vegetação, retenções em micro relevo, bem como outras formas de umedecimento do ambiente. Isso implica em afirmar que eventos pluviométricos com volume total menor do que 20% do potencial de infiltração do solo, não proporcionam escoamento superficial. Os dados de precipitação ou altura pluviométrica resultaram da média das intensidades máximas de precipitação (equações 7, 8 e 9) pelo tempo de concentração do escoamento superficial de cada bacia representativa de cada CMP a partir das seguintes equações (OLIVEIRA et al., 2005).

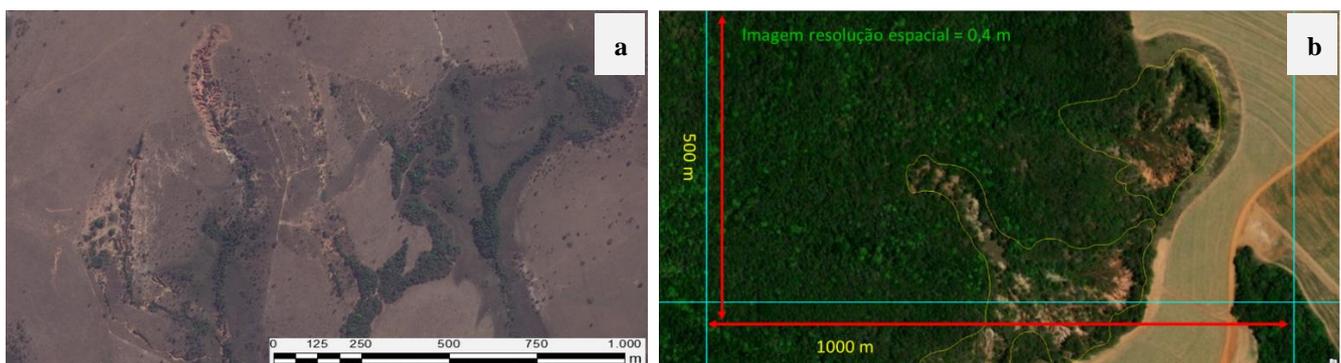
$$i = \frac{K \times TR^a}{(t+b)^c} \Rightarrow i = \frac{873,374 \times TR^{0,1328}}{(t+10)^{0,7418}}; \text{Alto Garças - MT} \quad (7)$$

$$i = \frac{1138,151 \times TR^{0,1643}}{(t+12)^{0,7599}}; \text{Caiapônia - GO} \quad (8)$$

$$i = \frac{1265,319 \times TR^{0,1368}}{(t+15)^{0,7853}}; \text{Aporé - GO} \quad (9)$$

Em que:  $i$  = média das intensidades máximas de precipitação, em  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $TR$  = tempo de retorno considerado, em anos;  $t$  = tempo de concentração do escoamento superficial de cada bacia em estudo, em minutos; e  $k$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes de ajustes próprios da estação climatológica.

O mapeamento dos focos erosivos lineares foi realizado a partir da interpretação e inspeção visual de imagens WorldView-3 coloridas e com resolução espacial de 0,5 m, referentes ao período de 2018 -2020. Para fins de mapeamento considerou-se como foco erosivo a feição com aspecto linear, ligeiramente aprofundada e com bordas íngremes, e em geral com interior com aspecto degradado e contrastando com o entorno imediato, conforme ilustrado na Figura 5. Nesse nível de detalhamento, escala 1:2.000, foi possível o mapeamento em polígono, o que permitiu calcular o ponto central ou centróide, bem como a área de cada feição posteriormente convertida em área de contribuição erosiva (% de área erodida em 1  $\text{km}^2$ , por exemplo) e, por consequência, avaliar de forma mais assertiva o estágio de degradação. A varredura e análise das imagens foi realizada mediante a divisão do polígono envolvente da área de estudos em retângulos com as dimensões 1000 x 500 m, ajustados a um monitor de 21". Tal procedimento permitiu que toda a área de estudos fosse inspecionada visualmente no mesmo nível de detalhamento, compatível com os parâmetros de resolução da imagem, evitando-se, assim, interpretações e decisões equivocadas acerca da feição erosiva e, principalmente, quanto aos seus limites. Desta forma, foi possível perceber padrões espaciais de ocorrência de focos erosivos de forma mais precisa e, em consequência, a possibilidade de classificação dos mesmos em pequeno, médio e grande porte, segundo seu comprimento. Os mapas de densidade de focos e de área de contribuição erosiva foram elaborados a partir da ferramenta Kernel com raio de análise de 700 m disponível no SIG ArcGIS.



**Figura 5.** Exemplo de visualização de feições erosivas em imagem de alta resolução espacial (a) e sistematização do processo de mapeamento (b).

O mapeamento das classes de cobertura e uso do solo foi elaborado a partir de imagens do sensor OLI/Landsat-8 na composição colorida RGB 543 e realce espectral de 2%, correspondentes ao mês de julho de 2020. A definição das classes de cobertura seguiu a nomenclatura proposta por Ribeiro e Walter (2008), a qual contempla

as principais fitofisionomias presentes nas formações vegetais do bioma Cerrado (Formações Florestais, Savânicas e Campestres) (Tabela 1).

O mapa de solos foi elaborado a partir da releitura dos levantamentos já realizados na área, os quais se destacam Brasil (1983), Plano Diretor da Bacia do Rio Paranaíba (UFV, 2005), Marinho e Castro (2003) e Resende (2003).

**Tabela 1.** Classes de fitofisionomias, cobertura e uso do solo e suas correspondências em Fator C (Cobertura/Uso e Manejo) e P (Práticas Conservacionistas).

<b>Formação Vegetal/Fitofisionomia e Cobertura e Uso</b>	<b>Fator C</b>	<b>Fator P</b>	<b>Fator CP</b>
Campo Úmido	0	1	0
Cerradão, Cerrado Denso, Mata de Galeria	0.00004	1	0.00004
Cerrado Típico	0.0007	1	0.0007
Campo Sujo	0.01	1	0.01
Agricultura	0.12	0.12	0.01
Cerrado Ralo	0.01035	1	0.01035
Campo Limpo	0.02	1	0.02
Pastagem	0.1	1	0.1
Queimada	0.2	1	0.2
Solo Exposto	1	1	1

Fonte: Fatores C e P adaptados de Oliveira (2012); Stein et al. (1987).

Os limites das classes encontradas já haviam sido redefinidos por Nunes (2015) por meio de ajuste cartográfico com apoio de análise geomorfométrica, bem como novos levantamentos ao longo de topossequências. Desta feita, de porte do mapa de solos reelaborado, procedeu-se ao levantamento de bibliográfico das classes definidas e sua correspondência em erodibilidade K, como apresentado ao longo da Tabela 2.

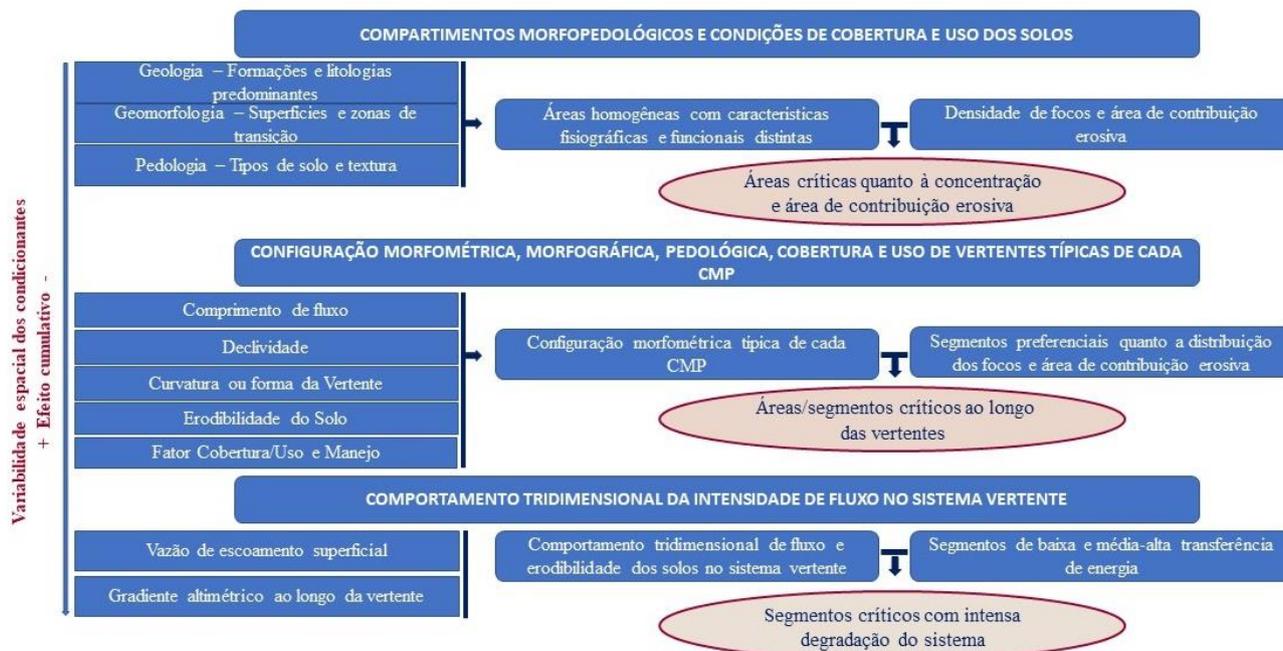
**Tabela 2.** Classes de solo, textura e respectivos valores de erodibilidade K.

<b>Classe de solo</b>	<b>Textura</b>	<b>Fator K</b>
Gleissolo Háptico Distrófico	Argilosa	0,0010
Latossolo Vermelho Distrófico	Argilosa a Muito Argilosa	0,0061
Argissolo Vermelho Eutrófico	Argilosa	0,0178
Neossolo Flúvico Distrófico	Média	0,0290
Neossolo Litólico Distrófico	Arenosa a Cascalhenta	0,0302
Latossolo Vermelho Distrófico	Média	0,0400
Argissolo Vermelho Alítico	Média	0,0410
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Média	0,0420
Latossolo Vermelho Álico	Média	0,0430
Cambissolo Háptico Distrófico	Média	0,0441
Argissolo Vermelho Distrófico	Média a Arenosa	0,0460
Neossolo Quartzarêncio Hidromórfico	Arenosa	0,0500

Fonte: Nunes (2015), com a erodibilidade sendo incorporadas a partir de Mannigel et al (2008).

### 3.3 Síntese da fundamentação teórica

O fluxograma da pesquisa representado na Figura 6 ilustra os procedimentos operacionais e a tendência de a variabilidade espacial dos condicionantes dos processos erosivos obedecerem ao efeito cumulativo.



**Figura 6.** Fluxograma simplificado da proposta metodológica de análise multiescalar de processos erosivos hídricos lineares.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Compartimentação morfopedológica, padrões espaciais de processos erosivos e sua relação com os fatores erodibilidade, cobertura/uso e manejo dos solos.

O CMP Norte compreende coberturas sedimentares pertencentes ao grupo Itararé - Formação Aquidauana, formadas por diamictito, folhelho, arenito vermelho, siltito, e relevo em avançado estágio de dissecação. Nas partes mais elevadas a declividade vai até 8%, com predomínio de Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média. Nos segmentos intermediários a declividade varia de 5 a 12%, com Argissolo Vermelho de textura média, seguidos pelos setores mais rebaixados, com declividades até 3%, baixo gradiente fluvial e ocorrência de Neossolo Flúvico de textura média. O uso predominante é por pastagem que associado a solos pouco profundos, responde por cerca de 34% dos focos, com densidade chegando a 13 focos·km<sup>-2</sup>, e 20% da área das erosões, com a área de contribuição erosiva podendo chegar a 15%, e feições possuindo em média 0,3 ha.

O CMP de Escarpa é uma pronunciada zona de transição de elevado desnível separando o CMP Norte e o relevo tabular mais elevado, e envolve pelo menos seis formações geológicas - Cachoeirinha, Botucatu, Corumbataí, Serra Geral, Irati e Aquidauana. Em relevo esse escalonamento resultou erosão diferenciada configurando cinco patamares. Quando apoiada em uma só formação a declividade varia de 0 a 8% nas porções mais elevadas, vertentes de topos convexos e Latossolo Vermelho ou Cambissolo Háplico de textura média em declives mais acentuados. Passando para posições mais rebaixadas a declividade volta a variar de 0 a 5% com a ocorrência de Argissolo Vermelho de textura argilosa a média. Na superfície mais rebaixada a declividade alcança seu valor máximo para a área - 194% - com a predominância de Neossolo Litólico, perfazendo uma linha de

escarpa. Em função dos solos pouco desenvolvidos, o uso predominante é por pastagem, compreendendo 4% dos focos, com densidade de 1,5 focos·km<sup>-2</sup>, e 2,2% da área das erosões, com área de contribuição erosiva chegando a 5%, e feições possuindo em média de 0,32 ha.

O CMP Centro-Leste ocorre sobre a Formação Cachoeirinha, sendo o mais elevado, menos dissecado, com declividades de 0 a 8%, interflúvios amplos e forma retilínea, com a predominância de Latossolo Vermelho de textura muito argilosa. Nas proximidades das planícies a declividade pode chegar a 12%, e ao longo dos canais de baixo gradiente vai a até 3% e predomínio de Gleissolo Háptico de textura argilosa. Trata-se de um compartimento intensamente utilizado por agricultura motomecanizada, com Soja, Milho, Algodão e, mais recentemente, Cana-de-açúcar. Em função do relevo plano e solos argilosos e bem desenvolvidos abrange 4% dos focos, com densidade de 1,5 focos·km<sup>-2</sup> e 2,5 % da área das erosões, com 2 % de área de contribuição erosiva, e feições tendo área média de 0,46 ha.

O CMP Oeste tem suas porções mais elevadas sobre arenitos eólicos da Formação Botucatu, com declividades de até 8% em interflúvios amplos de bordas convexizadas com o predomínio de Latossolo Vermelho de textura média e Neossolo Quartzarênico Órtico de textura arenosa. Nos segmentos intermediários a declividade vai até 12%, com comportamento retilíneo e o predomínio de Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média. Nas porções mais rebaixadas, acompanhando os canais de baixo gradiente ocorrem Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos de textura arenosa associados a declividades variando de 0 a 3%. É um dos compartimentos com maior ocorrência de focos erosivos lineares inclusive de grande porte. Em função da sua configuração física associada ao uso por pastagens e solo exposto abrange 18% dos focos, com densidade de até 13 focos·km<sup>-2</sup> e 29% da área das erosões, até 25% de área de contribuição erosiva, e feições tendo área média de 0,71 ha.

O CMP Leste é o de menor abrangência na área e se desenvolve sobre a Formação Irati nas altitudes mais elevadas remanescentes em relevo plano com declividade de até 5% e Latossolo Vermelho de textura muito argilosa; Mais abaixo sobre a Formação Aquidauana em interflúvios planos e bordas arredondadas, declividade de até 12% e Neossolo Quartzarênico Órtico de textura arenosa. Entre esses dois ambientes podem ocorrer declividades bastante acentuadas, por vezes configurando escarpas com predomínio de Neossolo Litólico de textura cascalhenta. Ao longo dos canais principais com baixo gradiente predomina Neossolo Flúvico de textura média. Trata-se de um CMP semelhante àquele de Escarpa, porém com erosão natural em menor estágio evolutivo na medida em que se observam dois patamares erosivos. Nos interflúvios mais elevados e plano o uso predominante é por agricultura que associada aos Latossolos reduz substancialmente os impactos erosivos. Entretanto, em posições mais rebaixadas o uso por pastagens sobre Neossolos Quartzarênicos faz que esse CMP compreenda 4% dos focos, com densidade de até 6,5 focos/km<sup>2</sup> e 1,8% da área das erosões, até 5% da área de contribuição erosiva, e feições tendo área média de 0,32 ha.

O CMP Sudeste, apesar de em suas partes mais elevadas envolver as formações Cachoeirinha e Corumbataí, sua quase totalidade ocorre sobre arenitos eólicos da Formação Botucatu, com relevo em franco processo e estágio intermediário de dissecção. Nas porções mais elevadas a declividade varia de 0 a 8% em interflúvios poucos dissecados e Latossolo Vermelho de textura média, passando para interflúvios mais dissecados, de declividades mais acentuadas e ocorrência de Argissolo Vermelho de textura média e mais abaixo para Neossolo Quartzarênico Órtico de textura arenosa. Em função da sua característica envolvendo relevo em acelerado estágio de dissecção, altitudes intermediárias, solos em sua maioria de elevada erodibilidade e uso por pastagem sem manejo adequado se constitui em CMP com elevado potencial de degradação por erosões na medida em que compreende 36% dos focos, com densidade de até 13 focos/km<sup>2</sup> e 44% da área das erosões, até 55% da área de contribuição erosiva, com feições tendo em média 0,55 ha.

O CMP Sul é sustentado por litologias pertencentes à Formação Cachoeirinha que volta a aparecer no extremo sul da área em altitudes menores e corresponde ao compartimento morfogeneticamente mais estável, sendo que as declividades pouco ultrapassam os 5%, de comportamento retilíneo, com o predomínio de Latossolo Vermelho de textura argilosa a muito argilosa e Gleissolo Háptico em áreas mais rebaixadas correspondente aos poucos canais de drenagem de baixo gradiente que ocorrem em meio ao extenso planalto.

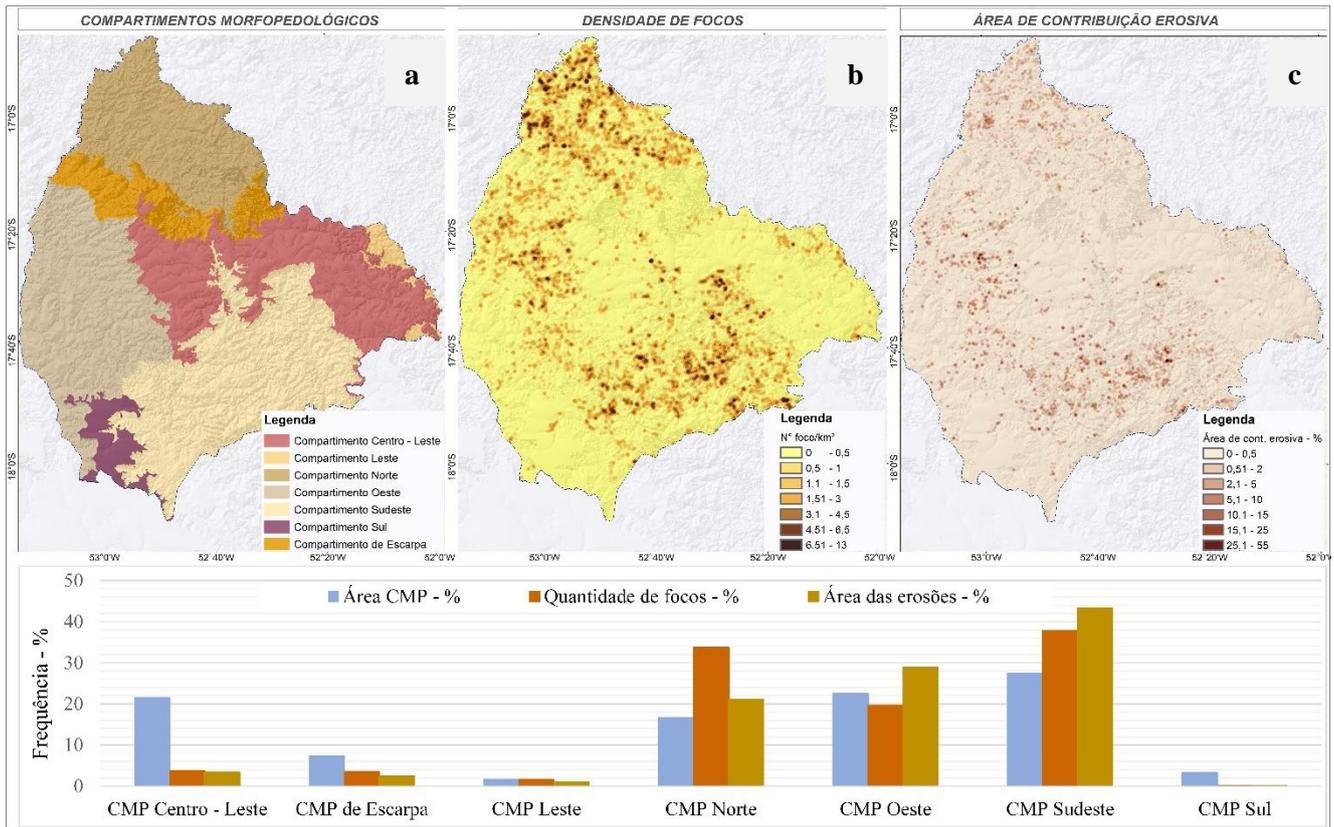
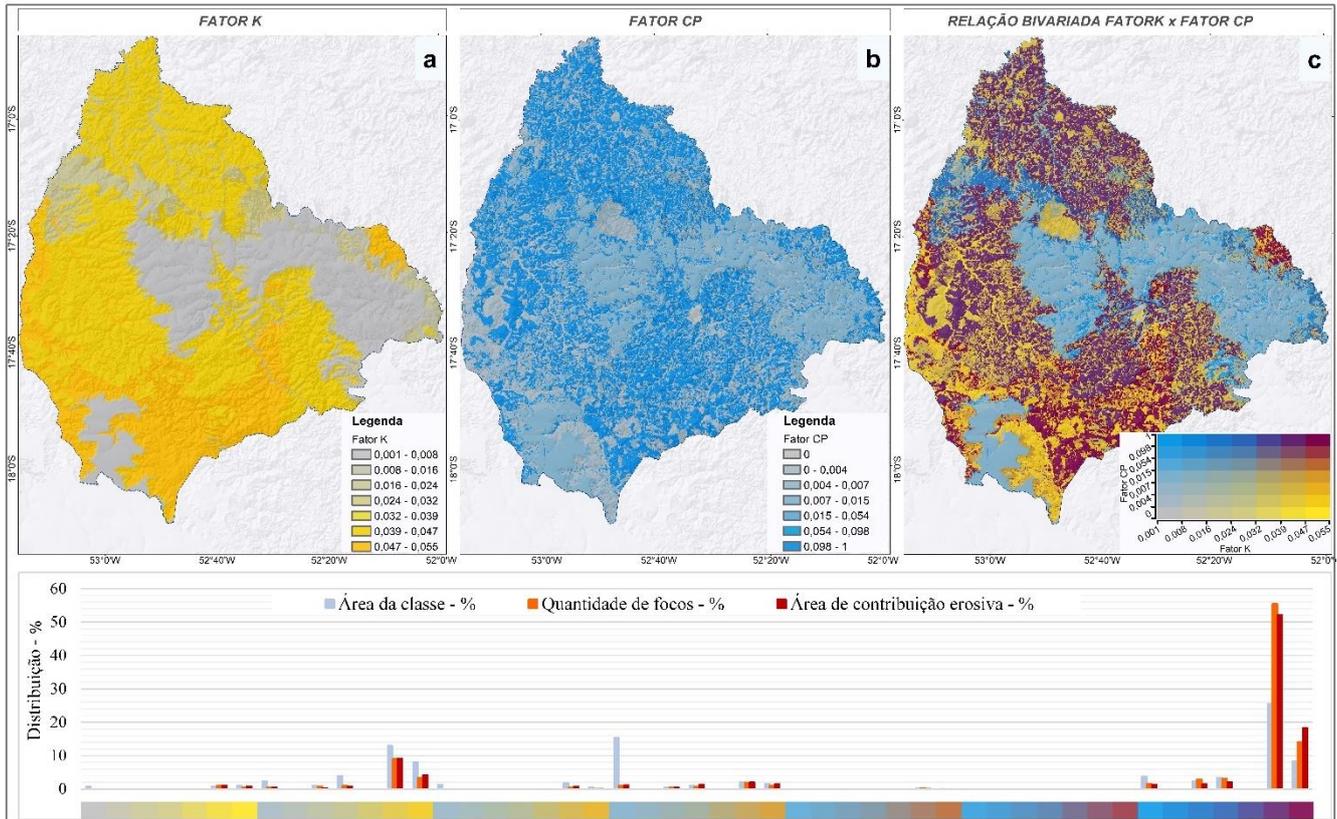


Figura 7. Compartimentos morfopedológicos (a), densidade de focos erosivos (b) e área de contribuição erosiva (c).

Quando se avalia os solos predominantes em cada CMP, sua erodibilidade e sua relação com os tipos de uso e manejo convertidos em fator CP da USLE constata-se novamente distintos padrões comportamentais na ocorrência de processos erosivos (Figura 8).

Os CMPs Sul, Centro-Leste e o da Escarpa, além de conterem solos argilosos, apresentam predominantemente os tipos de uso e manejo mais adequados, com agricultura com terraceamento em nível, evitando assim grande perda de solos. O resultado pode ser conferido na medida em que se observam consideráveis áreas com baixa ocorrência, tanto de focos, quanto de área de contribuição erosiva. A situação tende a mudar quando se observam solos com elevada erodibilidade e sob uso e práticas de manejo que configuram maiores valores de fator CP em que se constata a ocorrência um maior percentual de focos e área de contribuição erosiva (segundo segmento horizontal da legenda bivariada). O efeito atenuante da baixa erodibilidade do solo pode ser verificado na quarta linha da legenda bivariada na qual se observa que, mesmo sob um fator uso e manejo de valores mais elevados, 0,0007 a 0,015, e abrangendo uma considerável área, se constata baixa ocorrência de focos e área de contribuição erosiva.

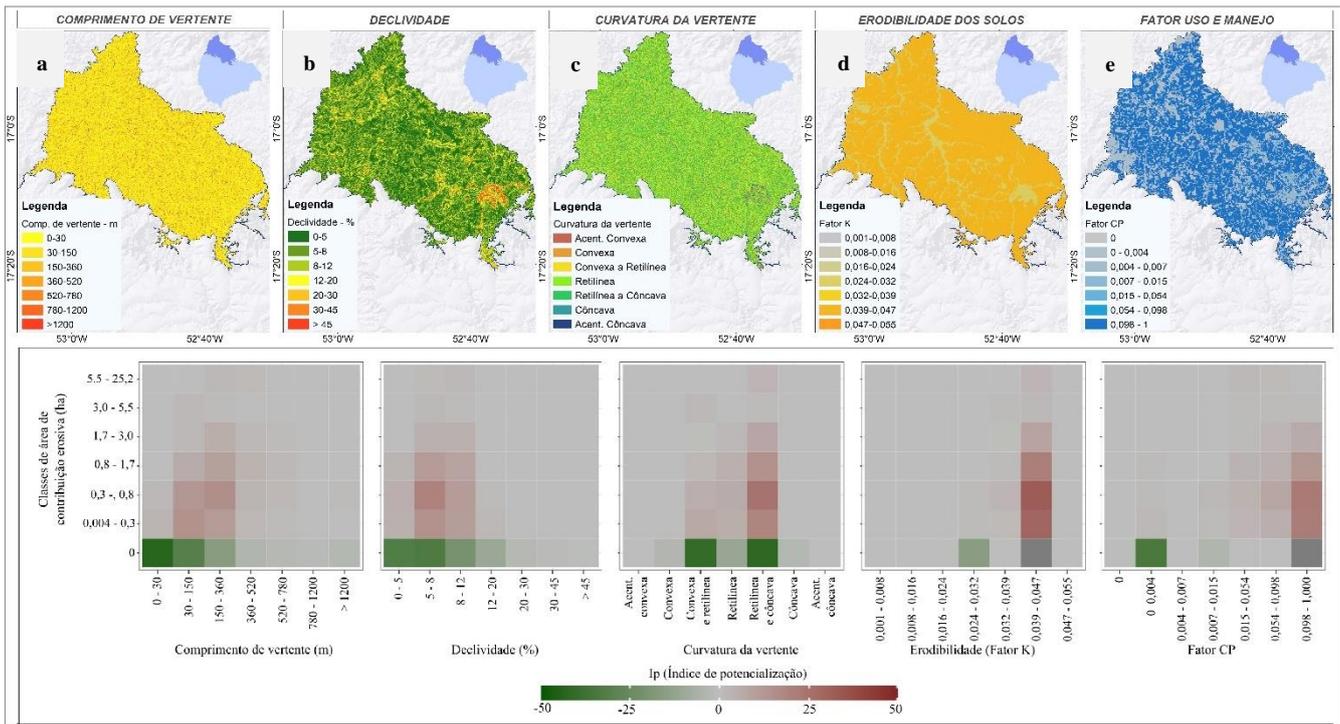
Já os CMPs Norte, Leste, Oeste e Sudeste correspondem aos que concentram maior número de feições erosivas e podem ser divididos em duas situações distintas. Uma de elevada erodibilidade dos solos, mas com baixo valor de fator CP, o que atenua a ocorrência de feições erosivas. Tal situação resulta da ocorrência de solos de textura média e arenosa e tipos de cobertura como remanescentes, especialmente, de formações savânicas, e uso com agricultura. A outra situação resulta de solos com elevada erodibilidade, tais como Argissolos de textura média e, principalmente, Neossolo Quartzarênico de textura arenosa, associados a uso principalmente com Pastagem sem práticas conservacionistas, constituindo situações propícias à ocorrência de processos erosivos inclusive de grandes dimensões. Considerando essa situação destaca-se que duas últimas classes da legenda bivariada compreendem 34% da área de estudo. No entanto, as mesmas respondem por 71% dos focos e 72% de toda a área de contribuição erosiva, evidenciando assim o potencial de degradação resultante de solos arenosos com usos indevidos e sem práticas conservacionistas (Figura 8).



**Figura 8.** Variabilidade espacial da erodibilidade dos solos (a), do fator cobertura/uso e manejo do solo (b) e relação bivariada entre fator K e fator CP (c).

#### 4.2 Configuração morfométrica, morfográfica, pedológica e de cobertura e manejo do solo de cada CMP

Para o CMP Norte (Figura 9), verifica-se que o mesmo apresenta comprimentos de vertente variando, predominantemente, de 0 a 520 m, com os focos erosivos ocorrendo associados a segmentos entre 30 e 360 m. Quanto ao padrão ou classe de erosão, nota-se uma tendência de feições de até 0,8 ha ocorrendo entre 30 e 150 m, e aquelas de até 3 ha se estendendo também até 520 m (parte a), indicando influência dessa variável na magnitude das feições. Quanto à declividade, nota-se o predomínio de terrenos variando de 0 a 12%, com focos erosivos associados, preferencialmente, ao intervalo de 5 a 12% (parte b). Neste intervalo, além de uma preferência maior de erosões, observa-se também uma tendência de aumento das feições na classe de 8 a 12%. O entendimento da relação entre classes de comprimento de vertente, de declividade e ocorrência de padrões erosivos pode ser complementado a partir da análise das classes de curvatura ou forma das vertentes. Em termos de área, este CMP Norte se divide, predominantemente, nas classes com curvatura de 0,8 a 0,03 (Convexa a Retilínea), 0,03 a -0,03 (Retilínea), e de -0,03 a -0,8 (Retilínea a Côncava) (parte c). Em processos erosivos há uma tendência de as menores feições ocorrerem associadas ao segmento Convexo-Retilíneo, o qual resulta de comprimentos de vertente menores, declividade baixa e crescente, o que configura topo e borda de interflúvios. Após o segmento Retilíneo, o que se observa é um elevado percentual de área de contribuição erosiva, resultante especialmente daquelas feições com área maior que 0,8 ha nos segmentos Retilíneo-Côncavos, os quais resultam de maiores comprimentos de vertente, declividades mais elevadas, mas com tendência a redução.



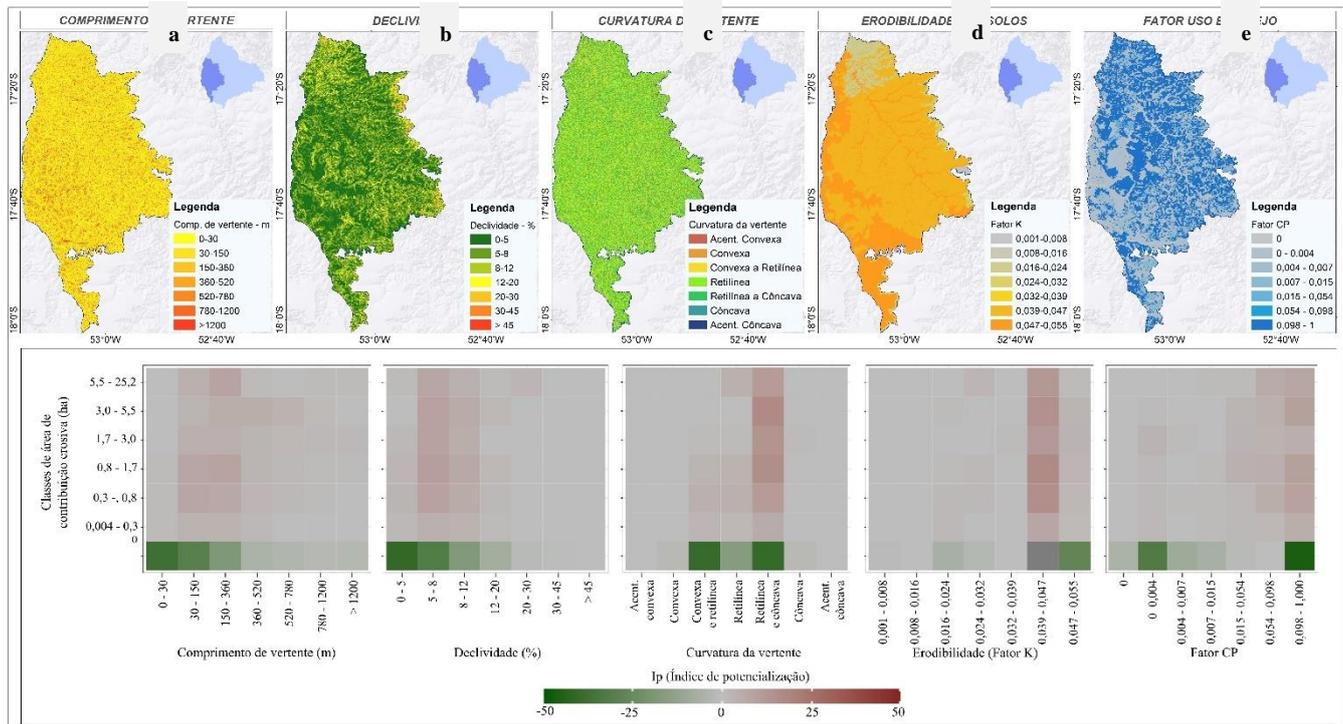
**Figura 9.** CMP Norte - Classes de comprimento de vertente (a), de declividade (b), de curvatura ou forma das vertentes (c), de erodibilidade dos solos (d), de fator CP (e) e respectivas relações entre área de contribuição erosiva e área de classe.

Quanto à influência da erodibilidade dos solos (d) e de uso e manejo (e) observa-se o que já é consagrado pela literatura, *i.e.* a forte concentração de feições erosivas sobre os solos de maior erodibilidade, com tendência de aumento do percentual, em especial das maiores classes de erosões, em áreas de pastagem com ausência de práticas conservacionistas.

Desta feita, compreende-se que no CMP Norte se configura por relevo muito rebaixado, em função do estágio avançado de dissecação, pela pequena dimensão interfluvial, pelos solos pouco desenvolvidos que, sob uso e manejo pouco aptos, ficam expostos a ocorrência de ravinamentos. Os focos erosivos são, em sua maioria, de menor porte – até 1,7 ha da área – com um menor percentual, podendo atingir 3 ha. Aqueles até 0,8 ha, encontram-se associados preferencialmente aos topos e bordas de interflúvios, com comprimento de vertente entre 30 e 150 m, declividades predominando de 5 a 8% e em segmentos com forma variando de Convexa a Retilínea. Quanto aos maiores, com área entre 0,8 e 3 ha, há uma tendência de concentração em segmentos maiores que 150 m, em declividades decrescentes, configurando formas variando de Retilínea a Côncava.

O CMP Oeste (Figura 10), mostra predominância de vertentes de 0 a 780 m, mas com maior ocorrência de segmentos entre 360 e 780 m, se comparado ao CMP Norte. A área de contribuição erosiva tende a se concentrar nos segmentos mais extensos, entre 30 e 360 m, com forte ocorrência de feições acima de 0,3 ha de área. A tendência de feições de maior porte, especialmente em função do comprimento de fluxo, pode ser constatada quando se percebe que as vertentes entre 360 e 780 m comportam feições com área preferencialmente entre 3 e 25,2 ha (a). Quanto à declividade, nota-se o predomínio de terrenos variando de 0 a 12%, mas com forte participação da classe de 0 a 5%, o que o torna mais plano em relação ao CMP Norte. Quanto a área de contribuição erosiva, bem como as feições de grande porte, embora a mesma ocorra no intervalo entre 5 a 12%, a maior parte está entre 5 e 8%, não se observando, portanto, influência do aumento da declividade na magnitude dos focos (b). Em termos de curvatura ou forma das vertentes na área do CMP Oeste se verifica maior predomínio da curvatura de 0,8 a 0,03 (Convexa a Retilínea), e de 0,03 a -0,03 (Retilínea), se comparado ao CMP Norte. Essa configuração resulta de interflúvios mais longos e com bordas com declividades menores, indicando estágio de dissecação menos avançado. Entretanto, no que se refere à área de contribuição erosiva, apenas um pequeno percentual resultante de feições de até 1,7 ha ocorre associado a essas formas indicativas de declividade crescente. A quase totalidade

da área de contribuição resultante, especialmente de feições de grandes dimensões, ocorre associada a segmentos com forma Retilínea – Côncava.



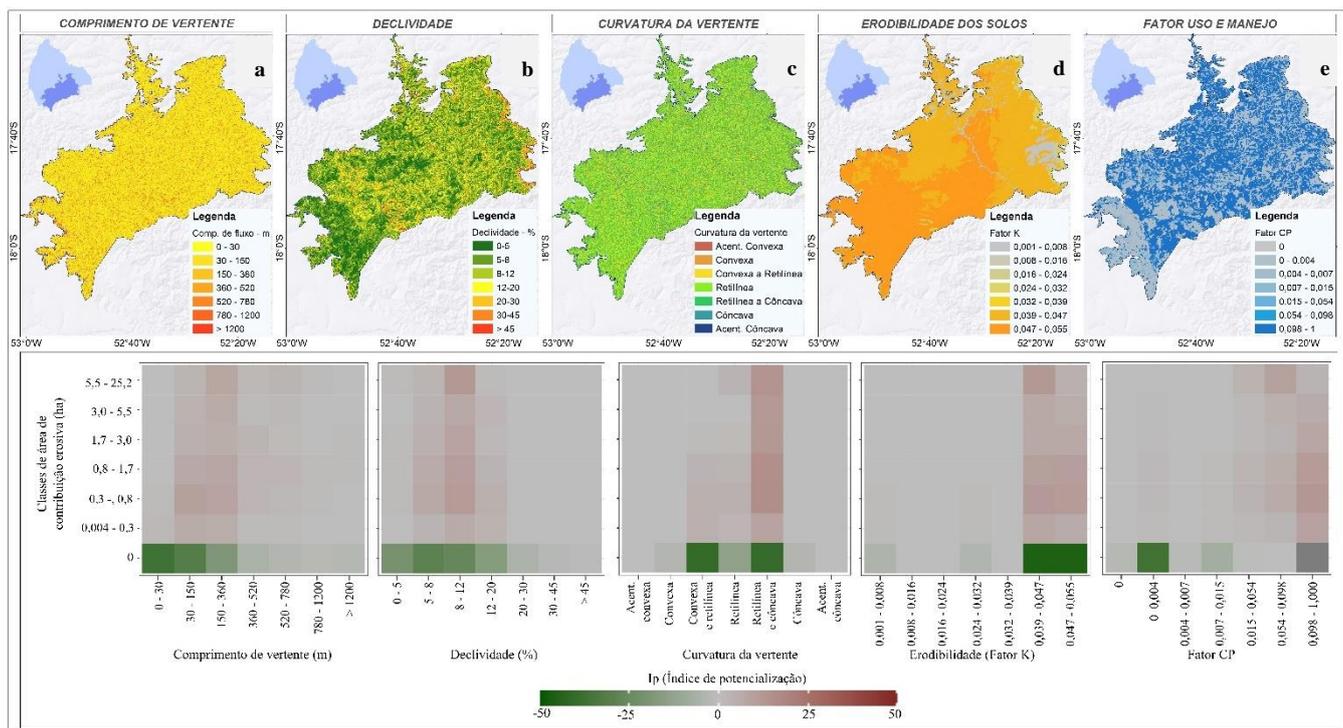
**Figura 10.** CMP Oeste - Classes de comprimento de vertente (a), de declividade (b), de curvatura ou forma das vertentes (c), de erodibilidade dos solos (d), de fator CP (parte e) e respectivas relações entre área de contribuição erosiva e área de classe.

Quanto à erodibilidade, predominam no CMP Oeste solos de elevado fator K resultante da ocorrência de Latossolo Vermelho e Vermelho-Amarelo de textura média, Neossolos Quartzarênico Órtico e Hidromórfico, ambos de textura arenosa. O uso é, em sua maior parte, por pastagens, que em ambiente arenoso e sob trânsito de animais torna esse CMP com fortes tendência à estágios de degradação ainda maiores.

Do exposto, compreende-se que o CMP Oeste se configura por uma morfopedologia de relevo ainda pouco rebaixado, vertentes com segmentos de até 780 m, declividades predominando de 0 a 5% nos topos e comportamento crescente especialmente nas bordas de interflúvios e, portanto, maior presença das formas Convexa a Retilínea e Retilínea. A forma Retilínea – Côncava, resultante da declividade decrescente, ocorre preferencialmente associada aos segmentos entre 360 e 780 m, em declividades entre 5 e 8%, indicando um recuo das vertentes menos pronunciado se comparado ao CMP Norte. Os segmentos mais rebaixados, já concavizados, associados a solos de elevada erodibilidade e sob uso e manejo inadequados responde pelo elevado percentual de área de contribuição erosiva, bem como pela maior magnitude dos focos. Já os segmentos mais elevados e ainda com o predomínio das formas Convexa a Retilínea e Retilínea indicam a forte tendência deste CMP a um estágio crescente de voçorocamento.

Para o CMP Sudeste (Figura 11), verifica-se predominância de vertentes de 0 a 780 m, com destaque para os segmentos entre 30 e 150 m, indicando franco processo, e de 360 a 780 m, indicando forte predisposição à dissecação o que confere características intermediárias entre os CMPs Norte e Oeste, respectivamente. A área de contribuição erosiva resultante de focos com até 0,8 ha tende a se concentrar em segmentos entre 30 e 150 m, enquanto aquela de 0,8 a 25,2 ha se encontra associada a segmentos maiores que 150 m, especialmente entre 520 a 780 m, indicando a influência dos maiores comprimentos de vertente na área e porte das feições erosivas, respectivamente (parte a). Quanto à declividade, nota-se o predomínio de terrenos variando de 0 a 20% e ocorrência mais pronunciada da classe de 20 a 30%, o que corrobora como CMP em processo acelerado e estágio intermediário de dissecação. A área de contribuição erosiva, bem como as feições, embora se perceba uma notável participação na classe de 5 a 8% para focos de até 1,7 ha, destaca-se que o maior percentual da área de contribuição,

bem como as feições de grande porte ocorrem associadas a classe de 8 a 12%, o que indica a influência de declividades maiores tanto na área de contribuição, quanto na magnitude dos focos (parte b). Da associação entre comprimento de vertente e declividade depreende-se que o acelerado processo, bem como o estágio intermediário de dissecação influenciam na magnitude dos processos erosivos, uma vez que há forte tendência da associação de grande percentual de área de contribuição, bem como de focos maiores aos segmentos mais extensos e inclinados das vertentes. Em termos de curvatura ou forma das vertentes na área do CMP Sudeste se verifica uma distribuição muito igual entre intervalos de 0,8 a 0,03 (Convexa a Retilínea), e de -0,03 a -0,8 (Retilínea a Côncava). Para as feições de até 0,8 ha se verifica ocorrência preferencial nos segmentos Convexo – Retilíneo e Retilíneo, como já evidenciado pela análise do comprimento de vertente e declividade. Para os focos com área maior que 0,3 ha nota-se uma forte concentração tanto de área quanto de maior magnitude das feições nos segmentos Retilíneo – Côncavo.



**Figura 11.** CMP Sudeste - Classes de comprimento de vertente (a), de declividade (b), de curvatura ou forma das vertentes (c), de erodibilidade dos solos (parte d), de fator CP (e) e respectivas relações entre área de contribuição erosiva e área de classe.

Em relação à erodibilidade, o CMP Sudeste se mostra mais erodível, uma vez que é o único dos CMPs no qual os solos se concentram nas maiores classes de fator K. Essas classes resultam da ocorrência Argissolo Vermelho de textura média e Neossolo Quartzarênico Órtico e Hidromórfico de textura arenosa. Em função do seu franco processo de rebaixamento e estágio intermediário de dissecação, este CMP se destaca pelo fato de sua morfopedogênese estar associada aos arenitos eólicos da Formação Botucatu. Esse CMP se encontra em acelerado processo e elevado estágio de degradação, uma vez que aí se encontra elevada área de contribuição erosiva resultante, em sua maior parte, de focos de grandes dimensões associados ao uso em sua maior parte por solo exposto e pastagens sem manejo.

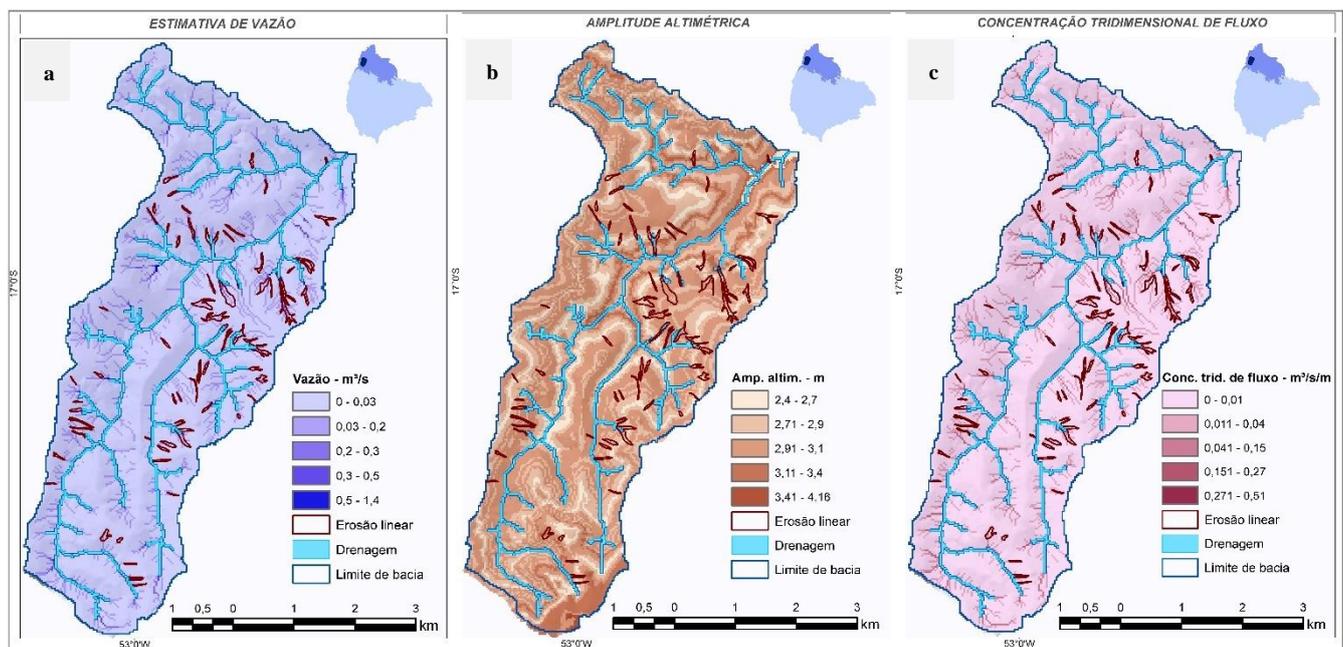
Do exposto, compreende-se que no CMP Sudeste se configura por uma morfopedologia com características intermediárias entre os CMPs Norte e Oeste. Nele ainda predominam vertentes longas, mas com maior ocorrência de declividades de 8 a 20%, indicando processo acelerado e estágio intermediário de dissecação. Resultado disso é uma distribuição mais equilibrada de área nos segmentos Convexo – Retilíneo e Retilíneo – Côncavo. O predomínio de solos profundos, arenosos e com uso predominante por pastagens, quando não solo exposto, em relevo com acelerado processo e em estágio intermediário de rebaixamento confere a esse CMP acelerado estágio de degradação tendendo a permanecer assim por longo período.

#### 4.3 Comportamento tridimensional da intensidade de fluxo no sistema vertente e ocorrência de feições erosivas

O padrão de área, bem como magnitude das feições erosivas em cada uma dessas unidades pode ser melhor avaliado a partir da relação entre o escoamento superficial e o comportamento das formas avaliado pela amplitude altimétrica ao longo das vertentes. Com base no exposto o que se verifica é uma forte relação entre o potencial erosivo de cada CMP e a intensidade do comportamento tridimensional de fluxo, necessária ao surgimento de processos erosivos. Isso implica em afirmar que cada CMP apresenta uma média de limite preferencial quanto a convergência tridimensional de fluxo para a deflagração de processos erosivos.

##### 4.3.1. Comportamento tridimensional de fluxo e feições erosivas em vertentes do CMP Norte

Para as vertentes representativas do CMP Norte as estimativas de vazão variaram de 0 a 1,4  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (Figura 12 a) associadas a amplitudes variando de 2,4 a 4,18 m (Figura 12 b). Quanto aos segmentos preferenciais os dados apontam para médias de 0,049  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  de escoamento superficial, e 2,87 m de amplitude para a ocorrência de erosões. Aqui já se nota que a média de escoamento associado a erosões é bem inferior ao valor máximo da baixa vertente, e que a amplitude altimétrica preferencial também tende a se mostrar de baixa a média. Quanto a concentração tridimensional de fluxo a mesma variou de 0, no topo dos interflúvios, a 0,51  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  nos segmentos de maior vazão e menor amplitude altimétrica (Figura 12 c). Para a bacia representativa deste CMP as erosões ocorrem associadas em um intervalo de 0,004 a 0,017  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ . Trata-se de um valor muito abaixo daquele registrado nos segmentos mais rebaixados, de menor amplitude e acentuadamente côncavos das vertentes. Entende-se que corresponde a um intervalo crítico, pois marca a passagem das áreas mais elevadas – de maior predominância – para as áreas já rebaixadas de pouca ocorrência.

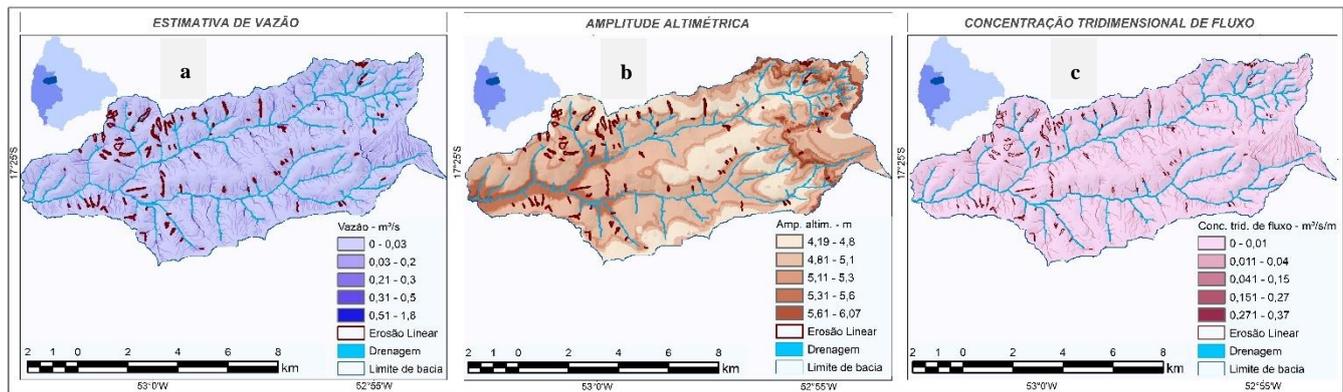


**Figura 12.** CMP Norte - Estimativa de vazão (a); amplitude altimétrica (b) e concentração tridimensional de fluxo (c) para bacia representativa.

##### 4.3.2. Comportamento tridimensional de fluxo e feições erosivas em vertentes do CMP Oeste

Para as vertentes representativas do CMP Oeste as estimativas de vazão variaram de 0 a 1,8  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  associadas a amplitudes variando de 4,19 a 6,07 m. Quanto aos segmentos preferenciais os dados apontam para médias de 0,044  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  de escoamento superficial e 4,98 m de amplitude para a ocorrência de erosões. Quanto à concentração tridimensional de fluxo a mesma variou de 0, no topo dos interflúvios, a 0,37  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  nos segmentos de maior vazão e menor amplitude altimétrica. Para a bacia representativa deste CMP as erosões ocorrem associadas em um intervalo de 0,0018 a 0,009  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ , indicando que no CMP Oeste as feições erosivas ocorrem em situações

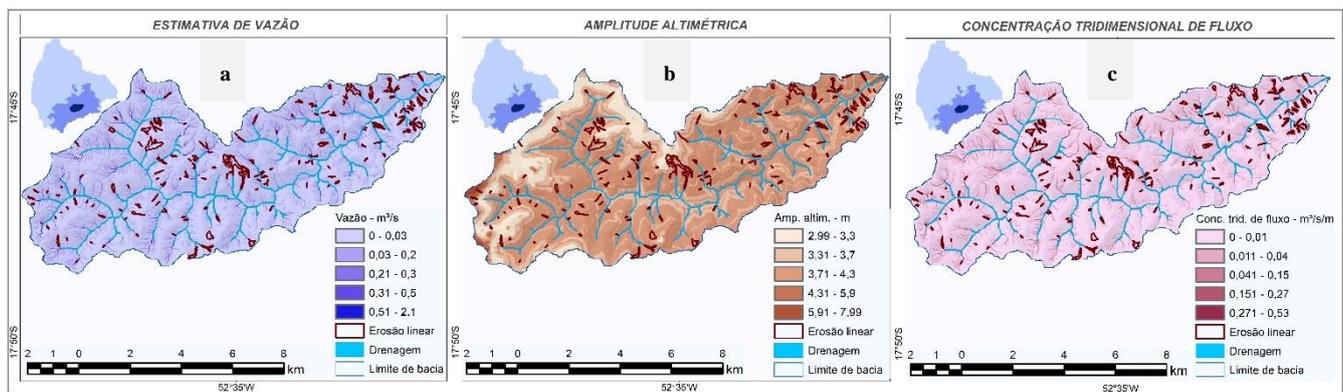
de baixa intensidade de fluxo, sendo um reflexo direto das condições de maior erodibilidade de seus sistemas pedológicos.



**Figura 13.** CMP Oeste - Estimativa de vazão (a); amplitude altimétrica (b); e concentração tridimensional de fluxo (c) para bacia representativa.

#### 4.3.3. Comportamento tridimensional de fluxo e feições erosivas em vertentes do CMP Sudeste

Quanto as vertentes representativas do CMP Sudeste as estimativas de vazão variaram de 0 a 2,1 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> associadas a amplitudes variando de 2,99 a 7,99 m. Quanto aos segmentos preferenciais os dados apontam para médias de 0,056 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> de escoamento superficial e 3,74 m de amplitude para a ocorrência de erosões, demonstrando novamente a tendência de ocorrência erosiva em segmentos de maior para menor amplitude altimétrica no contexto da bacia. Quanto à concentração tridimensional de fluxo a mesma variou de 0, no topo dos interflúvios, a 0,53 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup> nos segmentos de maior vazão e menor amplitude altimétrica. Para a bacia representativa deste CMP as erosões ocorrem associadas em um intervalo de 0,002 a 0,015 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>, indicando que no CMP Sudeste as feições erosivas ocorrem também em situações de baixa intensidade de fluxo, sendo também um reflexo direto das condições de maior erodibilidade de seus sistemas pedológicos.



**Figura 14.** CMP Sudeste - Estimativa de vazão (a); amplitude altimétrica (b); e concentração tridimensional de fluxo (c) para bacia representativa.

## 5. Conclusões

Para todas as vertentes representativas de cada um desses CMP há ocorrência de focos erosivos em segmentos de convergência lateral e passagem de alta para baixa amplitude altimétrica, portanto, forte convergência tridimensional de fluxo, indicando um bom desempenho da relação chuva, morfopedologia e escoamento superficial sob a orientação do conceito de distribuição de energia ou variação de entropia de sistemas na previsão de ocorrência erosiva.

Ressalte-se que esses segmentos de mudança de gradiente altimétrico ocorrem dentro dos segmentos de vertente onde se nota a redução da declividade, que configura a forma Retilínea – Côncava. Portanto, trata-se de

uma questão de escala de análise, com envolvimento de variáveis importantes na relação chuva – intensidade – comportamento do escoamento superficial, o que confere maior assertividade na escala de vertente.

Quanto à maior ou menor intensidade da concentração tridimensional de fluxo, bem como da magnitude das feições erosivas, trata-se de um reflexo direto das características morfopedológicas de cada compartimento. Aqueles com solos menos desenvolvidos, ainda que a textura varie de arenosa a cascalhenta, a exemplo dos Neossolos Litólicos, tendem a demandar maiores volumes de escoamento superficial para o desenvolvimento de feições do tipo ravinas. Enquadram-se nessa situação os CMP Norte e, principalmente de Escarpa. Já aqueles mais profundos, a exemplo de Latossolo e Argissolo Vermelhos, ambos de textura média, e, principalmente, Neossolos Quartzarênicos órticos de textura arenosa, requerem pequenos volumes de escoamento superficial para o desenvolvimento de feições do tipo voçorocas. São sistemas que tendem a evoluir mais rapidamente para um estado de melhor equilíbrio, maior entropia. Enquadram-se nessa situação os CMP Oeste e, principalmente, Sudeste.

Quanto à dinâmica do processo, sua deflagração depende da incidência de fluxo nos segmentos que marcam o recuo de menor para maior gradiente. Sua evolução e magnitude dependem da manutenção do gradiente, bem como profundidade do solo à montante do segmento de início o que, em situações propícias, leva as incisões ao processo de erosão remontante, resultando em grandes voçorocas.

Há que se destacar que, seja no sistema termodinâmico, seja no sistema geomorfológico, o curso da variação de energia é marcado pelo fluxo e transferência de energia, sendo que a tendência ao equilíbrio em ambos é marcada pela troca de energia entre as partes de menor para maior entropia. No relevo essa troca de energia é especialmente significativa, uma vez que no sistema vertente e em condições de estabilidade tectônica, há uma tendência de recuo paralelo das vertentes, resultando no processo de concavização e posterior aplanamento, cujo processo se dá de jusante para montante. Estágio mais avançado de transferência de massa e menor energia envolvida se verifica nos segmentos já rebaixados, acentuadamente côncavos, onde o baixo gradiente aponta para um estágio avançado de evolução.

Em síntese, pode-se afirmar que o sequenciamento de estudo multiescalar, i.e., em diversas escalas sucessivas de aproximação permite identificar e quali-quantificar os padrões dos ambientes propícios ao desenvolvimento de processos erosivos hídricos lineares. O grande desafio é a avaliação e escolha das variáveis mais adequadas, uma vez que seu comportamento tangencia e permite compreender uma relação essencial para a ocorrência do fenômeno de erosão, ou seja: energia – resistência do solo à desagregação e transporte.

**Contribuição dos autores:** E.D.N. – concepção, proposição metodológica, levantamento, tratamento e curadoria dos dados, redação inicial. S.S.C. – orientação, revisão e escrita. Os autores, indistintamente, participaram das discussões acerca da proposta metodológica, análise dos dados, bem como da realização dos trabalhos de campo destinados ao melhor detalhamento dos mapas e validação das feições erosivas.

**Financiamento:** Este trabalho é síntese da tese de doutoramento do primeiro autor, financiada pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior) por meio da concessão da bolsa de doutorado.

**Agradecimentos:** Agradecimento especial ao Geógrafo e Professor Dr. Édipo Henrique Cremon do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás pelas sugestões nas representações gráficas.

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

## Referências

1. AB'SABER, A. N.; COSTA JÚNIOR, M. Contribuição ao estudo do Sudoeste Goiano. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo, v. 2, n. 4, p. 3-26, 1950. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/1402>. Acesso em: 23 de março de 2023.
2. ALVES, W. S. et al. Análise da fragilidade ambiental da bacia do ribeirão das Abóboras, em Rio Verde, Sudoeste de Goiás. **Revista Internacional de Ciencia y Tecnologia de La Información Geográfica**, n. 19, p. 81-108, 2017. DOI: 10.21138/GF.556
3. BARBALHO, M. G. da S. **Morfopedologia aplicada ao diagnóstico e diretrizes para o controle dos processos erosivos lineares na alta bacia do rio Araguaia (GO/TO)**. 2002. 140 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Sócioambientais, Universidade Federal de Goiás, 2002.

4. BATTY, M. Modeling and Simulation in Geographic Information Science: Integrated Models and Grand Challenges. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 21, p. 10 – 17, 2011. DOI: [10.1016/j.sbspro.2011.07.003](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.07.003)
5. BERTOLINI, W. Z. O conceito de equilíbrio em geomorfologia: perspectivas teóricas e metodológicas para sua avaliação. **Revista Geonorte**, edição especial, v. 1, n. 4, p. 33-45, 2012.
6. BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. da. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In VITTE, A. C; GUERRA, A, J. T. (Org.). **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2004. p. 153 - 188.
7. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL, **Folha SD.22, Goiânia: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1983. p. 349-412, 1983.
8. CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Compartimentação morfopedológica e sua aplicação: considerações metodológicas. **GEOUSP, Espaço e Tempo**, v. 4 n. 1, p. 27-37, 2000. DOI: [10.11606/issn.2179-0892.geousp.2000.123401](https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2000.123401)
9. CHORLEY, R. J. Geomorphology and General Systems Theory. In **Theoretical Papers in the Hydrology and Geomorphology Sciences**, 1962. p. 1 - 9.
10. CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical Geography: a system approach**. London: Prentice Hall, 1971.
11. CRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Edit. da Universidade de São Paulo, 1979. 106 p.
12. CRISTOFOLETTI, A. L. H. Sistemas Dinâmicos: As Abordagens da Teoria do Caos e da Geometria Fractal em Geografia. In VITTE, A. C; GUERRA, A, J. T. (Org.). **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2004. p. 89 - 110.
13. CRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999. 236 p.
14. COELHO NETTO, A.L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In. GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 93-148.
15. COELHO NETTO, A.L. Evolução de cabeceiras de drenagem no médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): bases para um modelo de formação e crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n, p. 69-100, 2003. DOI: [10.20502/rbg.v4i2.25](https://doi.org/10.20502/rbg.v4i2.25)
16. CREMON, É. H.; BETTIOL, G. M.; MAGNA JUNIOR, J. P. M.; MACEDO, F. C.; RABELO, M. W. O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 3, p. 536–546, 2022. DOI: [10.14393/rbcv74n3-60846](https://doi.org/10.14393/rbcv74n3-60846)
17. CREMON, É. H.; PEREIRA, A. L.; PAULA, L.D.L.; NUNES, E.D. Geological and terrain attributes for predicting soil classes using pixel- and geographic object-based image analysis in the Brazilian Cerrado. **Geoderma**, v. 401, 115315, 2021. DOI: [10.1016/j.geoderma.2021.115315](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115315)
18. CRUZ, O. **Estudo dos processos geomorfológicos do escoamento pluvial na área de Caraguatuba – S. Paulo**. 1982. 151 p. Tese (Livre Docência) - FFLCH-USP, S. Paulo, 1982.
19. DRAGO, V. A. et al. Contribuição ao estudo geológico do vale do Rio Araguaia. In: **Simpósio de Geologia do Centro-Oeste**, 1, 1981, Goiânia. **Ata...Goiânia**: SBG, 1981, p. 404 - 421.
20. DYLIC, J. Notion du versant en Geomorphologie. **Bulletin de L' Academie Polonaise des Sciences**. Série de Sciences Geol. et Geogr., n. 2, v. 16, p. 125-132, 1968.
21. HAWKER, L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, 2022. DOI: [10.1088/1748-9326/ac4d4f](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f)
22. GILBERT, G. K. **The transportation of debris by running water**. U.S.G.S., Prof. Paper, 1914, 262 p.
23. HAMELIN, L. E. **Géomorphologie: géographie globale-géographie totale**. Cahiers de Géographie de Québec. V. VIII, n. 16, p. 199-218. Tradução de A. Cristofolletti. **Not. Geomorfológica**, 13/14, p. 3-22, Campinas, 1964.
24. LATRUBESSE, E. M.; CARVALHO, T. M. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio, 2006. 127 p.
25. LACERDA FILHO, J. V. de; FRASCA, A. A. S. Compartimentação geotectônica. In: MOREIRA, M. L. O. et al. (Org.). **Geologia do Estado de Goiás e do Distrito Federal**. Goiânia: CPRM/SIC-FUNMINERAL, 2008. 143 p.
26. LEOPOLD, L. B.; LANGBEIN, W. B. **The Concept of Entropy in Landscape Evolution**. Geological Survey Professional Paper 500-A, 1962, 26 p.
27. MANNIGEL, A. et al. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 24, n. 5, p. 1335 - 1340. 2002. DOI: [10.4025/actasciagron.v24i0.2374](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374)
28. MARINHO, G.V.; CASTRO, S. S. Estudo de piezometria com ênfase aos processos de voçorocamento na alta bacia do rio Araguaia/GO. In: CBCS, XXIX, 2003, Ribeirão Preto. **Anais... CDRM**.
29. MARQUES, J. S. Ciência Geomorfológica. In GUERRA, A. J. T; CUNHA, S. B. da. (Org.). **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. 7ª Edição. São Paulo: Editora Bertrand Brasil, 1994. p. 23 - 45.

30. MATTOS, R. S.; VEIGA, A. Otimização de entropia: Implementação Computacional dos Princípios Maxent e Minxent. **Scielo Brazil**, 2002. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382002000100003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382002000100003)>. Acesso em: 22 mar. 2007.
31. MATTOS, S. H. V. L.; PEREZ FILHO, A. Complexidade e estabilidade em sistemas geomorfológicos: uma introdução ao tema. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5 n.1, p. 11-18, 2004. DOI: [10.20502/rbg.v5i1.28](https://doi.org/10.20502/rbg.v5i1.28)
32. MENEZES, M. L. N., et al. Caracterização das formações superficiais em uma vertente do córrego do Quebra – Depressão de Gouveia – MG. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, (SINAGEO), 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UGB. 2006. P. 1 – 11.
33. MITASOVA, H. et al. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 10, n. 5, p. 629 - 641, 2006. DOI: [10.1080/02693799608902101](https://doi.org/10.1080/02693799608902101).
34. MONTEIRO, C. A. F. Notas para o estudo do clima do Centro-Oeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 13, n. 1, 1951. p. 3 - 46. Disponível em: < [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg\\_1951\\_v13\\_n1.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg_1951_v13_n1.pdf)> Acesso em 22 de junho de 2022.
35. MOREIRA, C. V. R; FERREIRA, O. C; JUNIOR, P. P. M. Aplicação da Termodinâmica para a Avaliação do Equilíbrio das Redes Fluviais - a Bacia do Rio Santo Antônio. n. 36, **Economia e Energia**, 2003. Disponível em: <<http://ecen.com/eee36/termodinamc.htm>> Acesso em: 22 nov. 2022.
36. MOREIRA, M. L. O. et al. (Orgs.). **Geologia do estado de Goiás e Distrito Federal: texto explicativo do mapa geológico do estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia: CPRM; SIC - FUNMINERAL, 2008. 143 p.
37. MOTTI, P.; SILVA, T. C. **A Cartografia das Formações Superficiais no Instituto de Geociências da UFBA**. Universitas, Salvador, v. 23, p. 91 – 98, 1978.
38. NIMER, E. Climatologia da Região Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, ano 34, n. 4, p. 3-30, 1972. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg\\_1972\\_v34\\_n4.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg_1972_v34_n4.pdf)>. Acesso em 22 de junho de 2020.
39. NRCS - National Resources Conservation Service. **Estimation of direct Runoff from Storm Rainfall**. **National Engineering Handbook**, chapter 10. Washington D. C: Department of Agriculture, USDA, 2004. 79 p.
40. NUNES, E.D. **Modelagem de processos erosivos hídricos lineares no município de mineiros - GO**. 2015. 242 p. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
41. NUNES, E. D.; BORBA, L. L. Avaliação dos efeitos do adensamento urbano na dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas – Aparecida de Goiânia – GO. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 38, n. 2, p. 205 – 226, 2018. DOI: [10.5216/bgg.v38i2.54617](https://doi.org/10.5216/bgg.v38i2.54617)
42. NUNES, E. D.; ROSA, L. E. Compactação e impermeabilização do solo e implicações nos canais fluviais urbanos. **Mercator**, v. 19, 9. 1 – 17, 2020. DOI: [10.4215/rm2020.e19023](https://doi.org/10.4215/rm2020.e19023)
43. NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. Compartimentação morfopedológica aplicada à distribuição de padrões espaciais de processos erosivos em solos frágeis - Município de Mineiros, GO. In. CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. **Solos Frágeis: Caracterização, manejo e sustentabilidade**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 293 - 324.
44. NUNES, E. D.; CASTRO, S. S. Degradação de fitofisionomias do Cerrado e impactos erosivos hídricos lineares no sudoeste de Goiás. **Sociedade & Natureza**, v. 33, n. e60606, p. 1 - 14, 2021. DOI: [10.14393/SN-v33-2021-60606](https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-60606)
45. OLIVEIRA, L. F. C. et al. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, n. 1, p. 13 – 18, 2005.
46. OLIVEIRA, J. S. **Avaliação de modelos de elevação na estimativa de perda de solos em ambiente SIG**. 2012. 103 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
47. PASSOS, J. C. A importância do trabalho de Carnot para o ensino da Termodinâmica. In: COBENGE, XXXI, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Disponível em < <http://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/16/artigos/OUT010.pdf> > Acesso em: 22 jun. 2023.
48. SANTOS, D. L. dos. et al. Atributos Bioquímicos do Solo Sob Diferentes Sistemas de Produção no Sudoeste Goiano. **Global Science and Technology**, v. 8, n. 2, p. 74-86, 2015. [https://doi.org/ 10.14688/1984-3801/gst.v8n2p74-86](https://doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v8n2p74-86)
49. PINTO, H. E.; WANDER, A. E. A formação econômica do Sudoeste Goiano e suas implicações à luz da teoria dos custos de transação. **Revista Eletrônica de Economia da Universidade Estadual de Goiás**, v. 12, n. 02, p. 29-41, 2016. DOI: [10.5281/zenodo.5562864](https://doi.org/10.5281/zenodo.5562864)
50. QUEIROZ NETO, J. P. O estudo de formações superficiais no Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v.22, n. 1/2, p. 65-78, 2001. DOI: [10.5935/0100-929X.20010003](https://doi.org/10.5935/0100-929X.20010003)

51. RESENDE, A. de. Estudo do Processo de Voçorocamento na Bacia do Córrego Capivara - Alta Bacia do Rio Araguaia, em Minas Gerais (GO). 2003. 148 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2003.
52. SANTOS, H. G. dos. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Brasília: EMBRAPA, 2018, 356 p.
53. SCHWAB, G. O.; FANGMEIER, D. D.; ELLIOT, W. J.; FREVERT, R. K. **Soil and water conservation engineering**, John Wiley & Sons., Chichester, 528 p. 1993. DOI: [10.1017/S0021859600068611](https://doi.org/10.1017/S0021859600068611)
54. SILVA, S. C. da; SANTANA, N. M. P. de; PELEGRINI, J. C. **Caracterização climática do Estado de Goiás**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 133 p.
55. SIMÕES, M. L., et al. Distribuição espacial de formações superficiais geneticamente associadas a rochas siliclásticas – Planalto do Espinhaço Meridional (MG) – Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 28, n. 1, p. 161 – 170, 2016. DOI: [10.1590/1982-451320160111](https://doi.org/10.1590/1982-451320160111)
56. STEIN, D. P.; DONZELLI, P.; GIMENEZ, A.F.; PONÇANO, W.L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar natural e antrópica na bacia do Peixe-Parapanema. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 4, Marília, 1987. **Anais...**, Marília, p. 105-135.
57. STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952. DOI: [10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
58. TRICART, J. Mise en point: l'évolution des versants. **L'information géographique**, v. 21, p. 108 - 15, 1957.
59. UFV; RURALMINAS. **Plano Diretor da Bacia do Rio Paranaíba**. Viçosa: UFV, 2005. Mapa de solos 1:250.000. Disponível em: < <http://www.sieg.go.gov.br/siegdwnloads/> >. Acesso em 5 mar. 2023.
60. VILLATE, J. E. **Introdução aos Sistemas Dinâmicos: Uma abordagem Prática com Máxima**. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto - Portugal, 2006.
61. ZHAO, W. et al. Digital Elevation model-based watershed geomorphic entropy for the study of landscape evolution of a watershed geomorphic system in the loess landform of China. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 41, n. 2, p. 139 - 153, 2016. DOI: [10.1177/0309133316669091](https://doi.org/10.1177/0309133316669091)
62. ZDENKOVIC, L. M; SCHEIDEGGER, E. A. Entropy of landscapes. **Zeitschrift Fur Geomorphology**. Berlin-Stuttgart, 1989. p. 361 - 371.



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.