

DETERMINAÇÃO E REPRESENTAÇÃO CARTOGRÁFICA DAS CAMADAS DE PROTEÇÃO (FATOR O) PELO MÉTODO COP NA ALTA BACIA DO RIO CORRENTE (GO): ADAPTAÇÃO PARA SOLOS TROPICAIS

Determination and cartographic representation of the protection layers (factor O) using the COP method in the Upper Corrente River Basin (GO): adaptation for tropical soils

Olavo Amancio de Oliveira

Doutor em Geografia pela Universidade de Brasília – UNB, Brasil

olavotop@gmail.com

Rogério Uagoda

Geógrafo, Doutor em Ciências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, professor titular do Departamento de Geografia da Universidade de Brasília – UNB, Brasil

rogeriouagoda@unb.br

Recebido: 04/09/2025

Aceito: 12/11/2025

Resumo

O estudo analisa a Alta Bacia do Rio Corrente (ABHRC), no Nordeste Goiano, inserida no Sistema Aquífero Bambuí. O objetivo foi determinar as camadas de proteção (Fator O) pelo método COP, propondo uma adaptação para solos tropicais brasileiros, incorporando a estrutura do solo como parâmetro fundamental. A metodologia integrou dados geológicos, pedológicos e de 26 poços tubulares no ambiente SIG. Os resultados mapearam cinco classes de proteção: as classes, muito baixa (12%) e baixa (21%) situam-se no centro-oeste; a moderada é a mais representativa da bacia (38%); e as classes alta (19%) e muito alta (10%), ocorrem ao sul, onde predominam Latossolos espessos e estruturados. A quantificação demonstrou que índices baixos coincidem com áreas de carstificação intensa. A adaptação mostrou-se satisfatória para identificar a capacidade de atenuação natural, fornecendo subsídios essenciais para a gestão hídrica regional e o ordenamento territorial.

Palavras-chave: Método COP, camadas sobrepostas, estrutura do solo, ambiente cárstico.

Abstract

The study analyses the Upper Corrente River Basin (ABHRC), located in Northeast Goiás, within the Bambuí Aquifer System. The objective was to determine the protection layers (Factor O) using the COP method, proposing an adaptation for Brazilian tropical soils by incorporating soil structure as a fundamental parameter. The methodology integrated geological and pedological data, along with information from 26 tube wells, within a GIS environment. The results mapped five protection classes: very low (12%) and low (21%), situated in the central-west; moderate, the most representative of the basin (38%); and high (19%) and very high (10%), occurring in the south, where thick and structured Oxisols predominate. The quantification demonstrated that low indices coincide with areas of intense karstification. The adaptation proved satisfactory for identifying the capacity for natural attenuation, providing essential support for regional water management and territorial planning.

Keywords: COP method, overlapping layers, soil structure, karstic environment.

1. INTRODUÇÃO

A paisagem cárstica, de acordo com Ford e Williams (2007), é conhecida por seu estilo peculiar, no qual se encontram cavernas e um sistema único de água subterrânea que se desenvolve em rochas solúveis. O sistema cárstico é caracterizado, sobretudo, pelos processos de dissolução das rochas carbonáticas, incluindo calcários, dolomitos e mármore, quando em contato com águas de precipitação, naturalmente ácidas (Ford; Williams, 2007). Mundialmente, as áreas cársticas desempenham papel importante, uma vez que estão associadas a terras férteis e de boa qualidade, além de manterem grande relevância para o abastecimento de água potável.

Segundo Goldscheider *et al.* (2020), 16,5% da população mundial está assentada sobre áreas cársticas e cerca de dois bilhões de pessoas no mundo são abastecidas de água de aquíferos cársticos (Machiwal *et al.*, 2018; Goldscheider *et al.*, 2020). No Brasil, aquíferos cársticos do Grupo Bambuí podem fornecer vazões por poço de até 200 m³/h, sendo que, na região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, estado de Minas Gerais, são registradas vazões superiores a 150 m³/h (MME, 2009; Oliveira *et al.*, 2022).

Os ambientes cársticos, intrinsecamente ligados a reservatórios carbonáticos, são heterogêneos e anisotrópicos, sensíveis e muito vulneráveis à contaminação devido à sua exposição, tanto por processos do próprio meio quanto por atividades relacionadas ao ser humano. Essa característica permite grandes variações na permeabilidade, o que resulta em filtragem deficiente e recarga concentrada (Zwahlen, 2004). Os contaminantes podem naturalmente atingir o aquífero, contornando a filtração que o ambiente natural tende a oferecer (Marín *et al.*, 2021).

Embora a água não possua um caminho de vazão específico, é possível prever o caminho provável de poluentes, além de verificar a relação entre a atenuação da vulnerabilidade exercida pelas camadas de solo e até mesmo pela rocha, que oferece proteção natural ao ambiente cárstico.

Os solos desempenham papel importante na proteção da água subterrânea, especialmente das águas associadas a aquíferos cársticos (Goldscheider *et al.*, 2020). As propriedades químicas do solo, além da espessura, textura e estrutura, atuam como filtros responsáveis por manter o ambiente em equilíbrio, conforme aponta Souza (2020). Alterações nesses fatores podem desequilibrar o sistema e aumentar a vulnerabilidade destes ambientes. Nessa perspectiva, mapear e conhecer as áreas propensas a esse tipo de vulnerabilidade, tanto natural quanto a determinado tipo de poluente, é de suma

importância para a gestão do território.

Entretanto, esse tipo de estudo não é simples, pois, devido às características intrínsecas dos ambientes cársticos, sua aplicação carece de metodologia específica, como é o caso do método COP (Moges; Dinka, 2022). O método COP foi desenvolvido pelo Grupo de Hidrogeologia da Universidade de Málaga (Vías *et al.*, 2002) em conjunto com o grupo de pesquisa Geológica da Espanha. Os fatores C, O e P foram testados em dois aquíferos carbonatados nas regiões de Líbar e Torremolinos, no sul da Espanha. O método COP vem sendo aplicado globalmente em países como Cuba, China, Eslovênia, Alemanha, França, Itália, Brasil e Portugal (Zwahlen, 2003; Leyland, 2008).

O método se distingue em três fatores: i - concentração do fluxo (Fator C), ii - camadas sobrepostas (Fator O) e iii - precipitação (Fator P). Os fatores que representam a vulnerabilidade estão divididos em subfatores, que, por sua vez, servirão de bases primordiais para a geração dos fatores principais (Vías *et al.*, 2002; Goyal *et al.*, 2021). A multiplicação dos fatores principais (C, O e P) é utilizada para o cálculo do índice de vulnerabilidade final (Khazaa'lah *et al.*, 2022). As variáveis utilizadas como parâmetros de entrada não representam valores físicos reais, mas sim uma ponderação derivada dessas variáveis (Oliveira, 2023).

Conforme delimitado pelo escopo deste trabalho, o artigo versará especificamente sobre as camadas de proteção do ambiente cárstico, designadas pelo fator (O). Logo, o objetivo central deste trabalho é a aplicação dos parâmetros do fator (O) na Alta Bacia do Rio Corrente (ABHRC), no nordeste de Goiás. Uma importante adaptação será introduzida na metodologia original. A inclusão da variável estrutura do solo justifica-se a proposta, pois os solos tropicais brasileiros apresentam comportamentos pedológicos e dinâmicas de infiltração distintas dos solos de regiões de clima temperado, onde o método foi desenvolvido. Em ambientes tropicais de carste encoberto, a macro- e microporosidade, derivadas da estrutura granular ou em blocos de Latossolos e Chernossolos, desempenha papel preponderante na atenuação de contaminantes, fator que o método COP original trata de forma secundária em relação à textura e à espessura.

1.1. Camadas de Proteção ou Camadas Sobrepostas – Fator (O)

Na localidade onde o método COP foi desenvolvido, existem camadas de solo e rocha como fatores mais importantes para a proteção do ambiente cárstico. No contexto dos solos brasileiros, essa afirmação não se traduz em efetividade, ou seja, não pode ser confirmada. Isso se deve às características químicas, físicas e mineralógicas dos solos

tropicais, que devem ser consideradas atributos mais importantes para a proteção e a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas (Leyland, 2008; Souza, 2020; Souza *et al.*, 2020).

O fator (O) considera a proteção do aquífero em função de propriedades físicas, como textura, litologia e espessura das camadas acima da zona saturada. As variáveis levadas em conta são: solo (Os) e litologia (Ol) da zona saturada (Tabela 1).

Tabela 1 - Representação do método COP, descrevendo as características dos fatores C, O e P, a forma de obtenção dos valores numéricos e os intervalos considerados.

Fator	Subfator	Variável		Valor
O	Solo [OS]	Textura e Espessura	Argiloso, > 1 m	5,0
			Argiloso, 0,5 - 1 m	4,0
			Argiloso, < 0,5 m	3,0
			Siltoso, > 1 m	4,0
			Siltoso, 0,5 - 1 m	3,0
			Siltoso, < 0,5 m	2,0
			Argilo-arenoso, > 1 m	3,0
			Argilo-arenoso, 0,5 – 1,0 m	2,0
			Argilo-arenoso, < 0,5 m	1,0
			Arenoso, > 1 m	2,0
			Arenoso, 0,5 - 1 m	1,0
			Arenoso, < 0,5 m (ausência de solo)	0
			O	Litologia [OL]
Silte;	1200			
Metapelitos e rochas ígneas não fraturadas	1000			
Calcários com margas	500			
Metapelitos e rochas ígneas fraturadas	400			
Conglomerados e brechas cimentados ou não fraturados	100			
Arenitos	60			
Conglomerados e brechas pouco fraturados ou cimentados	40			
Areia e cascalho	10			
Basaltos fraturados	5			
Rochas cársticas fraturadas	3			
Rochas cársticas não fraturadas	1			
Condições de Confinamento (cn)	Confinado	2,0		
	Semi-confinado	1,5		
	Não confinado	1,0		
Espessura da litologia considerada (m)	< 250 m	1		
	250 – 1.000 m	2		
	1.000 – 2.500 m	3		
	> 2.500 – 10.000 m	4		
	> 10.000 m	5		

Fonte: Adaptado de Vías *et al.* (2002).

Para solos (Os), consideram-se parâmetros como textura (tamanho do grão) e espessura. A variável litologia (Ol) reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona não saturada, sendo quantificada pela classificação da litologia e pelo grau de fraturamento (ly), que determinarão as características hidrogeológicas, pela espessura de cada camada (m) e pelas condições de confinamento (cn) do aquífero (Zwahlen, 2003). O

somatório dos produtos ($\sum ly. M$) dos subfatores dá origem a um índice associado à proteção do aquífero (Iván; Mádl-Szőnyi, 2017; Citrini *et al.*, 2021).

O parâmetro (cn) corresponde às condições de confinamento a que o aquífero está submetido. Assim, para aquíferos não confinados (cn = 1), a capacidade de atenuação de contaminantes aumenta proporcionalmente à ampliação das camadas de proteção. O fator (O) é obtido pelo somatório dos subfatores solo (Os) e litologia (Ol), (Tayer *et al.*, 2017; Ribeiro; Zorn, 2021).

Nesse sentido, conforme equações 1 e 2 a fórmula aplicada para determinação do fator (O) é;

$$\text{Fator O} = (\text{Os}) + (\text{Ol}) \quad (1)$$

$$\text{OL} = \sum (\text{ly.m}). \text{cn} \quad (2)$$

Valores baixos do fator (O) indicam elevada vulnerabilidade intrínseca e correspondem a áreas em que o solo é pobremente desenvolvido ou ausente (Zwahlen, 2003).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização da área de estudo

A área utilizada para a determinação das camadas de proteção referentes ao fator (O), indicado pelo método COP, está vinculada ao aquífero cárstico situado no alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente, que ocupa mais de 3.700 km² de extensão superficial e pertence à unidade geomorfológica conhecida como Vão do Paranã (Oliveira *et al.*, 2025). Territorialmente, a poligonal estudada faz divisa com os estados da Bahia e Minas Gerais (Figura 1). Trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia, situada a 500 km da capital do estado (Goiânia) e a 307 km de Brasília-DF (Oliveira *et al.*, 2025). Situada entre as coordenadas UTM N-8437036.72 e E-337995.14 e UTM N-8348008.44 e E-402031.23, meridiano central (-45°), fuso (23), incluindo parcialmente sete municípios goianos: Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambáí, Posse, Simolândia e Sítio d'Abadia.

Na área estudada, ocorrem afloramentos rochosos de calcário, cavidades de diversas proporções, sumidouros, dolinas e um relevo bastante movimentado, fatores que serão mapeados a fim de correlacionar tais elementos à proteção oferecida ao ambiente cárstico por meio do fator (O). A unidade de conservação Área de Proteção Ambiental

Nascente do Rio Vermelho, com 176.324,33 hectares, localiza-se na área estudada. O objetivo da APA é fornecer proteção integral aos recursos hídricos, a paisagem local e ao patrimônio espeleológico, além da produção de informações relevantes que envolvem os diversos ramos das ciências e as mais variadas linhas de pesquisas (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

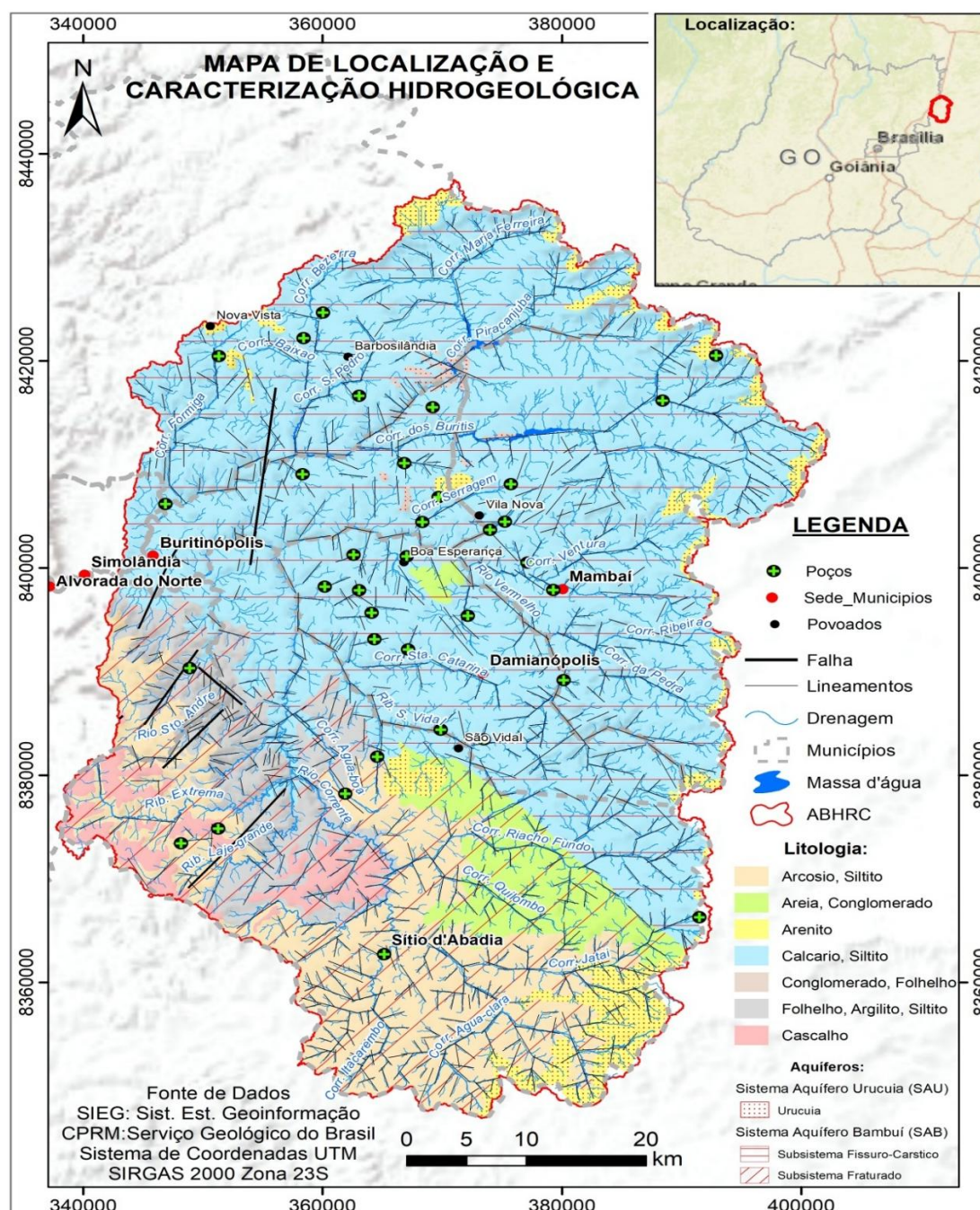


Figura 1: Mapa de localização e caracterização hidrogeológica da área de estudo. Além da localização regional da área de estudo, é possível observar a simplificação hidrogeológica da poligonal estudada, baseada em dados do SIEG e CPRM.

Fonte: Oliveira (2023).

A geologia da área de estudo corresponde à faixa de contato entre o Cráton de São Francisco e a Faixa Brasília, parcialmente recoberta pela Bacia Sedimentar Sanfranciscana (Uhlein, 1991; Uhlein *et al.*, 2016). A unidade geológica mais representativa da área de estudo é a feição cárstica relativa ao Grupo Bambuí, com cotas entre 480 e 780 m (Dardenne *et al.*, 1978). Na área de estudo, observam-se exposições de litofácies dos grupos Bambuí, Areado e Urucuia, além de coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais (Sieg, 2021; Oliveira *et al.*, 2022).

O Grupo Bambuí, na área de estudo, é composto pelas formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (Figura 2A). A Formação Lagoa do Jacaré situa-se na porção oeste e área central da bacia, formada por calcarenitos, siltitos e margas (Dardenne, 1978). Na parte do médio e do baixo curso da bacia, encontra-se a Formação Serra da Saudade, representada por siltitos, argilitos, arenitos finos e raras camadas delgadas de calcário (Campos; Dardenne, 1997). A Formação Três Marias ocupa a faixa sul e oeste da bacia, constituída por arcóseos, siltitos e folhelhos (Oliveira, 2024).

O Grupo Areado (Figura 2A) localiza-se na faixa central e norte da bacia, depositado no Eocretáceo, e é constituído por rochas pelíticas, psamíticas e conglomerados (Campos; Dardenne, 1997).

O Grupo Urucuia foi depositado no período Neocretáceo, formado por arenitos eólicos, arenitos fluviais e raras camadas de conglomerado e de pelito. Na bacia hidrográfica estudada, pode ser encontrado próximo à divisa entre os estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais. Os depósitos coluvionares ocupam a faixa leste, faixa central até o extremo norte da bacia. São sedimentos provenientes das partes mais elevadas do relevo, localizados no oeste da Bahia, onde os arenitos do Grupo Urucuia ocorrem *in situ* (Figura 2A).

Os divisores topográficos que constituem limites naturais, físicos e políticos entre os estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais são formados por depósitos de areia, cascalho e argilas (Campos; Dardenne, 1997). As áreas com coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas situam-se na região sul da bacia e na faixa central. São formadas por sedimentos aluviais e apresentam-se sob a forma de conglomerados, areias, argilas e lateritas pouco consolidadas ou inconsolidadas (Latrubesse *et al.*, 2005).

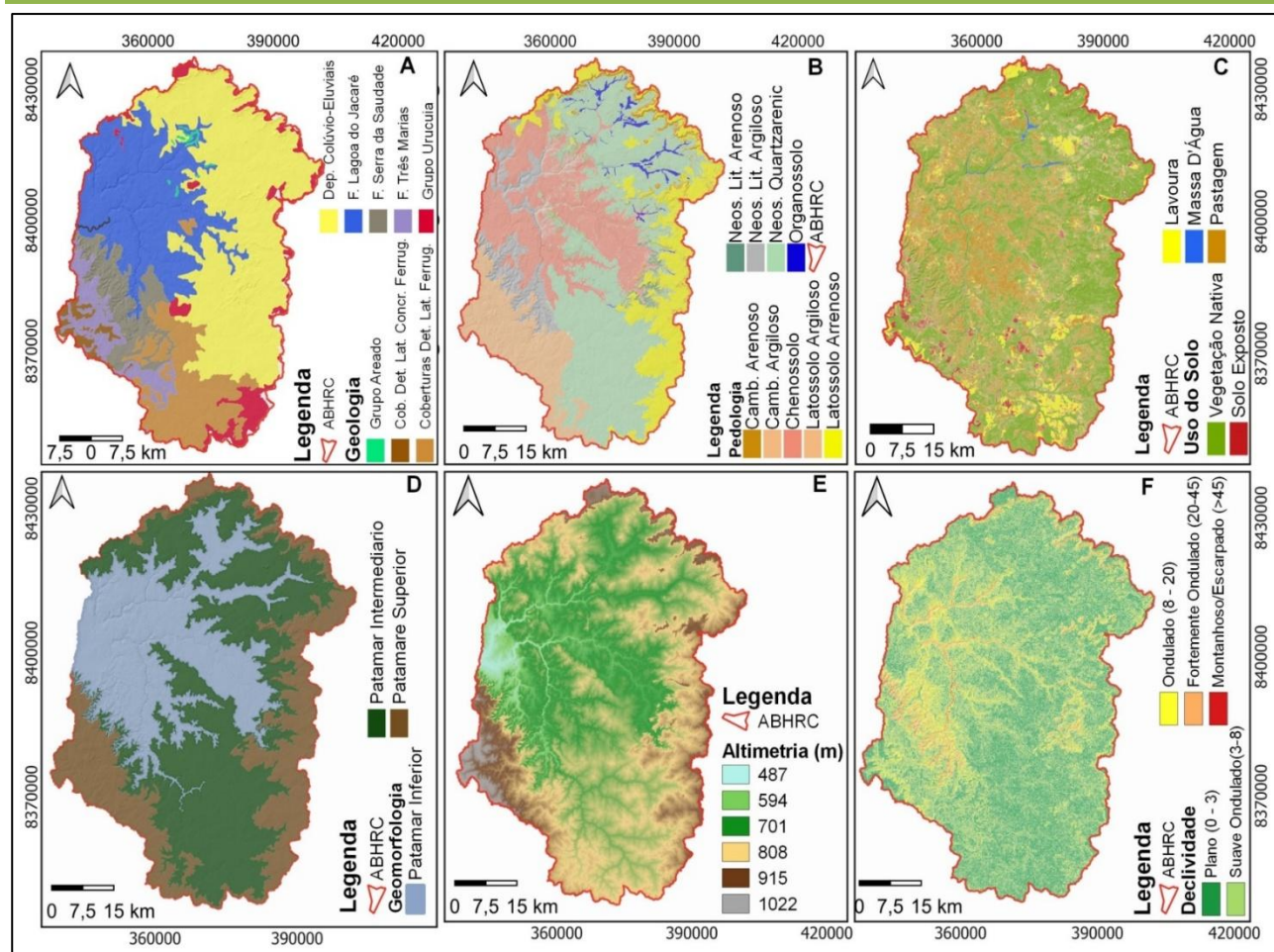


Figura 2: (A) Mapa Geológico. (B) Mapa Pedológico. (C) Mapa de uso e ocupação do Solo. (D) Mapa Geomorfológico; (E) Mapa Hipsométrico e (F) Mapa de Declividade.
Fonte: Oliveira (2023).

Dentro da bacia hidrográfica estudada de acordo com Oliveira *et al.*, (2025), são encontradas cinco classes de solos: Chernossolo, Cambissolo, Organossolo, Latossolo e Neossolo (Figura 2B). Os Chernossolos são formados por material mineral, caracterizados pelo horizonte B textural (Bt), compostos por argila de atividade baixa, ou atividade alta combinada com saturação de bases ou com caráter aluminico. Esses solos são encontrados no centro da bacia (EMBRAPA, 2013). Os Cambissolos são compostos por minerais, bem drenados, álicos e pouco profundos. Caracterizam pelo horizonte diagnóstico B incipiente (Bi), são encontrados em pequenas porções na parte norte, leste e oeste da bacia (Oliveira *et al.*, 2025).

Os Organossolos são encontrados na parte norte e leste da bacia. São solos hidromórficos, eventualmente saturados por água, apresentando horizonte hístico com espessuras maiores que 40 cm e inferiores a 1,50 m (EMBRAPA, 2013).

Os Neossolos são encontrados no centro da bacia. São constituídos por material mineral ou orgânico, pouco espesso, não apresentam alterações consideráveis em

relação ao material originário devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos (LEPSCH, 2021).

Os Latossolos são constituídos por material mineral, apresentam horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer horizonte A. São solos com profundidades maiores que 2 m, com aspecto homogêneo. Devido às suas características, são suscetíveis à erosão, principalmente quando ocorrem junto a curso de água e nas bordas das chapadas. Esses solos são encontrados em maior quantidade na parte sul e oeste da bacia e em pequenas porções na parte norte e leste (Lepsch, 2021).

O clima da área é caracterizado por inverno seco, entre os meses de junho e setembro, e verão úmido, com período chuvoso entre outubro e maio. A precipitação varia de 884 mm/ano a 1.069,30 mm/ano, com maior intensidade no sul da bacia e na faixa central. As taxas de precipitação menores ocorrem no leste da bacia, limitando-se com o oeste do estado da Bahia (Oliveira *et al.*, 2022).

Com relação ao uso e à ocupação do solo (Figura 2C), na bacia predominam grandes áreas cobertas por pastagens e lavouras, além de adensamentos urbanos, solos expostos e exploração mineral (Oliveira *et al.*, 2022). O alto curso da bacia situa-se na região de domínio morfoclimático do cerrado, apresentando flora diversificada em fitofisionomias, controlada pelo relevo, pelo clima e pelos aspectos químicos e físicos do solo (Ab'Saber, 1977). Na área, encontram-se formações savânicas, cerrado ralo, formações campestres, extensas áreas de mata seca e resquícios de campo rupestre (Ribeiro; Walter, 2008).

A área de estudo integra várias feições geomorfológicas (Figura 2D), caracterizando-se por patamares inferiores ou terras baixas, representadas por planícies e vales fluviais que se abrem em encostas convexo-côncavas sob cobertura argilosa, terraços e faixas aluviais, onde situam-se os carbonatos, controlados pelo nível de base do rio principal, com cotas topográficas variando entre 487 e 701 metros acima do nível do mar. Incidem também nessa faixa de terra as áreas cársticas, formadas em compartimentos suspensos de carbonatos, com presença de cavernas, dolinas e sumidouros (Hussain; Uagoda, 2021).

Acima desse compartimento, encontra-se o patamar intermediário (Figura 2D), no qual situam-se os depósitos de Colúvio-eluviais arenosos, com cotas topográficas entre 701 e 915 metros, além do compartimento de cânions formado como resultado do colapso de caverna, organizado a partir da sedimentação das escarpas e do Front da Serra Geral (Hussain *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2022). A parte mais elevada compõe-se de terras

altas de patamares superiores (Figura 2D), situadas entre as cotas topográficas 915 e 1.022 metros, formadas pelas Coberturas Detríticas com Concreções Ferruginosas e pela Formação Urucuia. Nessa posição topográfica situam-se as nascentes dos cursos d'água que drenam a bacia, tais como os rios, Corrente, Vermelho, Buritis, Bezerra, Piracanjuba, Rizada, Chumbada e Ventura (Hussain; Uagoda, 2021; Caldeira *et al.*, 2021).

A hipsometria da área apresenta características distintas, com variações altimétricas abruptas e significativas (Figura 2E), circundada pelo divisor topográfico da Serra Geral, onde se localiza a nascente do Rio Corrente. As áreas com superfície entalhada (Figura 2F) ocorrem devido à maior densidade hidrográfica e à organização das vertentes do Rio Corrente e de seus tributários.

O relevo movimentado pode ser observado a partir de elevações abruptas, evidenciando morros, chapadas, vales cegos e colinas. A amplitude altimétrica é de 535 m, observada nas partes mais baixas, com 487 m, e nas mais elevadas, com 1.022 m. Mesmo apresentando relevo movimentado, a maior parte da área estudada está caracterizada por padrão de relevo plano e suave ondulado (Oliveira *et al.*, 2022)

2.2. Procedimentos Metodológicos

Para o processamento geoespacial e álgebra de mapas, foram utilizados os softwares ArcGIS 10.5 e QGIS 3.16.5. A delimitação da bacia e a extração da rede de drenagem foram auxiliadas pelo algoritmo ODR_HIDRO, proposto por Oliveira *et al.* (2020), que foi acessado via plataforma Python do QGIS 2.18.19, que processou dados do satélite ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 m, fundamentais para a extração de variáveis geomorfométricas e para a delimitação da bacia via algoritmo ODR_HIDRO.

Os mapas do meio físico foram compilados com base nos dados obtidos do Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás (SIEG), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e do trabalho desenvolvido por Nunes (2020). Os dados hidrogeológicos constantes dos 26 poços tubulares profundos, foram extraídos do SIAGAS/CPRM, contendo informações de nível estático e perfis litológicos. Para a confecção do mapa de uso e ocupação do solo, foram utilizadas imagens de satélite do sensor CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM), adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), cuja aquisição ocorreu em 24 de agosto de 2020.

As imagens da câmera WPM apresentam cinco bandas: quatro multiespectrais,

com resolução espacial de oito metros, e uma banda Pancromática, com resolução espacial de dois metros. As imagens foram agrupadas e fusionadas para extrair o máximo possível de sua representação espacial, chegando a 2 m de resolução. Após a fusão das duas cenas, aplicou-se a classificação supervisionada com o classificador MAXVER (*Maximum Likelihood Classification*) e, a partir dessa classificação, foram obtidas cinco classes de uso e ocupação: vegetação nativa, solo exposto, lavoura, pastagem e massa de água.

Os mapas referentes à espessura, textura e estrutura do solo, que compõem a base do mapa do subfator (Os), assim como os mapas das espessuras das camadas de rocha e o mapa representativo do índice de fraturamento das camadas litológicas que compõem o subfator (Ol), o mapa final do fator (O), bem como os demais procedimentos metodológicos, foram executados de acordo com a metodologia COP proposta por Vías et al. (2002).

A metodologia seguiu o protocolo COP (VÍAS *et al.*, 2002), com foco na determinação das camadas de proteção (Fator O). O Fator O avalia a capacidade de proteção natural do aquífero contra a penetração de contaminantes, com base nas propriedades físicas das camadas sobrepostas à zona saturada. O valor final é obtido pela soma de dois subfatores, conforme apontado na equação 1 (Fator O = Os + Ol). Onde (Os) representa o subfator Solo e (Ol) representa o subfator Litologia.

2.3. Adaptação do Subfator Solo (Os) para Solos Tropicais

O método COP original considera apenas a textura e a espessura do solo para definir a proteção. Entretanto, para a realidade dos solos tropicais da ABHRC, propôs-se a inclusão da variável estrutura do solo como parâmetro de refinamento. A estrutura (granular, blocos, etc.) e o grau de desenvolvimento (solta, fraca, moderada ou forte) definem a macroporosidade dos solos tropicais, atuando como um filtro complexo na atenuação de fluidos. Para a espacialização do Subfator (Os), utilizou-se o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), atribuindo pesos diferenciados às classes estruturadas (Latosolos Vermelhos Argilosos) em comparação aos solos pouco estruturados (Neossolos).

2.4. Subfator Litologia (Ol) e Modelagem da Superfície Freática

O subfator (Ol) reflete a capacidade de atenuação da zona não saturada e foi calculado conforme a equação 2, em que $(Ol) = \sum (ly.m. cn)$. A espessura da camada

litológica (m) foi estimada por meio da interpolação por Krigagem Ordinária dos dados de nível estático de 26 poços tubulares, a fim de gerar a superfície potenciométrica da bacia. A espessura final da zona vadosa foi obtida pela diferença entre a superfície potenciométrica do Modelo Digital de Elevação (ALOS PALSAR) e a superfície potenciométrica do Modelo Digital de Elevação (ALOS PALSAR), permitindo uma representação contínua da proteção litológica em toda a poligonal. As classes litológicas foram enquadradas conforme a metodologia COP, correlacionando os dados de poços às unidades do Grupo Bambuí, Grupo Areado e Grupo Urucuia e aplicando pesos (ly) específicos para cada formação.

3. RESULTADOS

A análise do fator (O) camadas sobrepostas demonstra a proteção conferida pelas camadas que sobrepõem o aquífero, sejam solo, rocha não carbonática ou mesmo rocha cárstica não saturada. Essa proteção ao aquífero decorre das propriedades físicas das camadas sobrepostas. São consideradas as propriedades do solo, como textura e espessura, bem como a granulometria e o fraturamento das rochas (ly), e a espessura (m) dessas camadas. A análise desse fator também requer as características de confinamento do aquífero (cn). A composição de todos estes dados resulta na confecção do mapa final do fator O (Vías *et al.*, 2010; Ribeiro; Zorn, 2021).

Para a caracterização do Fator (O), dois subfatores são considerados: o subfator solo (Os) e o subfator litologia (Oi) da zona não saturada. Dessa forma, para avaliação do subfator (Os), parâmetros como textura e espessura são utilizados (Souza *et al.*, 2020; Ribeiro; Zorn, 2021; Oliveira, 2023).

3.1. Análise do Subfator Solo (Os) e a Variável Estrutura

Os solos tropicais brasileiros apresentam propriedades diferentes daquelas observadas nas regiões de clima temperado, como os encontrados onde o método COP foi proposto. A principal distinção está relacionada às características morfológicas dos solos tropicais que podem resultar em solos com diferentes graus de estruturação. Nos solos observados em regiões de climas tropicais e subtropicais, as partículas finas individuais constituídas por silte e argila podem ser ligadas umas às outras pela ação de agentes cimentantes e por forças de coesão e adesão (Lepsch, 2021), formando as estruturas dos solos. Esse arranjo é estabelecido pela ligação das partículas primárias do solo entre si, por meio de substâncias presentes no solo, como matéria orgânica, óxidos

de ferro e de alumínio, carbonatos e sílica, entre outras (Castro *et al.*, 2019). Essas estruturas são classificadas como granulares, grumosas, laminares, colunares ou em blocos.

A estrutura do solo, que é uma característica preponderante para a atenuação natural do aquífero, desenvolve função importante para determinar a susceptibilidade ao movimento da água, tendo em vista a dimensão do espaço ou os interstícios existentes entre os grãos, taxa de infiltração, retenção de água no solo, grau de aeração, resistência à erosão, bem como o equilíbrio favorável para o desenvolvimento radicular das plantas (Lepsch, 2021; Oliveira *et al.*, 2025).

De acordo com Vías *et al.* (2002), na implementação do método COP, propõem que o subfator (Os) seja obtido pelo cruzamento das informações relativas à classe textural e à espessura do solo (Tabelas 2 e 3). Porém, nessa pesquisa, introduziu-se uma característica adicional na análise do solo, tendo em vista a diferenciação dos aspectos morfológicos dos solos (Figura 3) de ambiente tropical (Figura 3), pois os solos tropicais podem apresentar estruturação, o que se reflete diretamente no resultado final.



Figura 3: Diferentes classes de solos encontrados na área de estudo.
Fonte: Oliveira (2023).

Tabela 2: Textura do Solo.

Percentual	Classe
> 30% de argila	Argiloso
> 70% de silte	Siltoso
> 70% de areia e ≤ 15% de argila	Arenoso
Outros Valores	Argilo-Arenoso

Fonte: Adaptado de Vias *et al.*(2002).

Tabela 3: Espessura do Solo.

Espessura	Argiloso	Siltoso	Argilo-arenoso	Arenoso
	Peso			
> 1,0m	5	4	3	2
0,5 – 1m	4	3	2	1
< 0,5m	3	2	1	0*

*: também onde há ausência de solo.

Fonte: Adaptado de Vias *et al.*(2002).

Os dados sobre os solos da área de estudo (Figura 4) foram compilados com base nos dados da pesquisa de Nunes (2020) e dos dados obtidos junto ao Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). O refinamento e a melhor redistribuição das classes de solos foram realizados com base nas camadas geológicas e nos critérios altimétrico e de declividade da área estudada. A ponderação para cada classe de solo foi realizada considerando o material de origem de cada classe (Tabela 4).

A textura e espessura dos solos foram atribuídas conforme observado nas Tabelas 1 e 2. Para determinar a estrutura de cada classe de solo, considerou-se o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS, que caracteriza a estrutura dos solos em três categorias principais: Tipo: laminar, prismática, colunar, blocos angulares, blocos subangulares, grumosa e granular; Tamanho: muito pequena, pequena, média, grande e muito grande; Grau de desenvolvimento: solta, fraca, moderada e forte (EMBRAPA, 2013). A partir do cruzamento das informações de textura e espessura (Figura 5A) e de estrutura (Figura 5B), foi elaborado o mapa do subfator Os (Figura 5C).

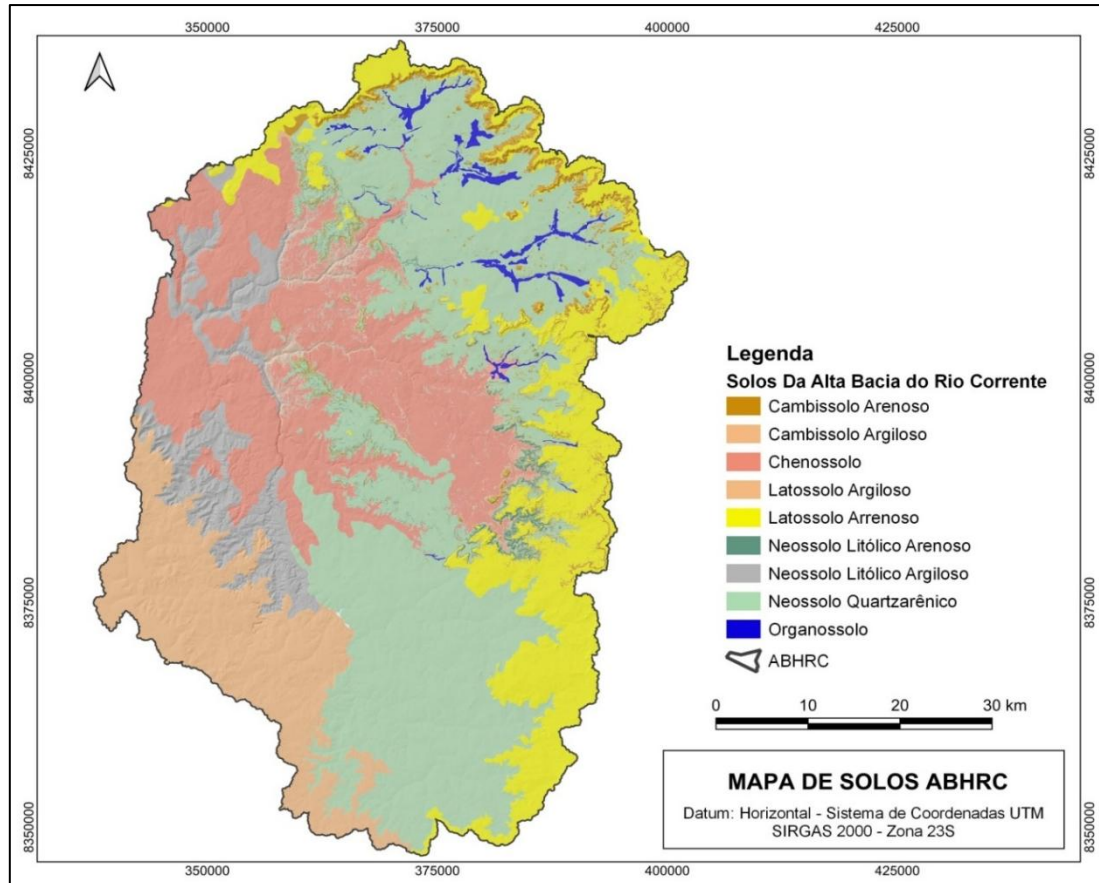


Figura 4: Mapa de Solos da ABHRC com refinamento baseado na camada geológica. Fonte: Oliveira et al. (2025).

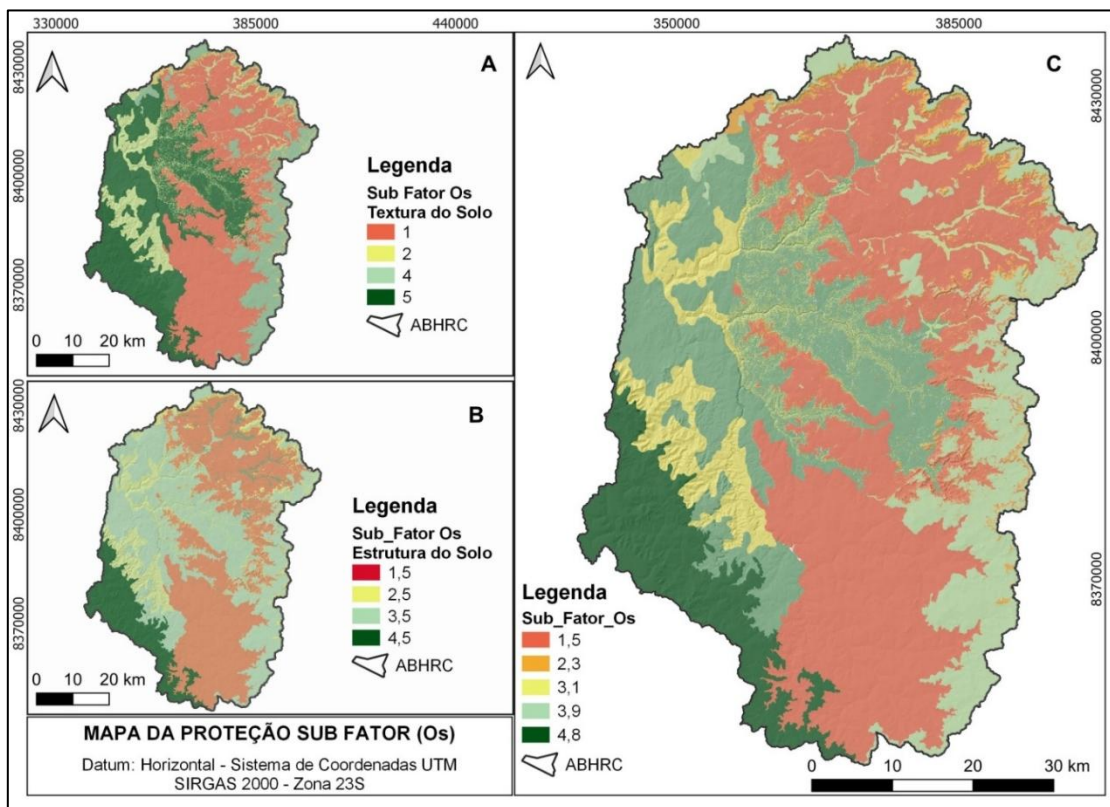


Figura 5: (A) Mapa da textura e da espessura do solo. (B) Mapa da estrutura do solo. (C) Mapa Final do Subfator Os. Fonte: Oliveira (2023).

A espacialização do subfator solo (Figura 5) evidenciou a importância da pedologia na proteção do aquífero na ABHRC. Diferentemente do método original, a inclusão da estrutura permitiu uma diferenciação mais precisa. Os Latossolos Vermelhos e Amarelos, predominantes nas chapadas e nas superfícies aplainadas, apresentaram os maiores índices de proteção ($O_s > 4$). Isso se deve não apenas à sua textura argilosa e à sua profundidade (muitas vezes superior a 2 metros), mas também à sua estrutura granular/grumosa, de forte desenvolvimento, que promove uma retenção mais eficaz de contaminantes por processos físico-químicos.

Em contrapartida, os Neossolos Litólicos e os afloramentos de calcário da Formação Lagoa do Jacaré, localizados nas escarpas e em áreas de relevo mais movimentado, apresentaram valores de (O_s) baixos ou nulos. Nestas áreas, a ausência de um horizonte pedológico desenvolvido permite que a recarga e eventuais poluentes atinja a zona litológica quase sem impedimentos. A adaptação ao clima tropical mostrou-se vital e preponderante, enquanto o COP original subestima a proteção de Latossolos muito porosos, de modo que a ponderação pela estrutura e pela espessura real de campo equilibrou a análise à realidade do Centro-Oeste brasileiro.

Tabela 4: Classes de Solos encontrados na ABHRC com respectivo peso para a estrutura de cada classe.

Tipo de Solo	Formação Geológica	Material de Origem	Textura				Espessura (m)	Peso	Observações
			Argiloso	Siltoso	Argilo-arenoso	Arenoso			
Chernossolo	Grupo Bambuí – Fm. Lagoa do Jacaré	Calcarenito, Siltito (marga)	X				> 1	3,5	Apesar de muito estruturado nos horizontes A e B, o perfil tem um horizonte C argiloso espesso.
Associação de Organossolo Háplico fibrício e Gleissolo HáplicoTb distrófico	Depósitos colúvio-eluviais	Depósitos de areia, Depósitos de cascalho, Depósitos de argila	X				> 0,5 < 1	4	Neste caso, a ampla presença de matéria orgânica sobressai sobre os aspectos texturais e estruturais.
Cambissolo Háplico Tb distrófico, textura arenosa	Depósitos colúvio-eluviais	Depósitos de areia, cascalho, e argila				X	> 1	2,5	Estes Cambissolos sempre têm horizontes argilosos, mesmo que no saprófito, e isso amplia um pouco sua capacidade de proteção.
Cambissolo Háplico Tb distrófico, textura argilosa	Grupo Bambuí – Fm. Três Marias	Arcóseo (argilito, Siltito)	X				> 1	3,5	O Horizonte C destes perfis de Cambissolo é espesso e de textura argilo-siltosa. Isso amplia sua capacidade de atenuação de cargas contaminantes.
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média	Grupo Urucuia	Conglomerado, arenito conglomerático, pelito, arenito		X			> 1	3,5	Apesar de ser Latossolos, não têm muita estrutura, pois o conteúdo de finos é da ordem de 20%.
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa	Grupo Bambuí – Fm. Três Marias	Laterita, depósitos de areia (arcóseo, argilito, siltito)	X				> 1	4,5	Latossolos da região apresentam sempre estrutura grumosa que tem grande microporosidade, responsável pelo aumento da capacidade de atenuação.
Neossolo Litólico distrófico, textura média	Urucuia	Arenito		X			< 0,5	2	Só grãos simples sem argila ou estruturação.
Neossolo Litólico eutrófico, textura argilosa	Grupo Bambuí - Fm. Serra da Saudade	Calcarenito, Siltito e Marga	X				< 0,5	3	Presença de horizonte C espesso e argiloso (O C pode chegar a vários metros, como observado nos perfis de poços).
Neossolo Litólico distrófico, textura arenosa	Grupo Urucuia	Conglomerado, Arenito conglomerático, Pelito, Arenito			X		> 1	2	Só grãos simples sem argila ou estruturação.

Fonte: Oliveira (2023)

3.2. Análise do Subfator Litologia (OI) e Espessura da Zona Vadosa

O subfator (OI) reflete a capacidade de atenuação oferecida por cada camada de rocha da zona não saturada. Em localidades com solos rasos ou com ausência de solos, essa camada é a única proteção da água subterrânea. A determinação do subfator (OI) requer inicialmente que seja estipulada a espessura (profundidade) das camadas de rochas e o seu grau de fraturamento (Iy) até o nível freático (Leyland, 2008).

Para determinar a espessura das camadas de rocha na poligonal estudada, utilizou-se como fonte de dados os 26 poços tubulares profundos, espacializados no interior da área estudada. De posse das coordenadas geográficas e da profundidade de cada um, interpolou-se a profundidade do nível freático da área de interesse.

Da mesma forma, a superfície topográfica altimétrica real, foi estabelecida tendo por base o modelo digital de elevação - MDE ALOS PALSAR, com resolução de 12,5 m. Dessa maneira, a diferença encontrada pela sobreposição dos dois rasters estabelecidos para poligonal de estudo, permitiu a geração de um raster (MDE) intermediário (Figura 6A) com a espessura em metros das camadas em qualquer parte da bacia.

Os enquadramentos das camadas de rochas foram feitos a partir do mapa geológico da área estudada. O material de origem da rocha permitiu enquadrar e correlacionar as camadas dos diferentes tipos petrográficos da área com a metodologia proposta no método COP (Tabela 5), bem como a distribuição do índice para cada camada (Tabela 6) proposta por Vías *et al.* (2002).

Tabela 5: Representação do enquadramento litológico e ponderação de cada camada indicadas no método COP.

Litologia e Fraturamento	Valor
Argilas	1500
Siltos	1200
Margas e metapelitos não fissurados e rochas ígneas	1000
Calcários de marga	500
Metapelitos e rochas ígneas	400
Conglomerados cimentados ou não fissurados e brechas	100
Arenitos	60
Conglomerados e brechas pouco cimentadas ou fissuradas	40
Areias e cascalhos	10
Basaltos permeáveis	5
Rochas carbonatadas fissuradas	3
Rochas cársticas	1

Fonte: Vías *et al.* (2002).

Tabela 6: Representação dos índices e pesos das camadas indicada no método COP

Índice da camada	Valor
0 – 250	1
250 - 1000	2
1000 - 2500	3
2500 - 10000	4
> 10000	5

Fonte: Vías *et al.* (2002).

O enquadramento litológico com os respectivos pesos (Tabela 7) foi atribuído e correlacionado conforme proposto por Vías *et al.* (2002). Os valores representativos da espessura das camadas de rochas (Figura 6A) foram obtidos através da média de três pontos aleatórios espacializados dentro de cada camada. Os valores encontrados foram correlacionados com o índice indicado a cada camada (Figura 6B) e multiplicados pela situação de confinamento (*cn*) em que o aquífero se encontra (Tabela 7). O resultado dessa junção de dados foi obtido por meio da álgebra de mapas, concluindo-se com a representação do mapa final da proteção oferecida ao aquífero pelo subfator *OI* (Figura 6C).

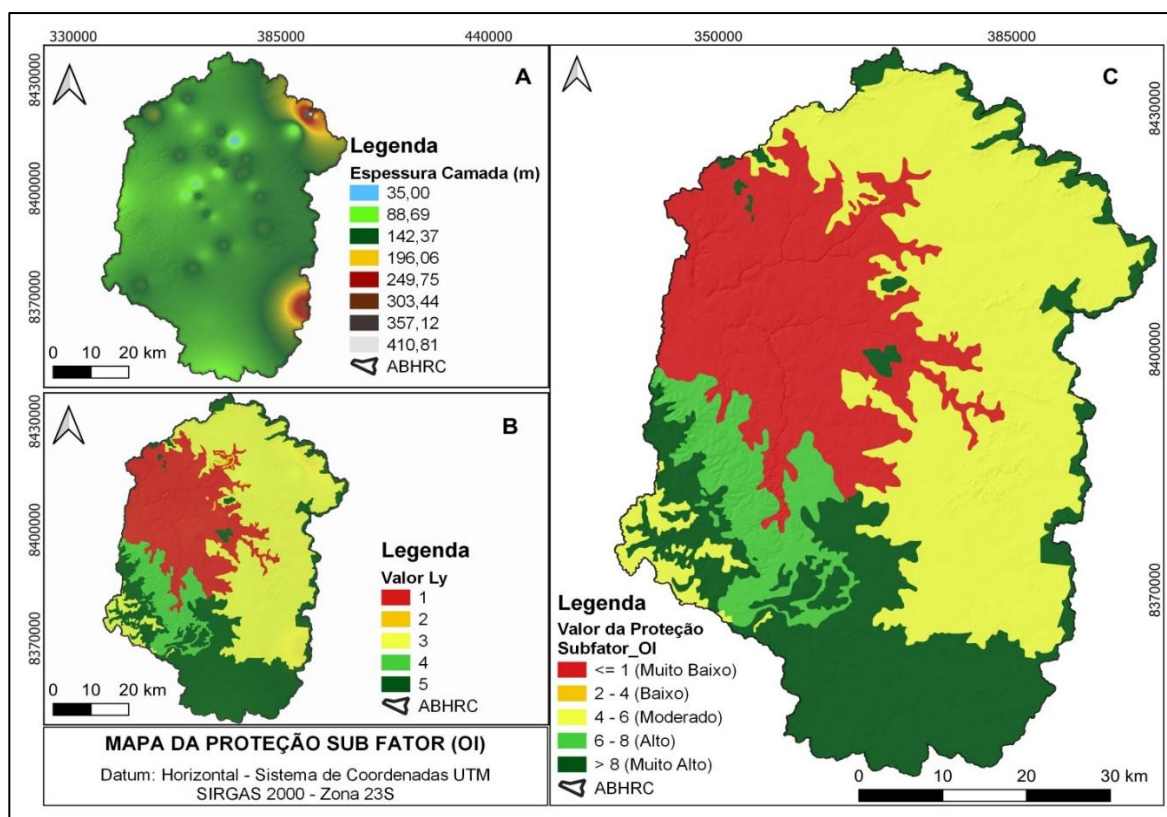


Figura 6: (A) Mapa representativo da espessura das camadas litológicas. (B) Mapa representativo do índice de fraturação das camadas litológicas. (C) Mapa Final da proteção oferecida a ABHRC pelo Subfator *OI*.

Fonte: Oliveira (2023).

Tabela 7: Litologia, Enquadramento Litológico, Profundidade e Espessura da Camada, com os respectivos pesos para as estruturas de cada classe, no estudo da bacia do alto curso do Rio Corrente.

Litologia	Descrição Litológica	Enquadramento Litológico (COP)	Peso (Ly)	Profundidade Espessura Camada (m)	Índice Camada	Valor (Ly)	Confinamento (Cn)	Sub fator (Of)
Coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas	Laterita, Depósitos de areia e Depósitos de cascalho	Areia e cascalho	10	$(125+147+142) / 3=138\text{m}$	1.380 1000 - 2500	3	2	6
Coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas	Depósitos de silte e Depósitos de argila	Argilas	1500	$(170+145+90) / 3=135\text{m}$	202.500 >10000	5	2	10
Depósitos colúvio-eluviais	Depósitos de areia e Depósitos de cascalho	Areia e cascalho	10	$(350+130+80) / 3=186\text{m}$	1.860 1000 - 2500	3	2	6
Grupo Urucuia	Conglomerado, Arenito conglomerático, Pelítico e Arenito	Arenito	60	$(390+160+205) / 3=203\text{m}$	12.180 >10000	5	2	10
Grupo Areado	Folhelho, Arenito, Conglomerado e Siltito	Rochas Carbonáticas e Fissuradas	3	$(125+91+130) / 3=115\text{m}$	345 250 - 1000	2	1	2
Grupo Bambuí - Formação Três Marias	Argilito e Siltito	Silte	1200	$(150+130+115) / 3=131\text{m}$	157.200 >10000	5	2	10
Grupo Bambuí - Subgrupo Paraopebá - Formação Serra da Saudade	Pelítico e Arenito	Brechas e Conglomerados pouco fissurados	40	$(130+90+145) / 3=122\text{m}$	4.880 2500 - 10000	4	2	8
Grupo Bambuí - Formação Lagoa do Jacaré	Calcarenito, Siltito e Marga	Rocha Cárstica	1	$(160+40+100) / 3=100\text{m}$	100 0 - 250	1	1	1

Fonte: Adaptado de Vias *et al.*(2002).

O mapa do subfator (O_l) (Figura 6) é o resultado direto da integração entre o tipo litológico (ly) e a espessura da zona não saturada (m). A modelagem potenciométrica, por meio da Krigagem Ordinária, dos 26 poços tubulares permitiu identificar que a profundidade do nível freático varia consideravelmente na bacia, com valores que ultrapassam 60 metros em áreas de interflúvios, mas tornam-se muito reduzidos (inferiores a 5 metros) nas zonas de descarga próximas ao Rio Corrente.

As áreas sustentadas pelo Grupo Urucuia e pelas coberturas detrito-lateríticas apresentaram a maior proteção litológica devido à baixa permeabilidade vertical inicial e à grande espessura. Já no núcleo da bacia, onde afloram os calcários do Grupo Bambuí, a proteção litológica é severamente reduzida pelo fraturamento intenso e pela presença de condutos cársticos, evidenciados por baixos valores de (ly).

3.3. Cálculo Final do Fator O (Camadas Sobrepostas)

Para determinar o valor final do fator (O), é preciso conhecer o tipo, a textura, a espessura e a estrutura dos solos da área de estudo, como demonstrado na Tabela 4. Requer também que seja conhecido o tipo de rocha das camadas litológicas, o grau de fraturamento (ly), a espessura de cada camada (m) e as condições de confinamento (cn) em que o aquífero se encontra (Tabela 7).

O conhecimento prévio dessas informações permite efetuar o cálculo e a representação cartográfica dos subfatores (O_s) referentes ao solo e (O_l) referentes à litologia, representados nas Figuras 5C e 6C, respectivamente. A soma desses dois subfatores, conforme demonstrado nas Figuras 7A e 7B, permite calcular e representar espacialmente o valor da proteção oferecida ao ambiente cárstico, como demonstrado na Figura 7C. A integração dos subfatores resultou na representação cartográfica das camadas de proteção (Figura 7C). Os dados foram quantificados analiticamente na Tabela 8.

A análise espacial demonstra que a classe moderada é a predominante na bacia, cobrindo 38% do território. As áreas de proteção muito baixa e baixa (somando 33%) coincidem com o eixo central da bacia e com zonas de carstificação intensa, onde a conectividade entre a superfície e o aquífero é direta. Nestas zonas, a espessura do solo é insuficiente e a litologia carbonática está exposta ou subjacente a coberturas finas.

Tabela 8: Quantificação das Classes de Proteção Natural (Fator O) na ABHRC

Classe de Proteção	Índice (Valor)	Área (km ²)	Percentual (%)	Descrição Técnica
Muito Baixa	≤ 2,5	448,54	12%	Carste exposto e solos rasos (Neossolos)
Baixa	2,5 a 3,0	784,94	21%	Zonas de transição e litologia fraturada
Moderada	3,0 a 4,0	1.420,38	38%	Classe predominante na bacia
Alta	4,0 a 8,0	710,19	19%	Solos profundos e estrutura desenvolvida
Muito Alta	8,0 a 15,0	353,78	10%	Latosolos espessos e proteção máxima
TOTAL		3.737,83	100%	

Fonte: Oliveira (2023).

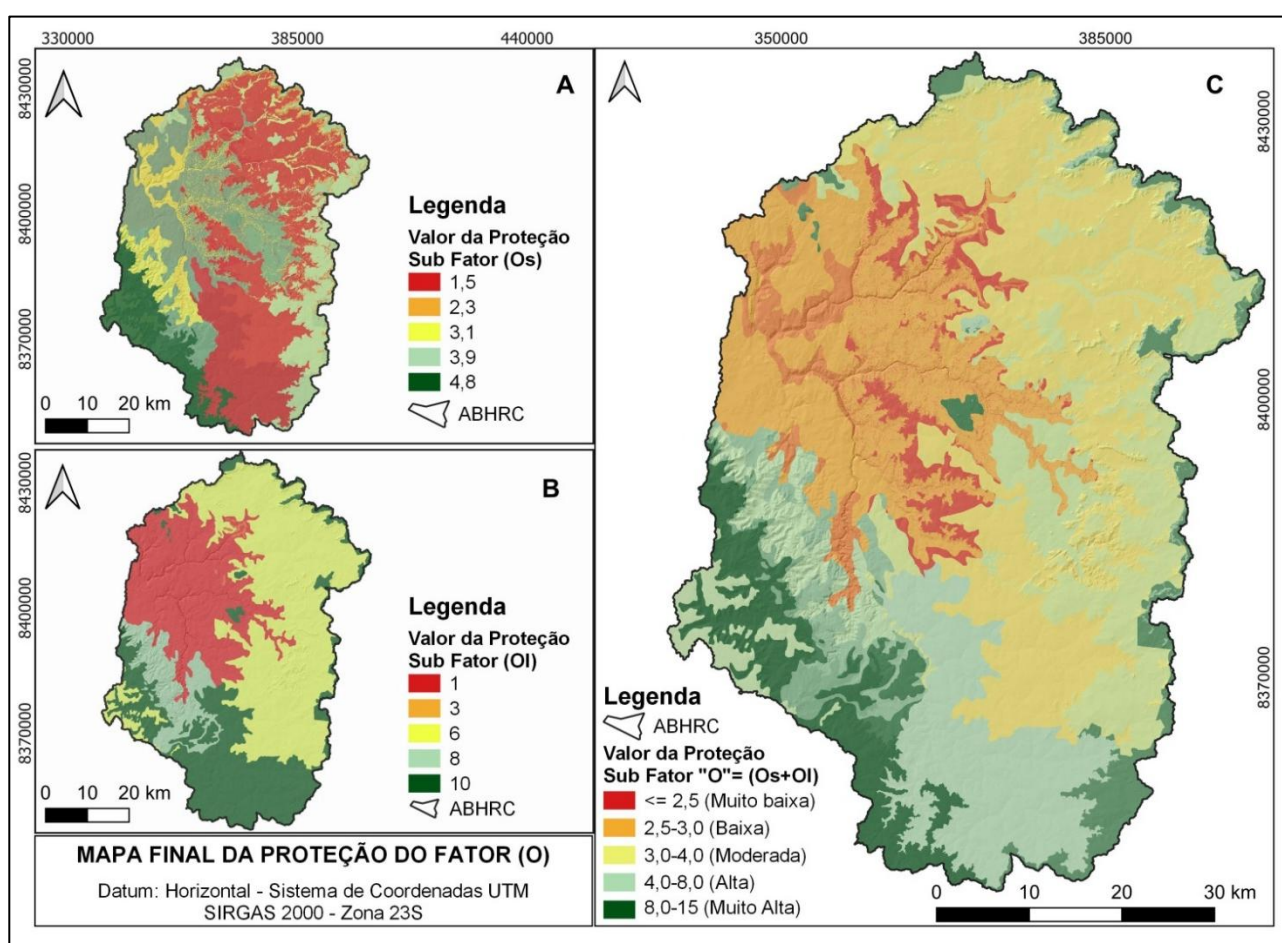


Figura 7: (A) Mapa representativo do subfator Os. (B) Mapa representativo do subfator Oi. (C) Mapa Final da proteção oferecida a ABHRC pelo Fator O.

Fonte: Oliveira (2023).

Os resultados indicam que a ABHRC possui uma configuração de proteção natural em mosaico. A proteção muito alta (10%) no extremo sul da bacia é um achado importante, pois indica zonas onde a gestão do uso do solo pode ser mais flexível, dado que o ambiente natural oferece barreiras robustas (Latosolos espessos e estruturados sobre litologias menos fraturadas).

Por outro lado, a zona de proteção muito baixa no centro-oeste exige atenção imediata dos órgãos públicos e dos gestores ambientais. A aplicação do COP, com adaptação para solos tropicais, permitiu observar que a vulnerabilidade nestas áreas é mais acentuada do que o previsto anteriormente por mapeamentos geológicos genéricos. A estrutura do solo, ao ser considerada, elevou a precisão da representação da infiltração, validando a hipótese de que o método europeu necessita de calibração no Brasil Central.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa final das camadas de proteção (Fator O) constitui o parâmetro mais importante para a pesquisa de vulnerabilidade de aquíferos cársticos. Da mesma forma o fator solo, incluindo sua estruturação, é muito relevante para estimativa da proteção dos ambientes cársticos, sobretudo para aqueles localizados em regiões de clima tropical.

Conforme proposto pelo método COP, o mapa final do fator (O) divide-se em 5 classes de proteção do ambiente cárstico, cujo objetivo é indicar os locais em que a proteção do ambiente apresenta comportamento distinto. Cada índice dessa subdivisão de classe demonstra a capacidade de atenuação do ambiente natural, ou seja, indica os locais onde os possíveis contaminantes, em seu percurso, terão que contornar a proteção oferecida ao ambiente até chegar à zona saturada do aquífero.

De acordo com as características químicas e físicas de cada tipo de solo, o ambiente cárstico recebe proteção diferente: os solos com textura mais fina, espessuras maiores e maior estruturação (no caso dos solos tropicais) proporcionam maior proteção ao ambiente. Essa razão é inversamente proporcional: se as características dos solos se comportarem de forma oposta, a proteção do aquífero fica comprometida.

De acordo com a espacialização geográfica dos solos, observando a Tabela 2 e a Figura 4, observa-se, nos solos argilosos, e principalmente nos estruturados, maior ponderação. Conseqüentemente, são os tipos de solos que mais oferecem proteção ao aquífero, como demonstrado na Figura 7C. Na área de estudo, essa proteção também é observada na associação entre Organossolos Háplicos e Gleissolos Háplicos.

Essa configuração de classe do subfator (Os) poderia ser o resultado final para a determinação do fator de proteção (Fator O) das camadas sobrepostas do aquífero. Entretanto, como previsto no método COP, o resultado do subfator (Os) deve ser somado ao resultado do mapeamento das camadas rochosas que representa o subfator (OI).

A adição dos subfatores (Os) e (OI), como observado nas Figuras 7A e 7B, resultaram no mapa final das camadas sobrepostas, também conhecida como camadas

de proteção (Fator O) do ambiente cárstico (Figura 7C) do alto curso da bacia do Rio Corrente. As classes de proteção oferecidas pelos subfatores (Os) e (O_I) do aquífero estão distribuídas e espacializadas da seguinte forma:

- Índice de proteção muito baixo ($\leq 2,5$) situado na faixa centro-oeste da bacia;
- Índice de proteção baixo (2,5 a 3) presente em maiores proporções na faixa central e oeste da bacia;
- Índice de proteção moderada (3 a 4) sendo a classe mais representativa, e encontrada desde a faixa central até a faixa leste da área estudada, onde o carste é fissurado e predominam os depósitos colúvio-eluviais e os neossolos Litólicos de textura média;
- Índice de proteção alta (4 a 8) é encontrado da faixa norte até a faixa sul da poligonal estudada, com incidência mais volumosa no extremo sul da poligonal;
- Índice de proteção muito alto (8 a 15) é observado em maior proporção na parte sul da bacia e em pequenas porções em outras regiões da área. Além de situar-se em região onde o processo de carstificação é controlado pela geologia da área, é nessa região que predominam os Latossolos de textura média e argilosa, solos que receberam pesos maiores devido à sua espessura e estruturação.

Destaca-se que os índices de proteção muito baixo, baixo e moderado coincidem com a região onde a bacia sofre processos de carstificação mais intensos.

A inclusão e adaptação do parâmetro estrutura dos solos na metodologia COP foram consideradas apropriadas para identificar com maior precisão os índices de proteção para o ambiente cárstico, para os quais supostamente a metodologia original não seria suficiente para determinar com confiança, visto que o método original não leva em consideração as condições físicas dos solos de regiões tropicais. Desse modo, além de identificar a inconsistência do método COP, quando aplicado de forma automática no carste de regiões tropicais, verifica-se que a adaptação sugerida, demonstrou que sua aplicação foi bastante satisfatória na determinação do fator (O), principalmente por abordar diferentes faixas de espessura e estrutura do solo, parâmetros determinantes para diferenciar o carste mediterrâneo (onde o método foi originalmente proposto) do carste tropical brasileiro.

A aplicação do método COP, com foco na determinação do Fator O (Camadas de Proteção), revelou-se uma ferramenta eficaz para o zoneamento ambiental da Alta Bacia do Rio Corrente. A principal contribuição deste trabalho foi a adaptação metodológica para solos tropicais, especificamente por meio da inserção da variável "estrutura do solo".

Diferente da aplicação original do método em ambiente mediterrâneo, a realidade do Brasil Central demonstrou que a estrutura granular e em blocos dos Latossolos e Chernossolos desempenha um papel de retenção e atenuação de contaminantes tão relevante quanto a textura e a espessura. A quantificação analítica permitiu observar que 38% da bacia possui proteção moderada, enquanto as áreas de proteção muito baixa (12%) demandam atenção imediata por coincidirem com zonas de recarga direta do Aquífero Bambuí.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. **Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação.** São Paulo: Instituto de Geografia – USP, 1977.

CALDEIRA, D.; UAGODA, R.; NOGUEIRA, A. M.; GARNIER, J.; SAWAKUCHI, A. O.; HUSSAIN, Y. Late Quaternary episodes of clastic sediment deposition in the Tarimba Cave, Central Brazil. **Quaternary International**, v. 580, p. 22-37, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.012>.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 269-282, 1997.

CASTRO, F. C.; ARAÚJO, J. F.; DOS SANTOS, A. M. (2019). Susceptibility to soil salinization in the quilombola community of Cupira-Santa Maria da Boa Vista-Pernambuco–Brazil. **Catena**, v. 179, p. 175-183, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.005>.

CITRINI, A.; CAMERA, C. A.; ALBORGHETTI, F.; BERETTA, G. P. Karst groundwater vulnerability assessment: application of an integrative index-based approach to main catchments of middle Valseriana springs (Northern Italy). **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. (17), p. 610, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09860-8>.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30º **Cong. Bras. Geol., São Paulo, SP.** v. 2, p. 568-610, 1978.

EMBRAPA. S.B.C.S. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro. 2013.

FERREIRA, C. F.; HUSSAIN, Y.; UAGODA, R. A semi-automatic approach for doline mapping in Brazilian covered karst: the way forward to vulnerability assessment. **Acta Carsologica**, v. 51, n. 1, p. 19-31, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v51i1.10011>.

FORD, D.; WILLIAMS, P.D. **Karst Hydrology and Geomorphology.** John Wiley and Sons Ltd. 2007.

GOLDSCHIEDER, N. et al. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. **Hydrogeology Journal**, v. 28, n. 5, p. 1661-1677, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>.

GOYAL, D.; HARITASH, A. K.; SINGH, S. K. A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 11-3161, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113161>.

HUSSAIN, Y.; UAGODA, R. GIS-based relief compartment mapping of fluvio-karst landscape in central Brazilian highlands. **International Journal of Economic and Environmental Geology, (IJEEG)**, v. 11, n. 4, p. 61-64, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.46660/ijeeg.Vol11.Iss4.2020.518>.

HUSSAIN, Y.; UAGODA, R.; BORGES, W.; NUNES, J.; HAMZA, O.; CONDORI, C.; CÁRDENAS-SOTO, M. The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration. **Water**, v. 12, n. 8, p. 2289, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/w12082289>.

IVÁN, V.; MÁDL-SZŐNYI, J. State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 3, p. 112, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6422-2>.

KHAZAA'LAH. M.; TALOZI, S.; HAMDAN, I. Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based COP model in the northern governorates of Jordan. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 9, n. 1, p. 19-40, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01486-4>.

LATRUBESSE, E. M.; CARVALHO, T. M.; STEVAUX, J. C. **Mapa geomorfológico do Estado de Goiás: Relatório final**. Goiânia: GOIÁS (Estado)-Secretaria de Indústria e Comércio/Superintendência de Geologia e Mineração, 2005.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

LEYLAND, R. C. **Vulnerability mapping in karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site** (Doctoral dissertation, University of Pretoria-(South Africa), 2008.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K.; SINGH, V. P.; MOHAN, C. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 901-927, 2018. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>.

MARÍN, A. I.; MARTÍ RODRÍGUEZ, J. F. M.; BARBERÁ, J. A. ; FERNÁNDEZ-ORTEGA, J. ; MUDARRA, M.; SÁNCHEZ, D.; ANDREO, B. (2021). Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key challenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain. **Hydrogeology Journal**. v. 29, n. 1, p. 379-396, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02279-8>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país**. Recife: M.M.E. 2009.

MOGES, S. S.; DINKA, M. O. Assessment of groundwater vulnerability mapping methods for sustainable water resource management: An overview. **Journal of Water and Land Development**. v. 52, p. 186-198, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140389>.

NOSSA, T. C. B.; BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R.; AZEVEDO, E. G. Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-Ba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18, 2012, Bonito. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2012. 1 CD-ROM.

NUNES, J. G. S. **Mapeamento de solos através de técnicas diretas e indiretas na APA Nascentes do Rio Vermelho, Mambaí-GO**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/39405>. Acesso em: 23 jan. 2025.

OLIVEIRA, O. A. **Estudo e mapeamento da vulnerabilidade ambiental em ambiente cárstico da alta bacia hidrográfica do Rio Corrente no nordeste goiano**. 2023. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/49505>. Acesso em: 23 jan. 2026.

OLIVEIRA, O. A. Principais Modelos Utilizados Para Avaliar Vulnerabilidade Dos Aquíferos Cársticos Brasileiros: uma Revisão. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v.17, n.6, p. 4596–4622, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbqf.v17.6.p4596-4622>.

OLIVEIRA, O. A.; BIAS, E. S.; STEINKE, V. A.; SOUSA, R. B.; PASSO, D. P.; BAPTISTA, G. M. M.; PEREIRA FILHO, W. Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfométricos com base em ferramentas Open Source. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1658>.

OLIVEIRA, O. A.; RODRIGUES, D.S.; CAMPOS, J.E.G.; UAGODA, R. E. S. Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambaí, GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2327-2339, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbqf.v15.5.p2327-2339>.

OLIVEIRA, O. A.; UAGODA, R.; CAMPOS, J. E. Determinação E Representação Cartográfica Da Concentração De Fluxo (Fator C) Pelo Método COP No Alto Curso Da Bacia Do Rio Corrente No Nordeste Goiano. **Caderno de Geografia**, v. 35, n. 81, p. 431-431, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2025v35n81p431>.

RIBEIRO, D.; ZORN, M. SUSTAINABILITY AND Slovenian Karst Landscapes: Evaluation of a Low Karst Plain. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 1655, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13041655>.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 1, p. 151-212. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/186922>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SIEG. **Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás**. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

SOUZA, R. T. de; HEREDIA, O. S.; TRAVASSOS, L. E. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; SAMPAIO, J. L. D. Influência da Espessura da Camada de solo na Proteção dos aquíferos Cársticos sob os Climas Tropical Úmido e Europeu Mediterrâneo, pelo Método de Vulnerabilidade COP. **Águas Subterrâneas**, v.34, n.1, p.50–65, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29762>

SOUZA, R. T. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo**: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. 2020. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/755c8815-5718-4ce4-aca3-a4a324e308ff>. Acesso em: 23 jan. 2025.

TAYER, T. C.; VELÁSQUES, L. N. M. Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. **Environmental earth sciences**, v. 76, n. 13, p. 445, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>.

UHLEIN, A. **Transição cráton-faixa dobrada**: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais. 1991. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-27102015-092630/en.php>. Acesso em: 20 jan. 2025.

UHLEIN, G. J.; UHLEIN, A.; HALVERSON, G. P.; STEVENSON, R.; CAXITO, F. A.; COX, G. M.; CARVALHO, J. F. The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 71, p. 1-16, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.00>.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers. In: NERJA CAVE GEOLOGICAL SYMPOSIUM ON KARST AND ENVIRONMENT, 2, 2002, Nerja. **Proceedings...** Nerja: Nerja Cave Foundation, 2002. p. 20-23.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 6, p. 912-925, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0023-6>.

ZWAHLEN, F. (ed.). **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers**: final report (COST Action 620). Brussels: European Commission, 2004. 297 p. (Report EUR 20912).

ZWAHLEN, F. (ed.). **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.