

OTIMIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO

OPTIMIZACIÓN Y APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS AQUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN

OPTIMIZATION AND APPLICATION OF THE INTRINSIC VULNERABILITY INDEX OF THE AQUIFERS TO THE POLLUTION

Alesson Pires Maciel Guirra
engeoguirra@gmail.com

Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri, UFVJM, Diamantina, MG

Helen Rezende de Figueiredo
helenrezende.bio@gmail.com

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS, Campo Grande, MS

Patrícia Karina Barbosa Ereio
patriciakarinabio@hotmail.com

Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT, Rondonópolis, MT

Resumo: Este trabalho visa otimizar o método de obtenção do índice de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição (IVIAP) conferindo à variável infiltração e recarga a combinação matricial entre os intervalos de declividade e a densidade relativa de cobertura vegetal. Além da coleta de dados hidrolitológicos das unidades aquíferas, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi empregado para mapeamento de 34 nascentes em Rondonópolis, MT, compilação de dados do nível freático de poços tubulares e correção de imagens de satélite e de radar de média-alta resoluções espaciais. Identificou-se o IVIAP como um método alternativo, simples e eficaz na qualificação das vulnerabilidades à poluição de aquíferos, principalmente em regiões onde há carência de informações hidrológicas.

Palavras-chave: geotecnologias, índices, água subterrânea, agroquímicos, cidades médias.

Resumen: Este artículo visa optimizar el método de obtención del índice de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación (IVIAP) confiriendo a la variable infiltración y recarga la combinación matricial entre los intervalos de declividad y la densidad relativa de cobertura vegetal. Además de la recolección de datos hidrolitológicos de las unidades acuáticas, el Sistema de Información Geográfica (SIG) fue empleado para mapeo de 34 nacientes en Rondonópolis, MT, compilación de datos

del nivel freático de pozos tubulares y corrección de imágenes de satélite y de radar de media-alta resoluciones espaciales. Se identificó el IVIAP como un método alternativo, simple y eficaz en la calificación de las vulnerabilidades a la contaminación de acuíferos, principalmente en regiones donde hay carencia de informaciones hidrológicas.

Palabras clave: Geotecnología, Índices, Águas subterrâneas, Agroquímicos, Ciudades medias.

Abstract: This paper aimed to optimize the method of obtaining the intrinsic vulnerability index of the aquifers to the pollution (IVIAP) conferring to the variable infiltration and recharge the matrix combination between the slope intervals and the relative density of vegetation cover. In addition to the collection of hydrolytic data from the aquifer units, the Geographic Information System (GIS) was used to map 34 springs in Rondonópolis, MT, compile data from the groundwater table of tubular wells, and correct satellite and radar images from medium-high spatial resolutions. The IVIAP was identified as an alternative, simple and effective method to qualify vulnerabilities to aquifer pollution, especially in regions where there is a shortage of hydrological information.

Keywords: Geotechnology, Indexes, Underground Water, Agrochemicals, Medium Cities.

INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição, expressa em cartogramas, é uma ferramenta utilizada pelos planejadores e gestores do uso do solo e da segurança hídrica e sanitária. Os cartogramas demonstram como as variáveis geoambientais podem afetar o movimento dos poluentes no subsolo, favorecendo tomada de decisões que reduzam o potencial de danos ou impactos mais graves (ADAMAT-AL; AL-SHABEED, 2017). Antecipar o dano é de primordial importância, uma vez que as águas subterrâneas representam significativa parcela de água potável, sendo sua vulnerabilidade relativamente menor à poluição em comparação com a água superficial (GEMAIL et al., 2017).

A vulnerabilidade intrínseca de aquíferos podem diferir significativamente dependendo das condições geológicas locais, a profundidade do nível freático e as características dos estratos acima da camada de litológicas e pedológicas de interesse. Concomitantemente, as ameaças às águas subterrâneas podem ser reduzidas com a identificação e controle das fontes distintas de poluição, sendo os índices de vulnerabilidade uma das formas de identificar áreas mais predispostas à contaminação, onde se faz necessário uma maior proteção dos recursos e melhor controle de ameaças. Nesse sentido, Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013) criaram o Índice de Vulnerabilidade Intrínseca dos Aquíferos à Poluição (IVIAP), que foi uma adequação do Índice de Vulnerabilidade Intrínseca (IVI) proposto por Nobre et al. (2008), e parte integrante do Índice de Perigo ao Consumo de Águas Subterrâneas, baseado no método *DRASTIC* elaborado por Aller et al. (1987).

Originalmente, o IVI compunha-se por seis variáveis com pesos específicos: profundidade do nível freático, recarga (inclui precipitação, cobertura e uso do solo), meio aquífero, mapa pedológico, topografia (declividade) e condutividade hidráulica. No IVIAP

foi proposta a redução para apenas três variáveis com pesos distintos, o que segundo os autores contempla as principais características dos meios hidrológicos e geomorfológicos que interferem na vulnerabilidade, sendo essas: profundidade do nível freático, infiltração e recarga e a permeabilidade do aquífero, onde cada variável apresenta três subclasses alfanuméricas, determinadas em alta, média e baixa.

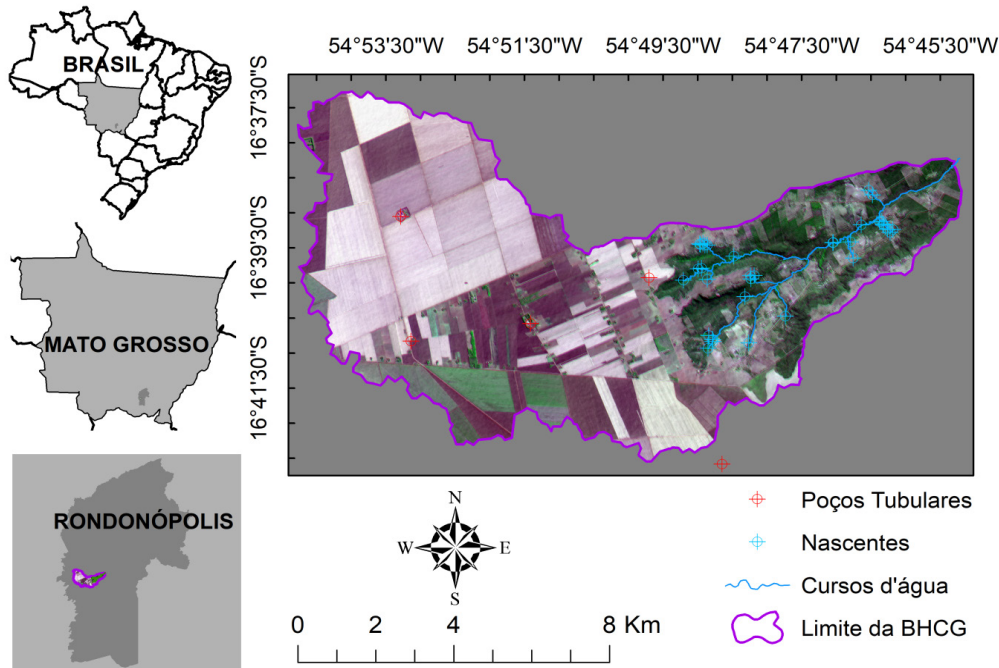
Diante do exposto, este trabalho se propõe a aperfeiçoar o IVIAP, tomando como base as variáveis hidráulicas e hidrogeológicas dos aquíferos. Para gerar o modelo foi utilizada a Bacia Hidrográfica do Córrego Grande em Rondonópolis (MT) e conferido à variável 'infiltração e recarga (IF)' como resultado da combinação matricial entre os intervalos de declividade na superfície do terreno com a densidade relativa da cobertura vegetal. Constata-se que a alta densidade de vegetação diminui o potencial de infiltração e recarga, conforme resultados obtidos em trabalhos recentes de Aguiar Junior et al. (2015a, 2015b) e Oliveira, Leite e Mattos (2017), demonstrando que o potencial de contaminação da água subterrânea é menor nestas áreas, levando em consideração a velocidade de percolação no ambiente poroso/permeável.

Essa operação visa diminuir possível subjetividade na determinação de classes e graus de infiltração e recarga subterrânea, além de atender de forma mais coerente às especificidades da densidade de cobertura vegetal presentes em áreas que apresentam transição entre fitofisionomias do bioma cerrado e interações complexas de uso do solo.

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Córrego Grande (BHCG), utilizada para teste de aplicabilidade do método proposto neste estudo, localiza-se integralmente na zona rural do município de Rondonópolis, sul de Mato Grosso. Ocupa área de 89 Km², estendendo-se por cerca de 16,80 Km no sentido oeste/leste, com largura média de 05,37 Km e perímetro aproximado de 58 Km (Fig. 1). O principal canal de drenagem na BHCG é de 3^a ordem, na classificação de Strahler (1957), ou seja, este córrego possui confluência de afluentes de 2^a ordem, derivados preliminarmente da confluência de afluentes originados de nascentes (1^a ordem).

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Córrego Grande (BHCG), Rondonópolis, MT.

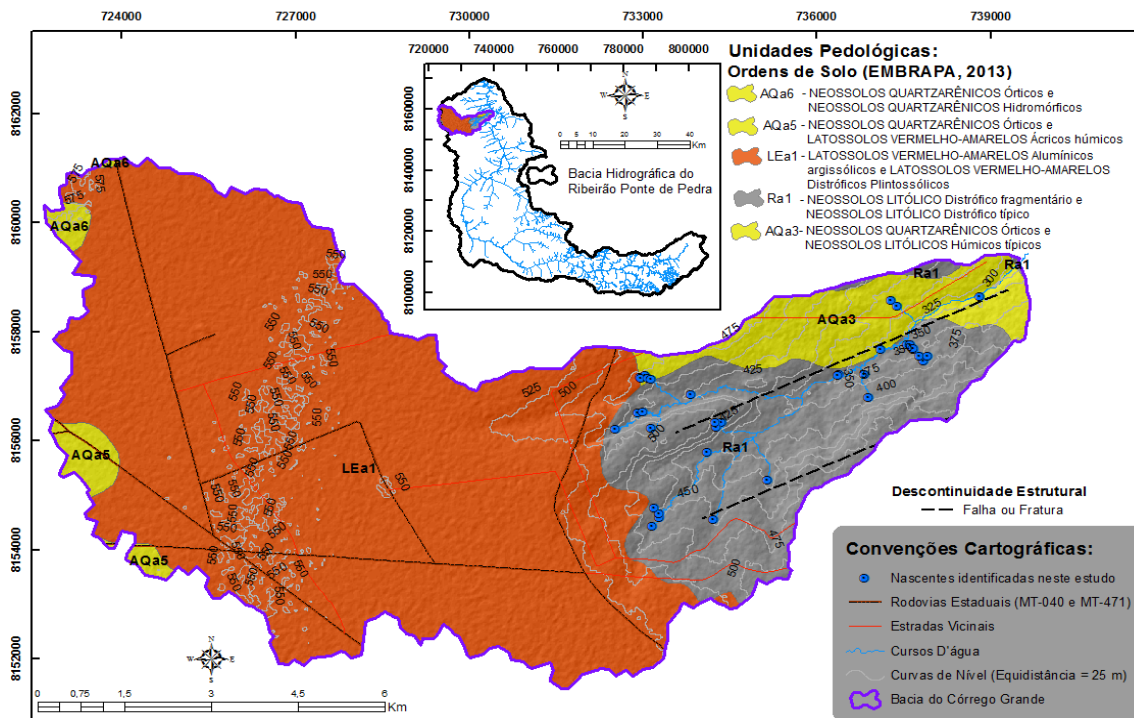


Fonte: Os autores.

O córrego Grande possui dez cachoeiras que são exploradas em atividades de turismo ecológico por moradores do assentamento Carimã. As áreas de preservação permanente deste curso hídrico são formadas por mata galeria de Cerrado e campos encharcados. De acordo com a classificação climática de Köppen, Rondonópolis apresenta clima subúmido tropical do tipo Aw, com temperatura média anual de 25°C (ALVARES et al., 2014). A precipitação média mensal na região é de 125 mm e a média anual de 1575 mm (GUIRRA; SANTOS, 2017), contribuindo para erosividade anual forte, em torno de 7.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ano⁻¹ (SALTON; COMUNELLO; FIETZ, 2013).

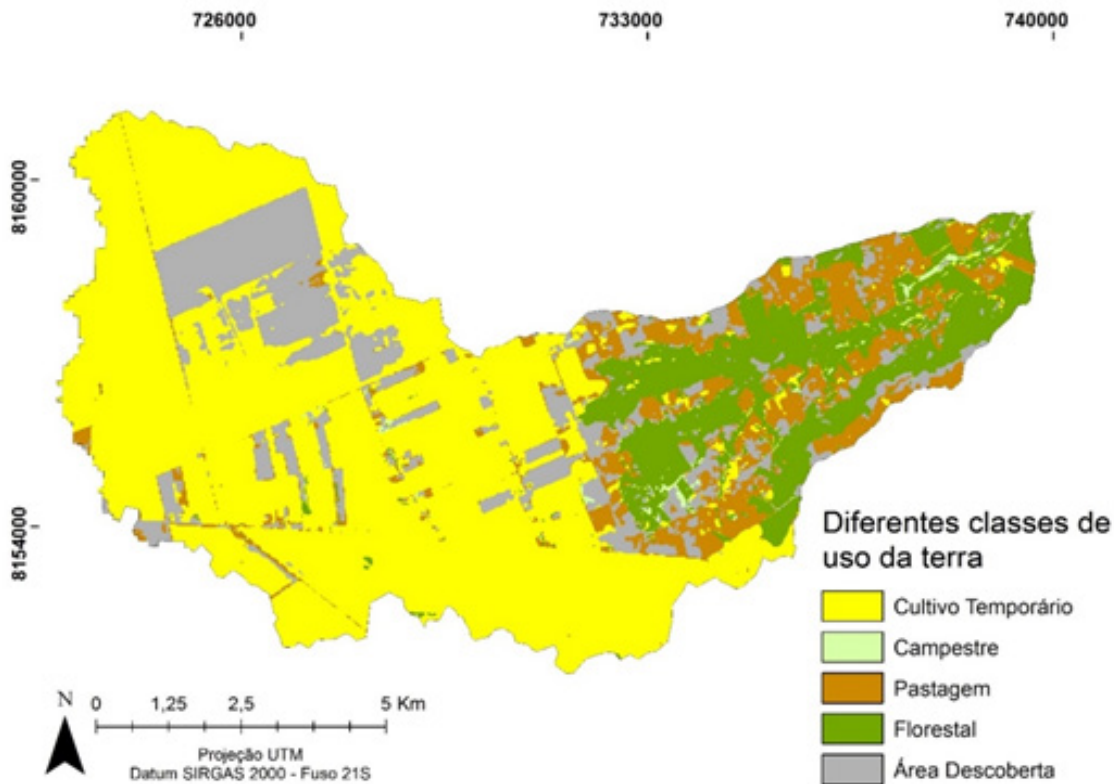
Os tipos de solos predominantes na BHCG são Latossolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos (SANTOS et al., 2013), ambos situados no setor de patamar abatido do planalto do Taquari-Alto Itiquira, além de Neossolos Litólicos, inseridos na transição entre o planalto anterior com a depressão interplanáltica de Rondonópolis (CAMARGO, 2011), conforme mostrado na Figura 2. As principais classes de uso do solo e cobertura vegetal da BHCG (Fig. 3) são cultivos temporários (predominantemente soja, milho ou algodão em período de entressafra), florestas plantadas (eucalipto mais fragmentos de vegetação nativa), campestre (campos limpos), pastagens e áreas descobertas (estradas vicinais, áreas desmatadas e afloramentos de arenito), conforme descreve Ereio (2018).

Figura 2. Unidades pedológicas da BHCG e nascentes identificadas neste estudo.



Fonte: Os autores.

Figura 3. Mapa dos diferentes usos da terra e cobertura vegetal encontrados na BHCG, Rondonópolis, MT.



Fonte: Os autores

A BHCG está inserida em duas unidades aquíferas, denominadas G1 e G4. O aquífero G1 é constituído predominantemente por paleossolos, solos areno-argilosos e argilo-arenosos, com cobertura detrito-laterítica de coloração vermelho-escura, formando crostas ferruginosas consolidadas a semi-consolidadas (CAMARGO, 2011; CPRM, 2014). Regiões onde ocorre este aquífero são correlatas às áreas de Planalto do Taquari-Alto Itiquira e Planalto dos Guimarães. As atividades predominantes agroindustriais e agropastoris sobre este aquífero revelam que a permeabilidade, bem como a recarga no nível freático deste aquífero aflorante, podem ter diminuído devido às interferências destas atividades implicarem em compactação do solo, com práticas intensivas de mecanização, aberturas de vias pavimentadas e não pavimentadas, desmatamento, queimadas e pisoteamento do gado.

Também está presente a unidade aquífera G4 (CAMARGO, 2011), hidrogeologicamente caracterizada como de alta permeabilidade, caráter contínuo, podendo ocorrer livre, semiconfinado ou confinado. Na BHCG esta unidade possui descontinuidades geológicas indiscriminadas (falhas ou fraturas) em arenitos estratificados mal classificados e subangulosos, médios a grossos, esbranquiçados, amarelados e subordinadamente avermelhados, pertencentes à Formação Furnas (CPRM, 2014). Este aquífero é do tipo poroso (porosidades intergranulares e primárias), capaz de apresentar camadas saturadas espessas e condutividade hidráulica excelente, para fins de exploração, permitindo a instalação de poços relativamente rasos.

ASPECTOS DO PLANO DIRETOR MUNICIPAL DE RONDONÓPOLIS NO QUE TANGE A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Planos Diretores são instrumentos imprescindíveis de planificação territorial (RUMBLE et al., 2019), assim sendo, o *Plano Diretor do Municipal de Rondonópolis* possui alguns mecanismos de gestão das águas, tais como os descritos a seguir:

Art. 17 - É proibido, nos imóveis que dispõem de sistema particular de abastecimento de água por meio de poços de captação de águas subterrâneas, a interligação desse sistema com o de abastecimento público. (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 06)

Art. 141 - Os cemitérios horizontais e os verticais, denominados cemitérios para sepultamento de pessoas deverão ser submetidos ao processo de licenciamento ambiental e sanitário.

I - caracterização da área na qual será implantado o empreendimento, compreendendo:

c) estudo demonstrando o nível máximo do aquífero (lençol freático), ao final da maior precipitação pluviométrica; (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 48)

Art. 143 - Os cemitérios só poderão ser construídos mediante autorização do Poder Público, observando os seguintes critérios:

I - estarem em regiões elevadas, na contravertente de água, no sentido de evitar a contaminação das fontes de abastecimento; (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 49)

Contudo, observa-se que há uma tendência em considerar como principal fonte poluidora das águas subterrâneas e superficiais apenas os cemitérios, conforme destacado no artigo a seguir:

Art. 142 - É proibida a instalação de cemitérios na Zona de Proteção Ambiental (ZPA), Zona de Unidade de Conservação (ZUC), em terrenos predominantemente cársticos, que apresentem cavernas, sumidouros ou rios subterrâneos, ou em áreas de manancial para abastecimento humano. (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 48)

O município por meio do Serviço de Saneamento Ambiental de Rondonópolis (SANEAR) prevê, entretanto, para normas e exigências não prescritas para regulação no cenário municipal, a consulta e a eficácia de legislações nas esferas Estadual e/ou Federal quando houver, tal como exposto a seguir:

Art. 18 - As tomadas de água para quaisquer fins ficarão condicionadas às exigências contidas em legislação superior e na ausência da mesma às exigências formuladas pelo Sanear e pelo órgão ambiental competente. (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 06)

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção do IVIAP da BHCG, foi realizado a sobreposição por média ponderada entre os temas de cada variável hidrogeológica, utilizando a ferramenta de álgebra de mapas integrada ao SIG *software ArcGis 10.2* (ESRI, 2013), de acordo com a fórmula (1).

$$IVIAP = (3 \times NF) + (4 \times IF) + (5 \times PA) \tag{1}$$

Onde,

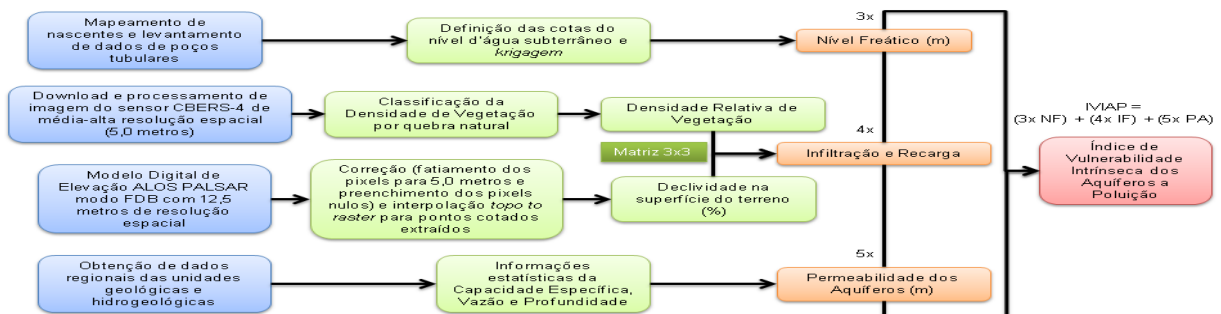
NF representa o nível freático;

IF é a infiltração e recarga;

PA corresponde à permeabilidade do aquífero.

O fluxograma da Figura 4 demonstra sinteticamente os procedimentos adotados neste trabalho.

Figura 4. Fluxograma sintético aplicado neste estudo para obtenção do IVIAP.



Fonte: Os autores.

O atual trabalho pode ser dividido em seis etapas, detalhadas a seguir:

1ª etapa: Foram utilizados dados do mapeamento das nascentes efetuados por Ereio (2018) e as informações sobre a profundidade do nível freático de cada um dos cinco poços tubulares instalados na BHCG e adjacências, cedidos pela empresa HIDROTEC – Poços Artesianos e Manutenção. Os dados das cotas do nível freático foram interpolados por krigagem pelo método das isoietas e posteriormente foram classificados em diferentes intervalos de profundidade (Tab. 1).

Tabela 1: Vulnerabilidade relacionada ao nível freático.

Método DRASTIC	Método IVIAP		
Intervalos (m)	Pesos	Intervalos (m)	Classe (Peso)
< 1.5	10	< 10.0	Alta (1)
1.5 - 4.6	9		
4.6 - 6.8	8		
6.8 - 9.1	7		
9.1 - 12.1	6	10.0 - 30.0	Média (2)
12.1 - 15.2	5		
15.2 - 22.9	4		
22.9 - 26.7	3		
26.7 - 30.5	2		
> 30.5	1	> 30.0	Baixa (3)

Fonte: Os autores.

2ª etapa: Na classificação da densidade de vegetação (DV), utilizou-se imagem do satélite sino-brasileiro CBERS-4 de média-alta resolução espacial (5 metros), pela composição falsa-cor do RGB 342 (vermelho, NIR e verde) fundida com a banda pancromática, obtida em 28 julho de 2017 pelo site do INPE (2017). Foi realizada a classificação supervisionada com o algoritmo de máxima verossimilhança do *software ArcGis 10.2* (ESRI, 2013), já com a imagem previamente corrigida. Foi atribuída classificação alfanumérica às classes de densidade de vegetação, baseando-se em critérios empíricos, as quais foram relacionadas às classes de uso e cobertura do solo (Tab. 2).

Tabela 2: Classificação alfanumérica da densidade de vegetação baseada nos critérios empíricos quanto ao uso e cobertura do solo.

Densidade	Pesos	Classes de Uso e Cobertura do Solo
Baixa densidade	1	Cultivos temporários
		Pastagens
		Áreas descobertas
Média densidade	2	Cobertura campestre
Alta densidade	3	Sistemas florestais
		Matas de galerias
		Zonas ripárias

Fonte: Os autores.

3ª etapa: O modelo digital de elevação (MDE) foi adquirido por meio do *site Alaska Satellite Facility* (2017). Desta imagem de radar extraíram-se as curvas de nível equidistantes de 1,0 metro, após fatiamento dos pixels em 1,0 m de resolução espacial. Foi extraído curvas de nível de 5,0 metros, visando atender a álgebra de mapas, onde os pontos cotados foram interpolados pelo método de isoietas *topo to raster*.

4ª etapa: Com os dados anteriormente obtidos, foi elaborado o mapa com a classificação dos intervalos de declividades na superfície do terreno associados à vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição (IVIAP), conforme proposto por Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013). Subsequente, os valores alfanuméricos foram atribuídos aos intervalos de declividade (expressos em %), onde: >12,0% é favorável ao predomínio do escoamento superficial, sendo a infiltração baixa (Peso 1), entre 6,0-12,0% média tendência à infiltração, sendo um intervalo de equilíbrio entre o escoamento a infiltração (Peso 2) e intervalos < 6,0%, nos quais há o prevalectimento da infiltração em detrimento ao escoamento superficial (Peso 3).

5ª etapa: A Tabela 3, proposta por Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013) e Tabela 4 (nova proposta) demonstram como foi avaliada a variável infiltração e recarga (IF), levando-se em consideração o resultado da combinação matricial (3x3) da justaposição entre intervalos de declividade na superfície do terreno com a densidade relativa de vegetação. Esta nova proposta oferece nove valores distintos de infiltração e recarga, restringidos em três intervalos quali-quantitativos de classes de infiltração e recarga, relativos à vulnerabilidade dos aquíferos à poluição, sendo eles: alta - Peso 1 (matriz: 1,1;1,2;2,1), média - Peso 2 (matriz: 1,3;2,2;3,1) e baixa - Peso 3 (matriz: 2,3;3,2;3,3).

Tabela 3: Determinação da variável infiltração e recarga.

Declividade (%)	Cobertura Vegetal	Peso
0.0 - 6.0	Favorável à infiltração	1
6.0 - 12.0	Densa ou moderadamente densa	2
> 12.0	Ausente ou rarefeita	3

Fonte: mod. de Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013)

Tabela 4: Reclassificação da variável infiltração e recarga.

Declividade (%)	Peso	*Cobertura Vegetal	Matriz	Peso
0.0 - 6.0	1	Ausente ou rarefeita	11 12 21	1
6.0 - 12.0	2	Densa ou moderadamente densa	13 22 31	2
> 12.0	3	Favorável à infiltração	23 32 33	3

*Ordem de classificação invertida.

Fonte: Os autores.

6ª etapa: A carta de Permeabilidade do Aquífero (PA) quanto a vulnerabilidade dos aquíferos à poluição foi elaborada por meio da compilação dos dados regionais de geologia e hidrogeologia, ambos em escala de 1:250.000. Este é um atributo físico que varia de acordo com o tipo de rocha, sendo embasado pela lei de Darcy, a qual estabelece que um meio poroso homogêneo e isotrópico tem velocidade constante, sendo medido geralmente em

metros/segundo. Com a carta geológica da Folha SD-21-X-B, disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2014) as unidades geológicas foram convertidas em unidades hidrolitológicas, conforme aplicado por Camargo (2011) no Estado de Mato Grosso. Os resultados foram enquadrados em cinco classes - A, B, C, D e E (Tab. 5).

Tabela 5: Classificação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição.

Classe	Vulnerabilidade	Pontuação
E	Muito Elevada	12
D	Elevada	13-18
C	Mediana	19-24
B	Baixa	25-30
A	Muito Baixa	31-36

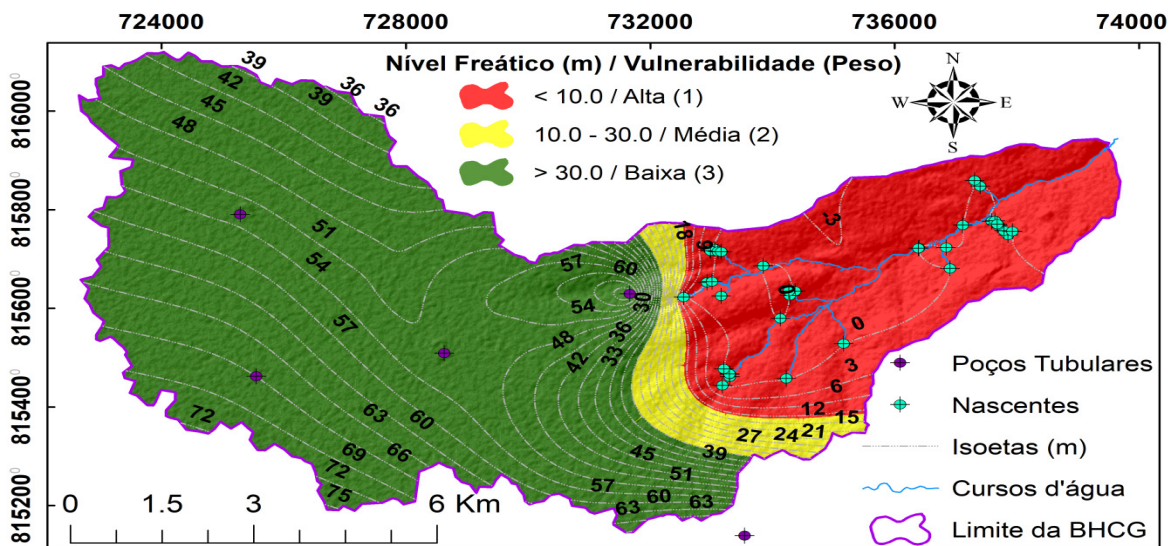
Fonte: mod. de Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O nível freático (NF) da BHCG derivado da interpolação entre os níveis piezométricos registrados durante perfuração dos cinco poços artesianos e a localização dos pontos de descarga dos aquíferos (nascentes) demonstram que para 67.89% desta bacia a vulnerabilidade à poluição é baixa. A profundidade máxima do NF estimada neste estudo foi de 75 m, situada na região extrema sudoeste da BHCG, revelando um padrão sudoeste-noroeste de ascensão do nível piezométrico em direção às nascentes. Nesta região o contorno das isoetas apresentou mais contorcido, formando bulbos, sugerindo haver a presença de cone de rebaixamento devido a exploração deste aquífero para suprir as demandas das atividades de irrigação de lavouras na BHCG.

Por sua vez, as regiões das nascentes apresentam intervalos relativamente rasos do nível freático (<10.0 metros abaixo do nível do solo) cobrindo o equivalente a 26,87% desta área, com alta vulnerabilidade à poluição dos aquíferos. Esse é considerado mais vulnerável a contaminação tendo em vista a sua maior disponibilidade hídrica, maior proximidade com fontes de contaminação, a interação com ecossistemas aquáticos superficiais, e capacidade de armazenamento. A área avaliada com nível freático entre 10.0 e 30.0 m de profundidade, portanto apresentando média vulnerabilidade à poluição, corresponde o equivalente à 5,24% da BHCG. A Figura 5 mostra o comportamento do nível freático da BHCG, na qual fica evidente a alta vulnerabilidade na região de confluência de drenagens.

Figura 5. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição quanto a profundidade do nível freático em relação ao nível do solo (em metros).

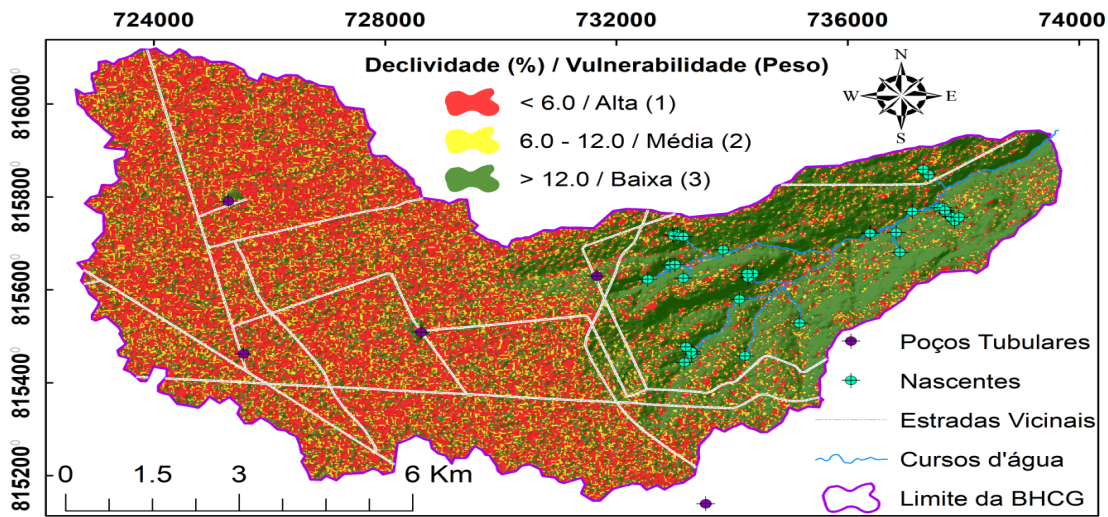


Fonte: Os autores.

O IVIAP da BHCG associada ao gradiente de declividade na superfície do terreno revela que a região com relevo predominantemente plano à suavemente ondulado, combinado com a ocorrência mútua de agricultura mecanizada, como cultivo de soja, milho e algodão, apresenta maior potencial de infiltração e, portanto, os maiores índices de vulnerabilidade, correspondendo a um total de 46,19% (40,92 km²) em área da BHCG. Enquanto na porção leste, onde ocorre vales fluviais encaixados o relevo é mais acidentado, com presença de solos pouco desenvolvidos (Neossolos Quartzarênicos) associados a afloramentos rochosos de arenitos grosseiros da Formação Furnas, estratificados, fraturados e intemperizados. A vulnerabilidade do aquífero relacionada à variável declividade é baixa em aproximadamente 38,57% (34,17 km²) da BHCG.

A vulnerabilidade média ocorre de forma homogênea e difusa ao longo de toda a bacia, cobrindo área equivalente a 15,25% (13,49 Km²) da BHCG. Assim, áreas com aplicações sazonais de agroquímicos estão inseridas nas porções menos declivosas, possibilitando a chegada rápida de plumas de contaminação, atrelada a alta condutividade hidráulica dos Latossolos Vermelho-Amarelos (Fig. 6).

Figura 6. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação aos intervalos de declividade (%) na superfície do terreno.



Fonte: Os autores.

Quando analisada a densidade da cobertura vegetal da BHCG, a qual está integralmente contida em fitofisionomias do bioma Cerrado, atribui-se que quanto maior a densidade de cobertura vegetal por unidade de área menor será a capacidade de infiltração e recarga da água no aquífero (OLIVEIRA; LEITE; MATTOS, 2017) e portanto, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação/poluição tenderá a ser menor, sendo estas áreas favoráveis a mitigação dos efeitos colaterais prejudiciais dos contaminantes, removendo-os com maior eficácia (AGUIAR JUNIOR et al., 2015a; 2015b).

É observado que grande parte da região possui baixas densidades de cobertura vegetal, equivalente a 67,26% (59,61 Km²) da área total da BHCG, conseqüentemente, uma alta vulnerabilidade à poluição dos aquíferos, sobretudo na porção com relevo plano a suavemente ondulado.

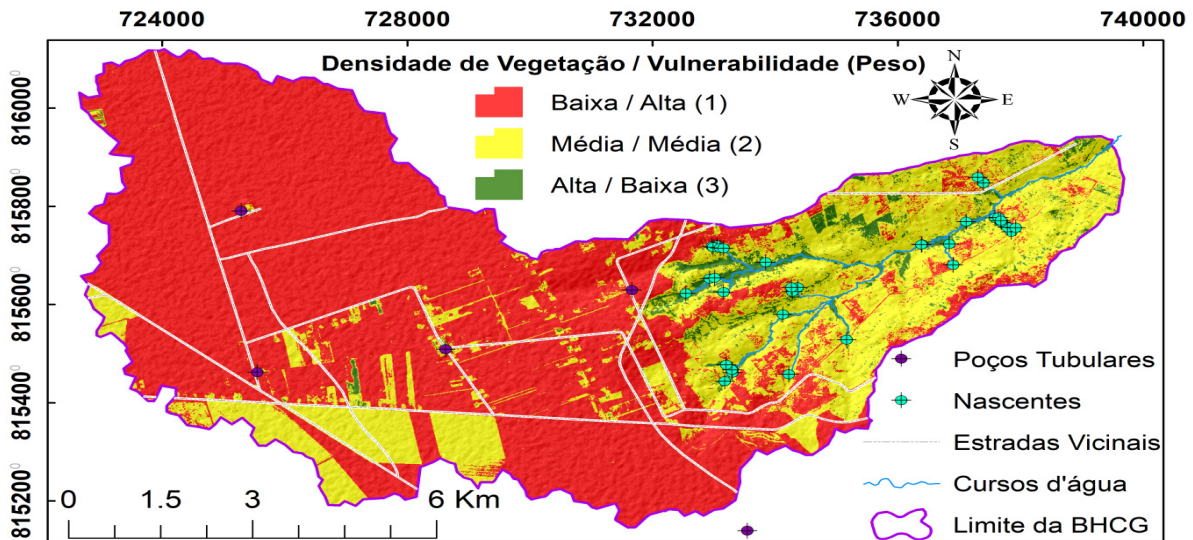
A escassez de cobertura vegetal está relacionada aos processos de desmatamento progressivos (intencionais e acidentais), ocorridos ao longo da implantação de reforma agrária, iniciado no final dos anos 1990 nesta região (EREIO, 2018). Esta autora relata que houve incêndios florestais e a isenção de Reserva Legal atribuída aos loteamentos do assentamento Carimã pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA).

As áreas de médias densidades da cobertura vegetal e que correspondem a vulnerabilidades médias, estão localizadas nas regiões de ocorrência de Neossolos Litólicos e Quartzarênicos, ambos com baixa aptidão para agricultura (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004). Áreas destinadas à Reserva Legal extrativista e com cultivo temporário alcançando a fase de colheita, estão inseridas nas regiões com Latossolos Vermelho-Amarelos, solos com média à alta aptidão agrícola (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004). Este último aspecto (cultivo temporário), demonstra que a densidade relativa de cobertura vegetal tende a apresentar arranjos espaciais distintos ao longo dos períodos de safra e entressafra, pois processos como aração e gradagem do solo são utilizados no preparo das lavouras, expondo

parcial ou totalmente o terreno. A vulnerabilidade média dos aquíferos quanto a densidade de cobertura vegetal nestas condições cobre cerca de 29,35% (26,00 Km²) desta região.

Densidades altas de cobertura vegetal estão restritas às Áreas de Preservação Permanente (APPs) do curso de drenagem (zonas ripárias) do Córrego Grande e secundariamente as áreas com plantio de eucalipto (Fig. 7). De acordo com Ereio (2018), a cultura de eucaliptos dentro do assentamento Carimã, inserido em sua maioria na BHCG, é praticada desde o ano de 2008, como forma de reflorestamento e fonte de renda para alguns de seus assentados. As altas densidades de vegetação funcionam como zonas tampão de contaminação por lixiviação de pesticidas em áreas agrícolas, sendo a largura da mata ciliar ou vegetação ripária um fator determinante na eficiência da remoção destes contaminantes no sistema hidrogeológico, (AGUIAR JUNIOR et al., 2015a; 2015b; SILVA et al., 2017; VACCHIANO et al., 2019). Os mesmos autores recomendam largura superior a 36 metros de vegetação lenhosa, através de práticas de conservação dos ecossistemas agrícolas.

Figura 7. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a densidade relativa de cobertura vegetal.



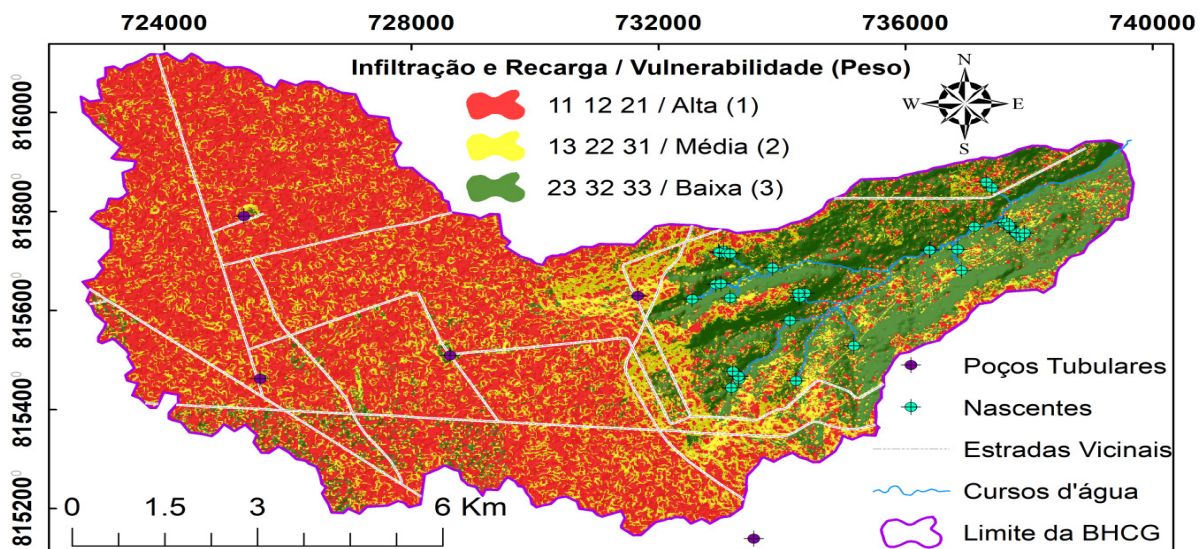
Fonte: Os autores.

Os médios índices de vulnerabilidade à contaminação registrados, para a componente infiltração e recarga (IF), abrangem a área de transição do planalto escalonado do Taquari-Alto Itiquira, com a Depressão Interplanáltica de Rondonópolis, entre domínios de Latossolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Litólicos, apresentando diversificadas formas de uso e cobertura do solo. Neste contexto, verifica-se que em 3,35% (2,97 Km²) do total da área da BHCG há baixa vulnerabilidade à contaminação relacionada à infiltração e recarga do aquífero. A vulnerabilidade quanto a infiltração e recarga das unidades aquíferas da BHCG apresentaram índices elevados, com cerca de 57,18% (50,65 Km²), ocupando preferencialmente o compartimento da alta vertente da BHCG, onde concentram-se predominantemente atividades agrárias de culturas de ciclo curto e pastagem.

A menor densidade de vegetação associada à declividade abaixo de 6,0% contribui para elevadas vulnerabilidades neste setor. Nas APPs do Córrego Grande, nos limites do curso de drenagem, onde ocorre vegetação densa de porte arbóreo, a vulnerabilidade à poluição apresenta-se baixa para esta variável geoambiental, cerca de 21,00 %, equivalente à cerca de 18,60 Km² (Fig. 8).

A mudança no uso e cobertura da terra no cerrado tem potencial para modificar as taxas de recarga das águas subterrâneas, assim como as terras cultiváveis provavelmente aumentam a recarga. Por outro lado, a substituição do Cerrado por cultivos florestais, tal como eucalipto, demonstra que as taxas de recarga tendem a diminuir, como constatado por Oliveira, Leite e Mattos (2017) ao monitorar flutuações do nível freático de 58 poços do Sistema Aquífero Guarani, entre 2011 e 2013, em áreas cobertas por fitofisionomias do Cerrado.

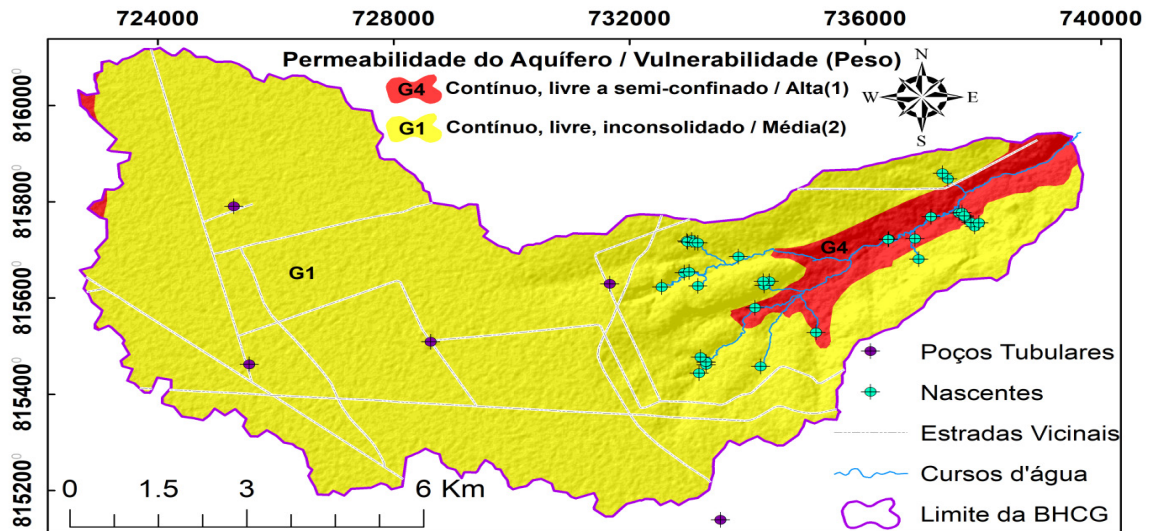
Figura 8. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a infiltração e recarga.



Fonte: Os autores.

Ao examinarmos a vulnerabilidade dos aquíferos a poluição em relação a componente permeabilidade, foi constatada duas unidades hidrogeológicas com comportamentos de vazão, capacidade específica e permeabilidades bem distintas. De acordo com critérios estatísticos, dados de poços e mapeamentos realizados por Camargo (2011), a BHCG é compartimentada nas unidades aquíferas G1 e G4 (Fig. 9).

Figura 9. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a permeabilidade.



Fonte: Os autores.

A unidade aquífera G1 abrange a maior parte da BHCG, com área correspondente a 92,94% (82,34 Km²), e está associada à vulnerabilidade média devido suas características hidrolíticas, como: alta permeabilidade, caráter contínuo, podendo ocorrer livre, semiconfinado ou confinado (CAMARGO, 2011). Esta unidade é correlata à superfície paleogênica peneplanizada com latolização. Entretanto, devido às características hidrolíticas, o aquífero se torna mais sensível à contaminação por agentes externos, necessitando avaliação da qualidade da água antes de ser inserido no sistema de abastecimento público.

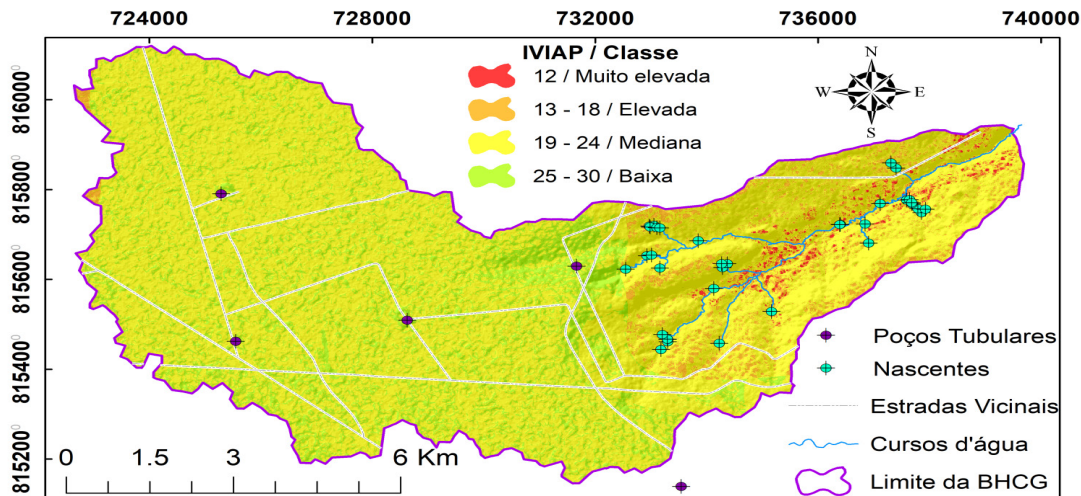
As nascentes deste aquífero (G4) na BHCG estão relacionados a fontes do tipo depressão e contato. O aquífero G1 sobreposto ao G4 é de domínio poroso e inconsolidado, promove influência direta no potencial de recarga, exfiltrando água a partir da zona de contato entre ambos, onde a zona saturada é constituída por rochas intensamente alteradas pelo perfil de intemperismo. Sendo assim, a vulnerabilidade à poluição da unidade aquífera G4 é avaliada como alta, o que corresponde a uma área total de aproximadamente 7,06% ou 6,25 Km² da BHCG. Esta unidade ocorre tanto no setor nordeste-leste da bacia, condicionada ao vale fluvial encaixado com rochas aflorantes ao longo da drenagem principal do Córrego Grande, bem como no setor extremo noroeste, ao longo do limite do divisor de bacias, onde se localizam morros testemunhos.

A vulnerabilidade intrínseca à poluição da BHCG que cerca de 77,11% do total desta área (68,31 Km²) possui classes de vulnerabilidade mediana (Classe C). Outros 17,63% apresentam índices de vulnerabilidade baixa (Classe B), não sendo caracterizado nenhum setor com muito baixa vulnerabilidade (Classe A). Os índices muito elevados do IVIAP correspondem ao equivalente a 0,72 Km², ou seja, 0,82% do total da área da BHCG, e cerca de 3,94 Km² (4,44%), atingiu índices elevados.

Os índices graves estão condicionados, sobretudo com as características hidrogeológicas do nível freático e da permeabilidade do aquífero, as quais assumem maior predisposição a contaminação no aquífero G4. Neste aquífero há predomínio de declividades elevadas e

maior densidade de vegetação, permitindo menor vulnerabilidade relacionada à variável infiltração e recarga, entretanto o IVIAP manteve-se elevado, demandando maior proteção neste setor, o qual é correlato às áreas com maior concentração de nascentes (Fig. 10).

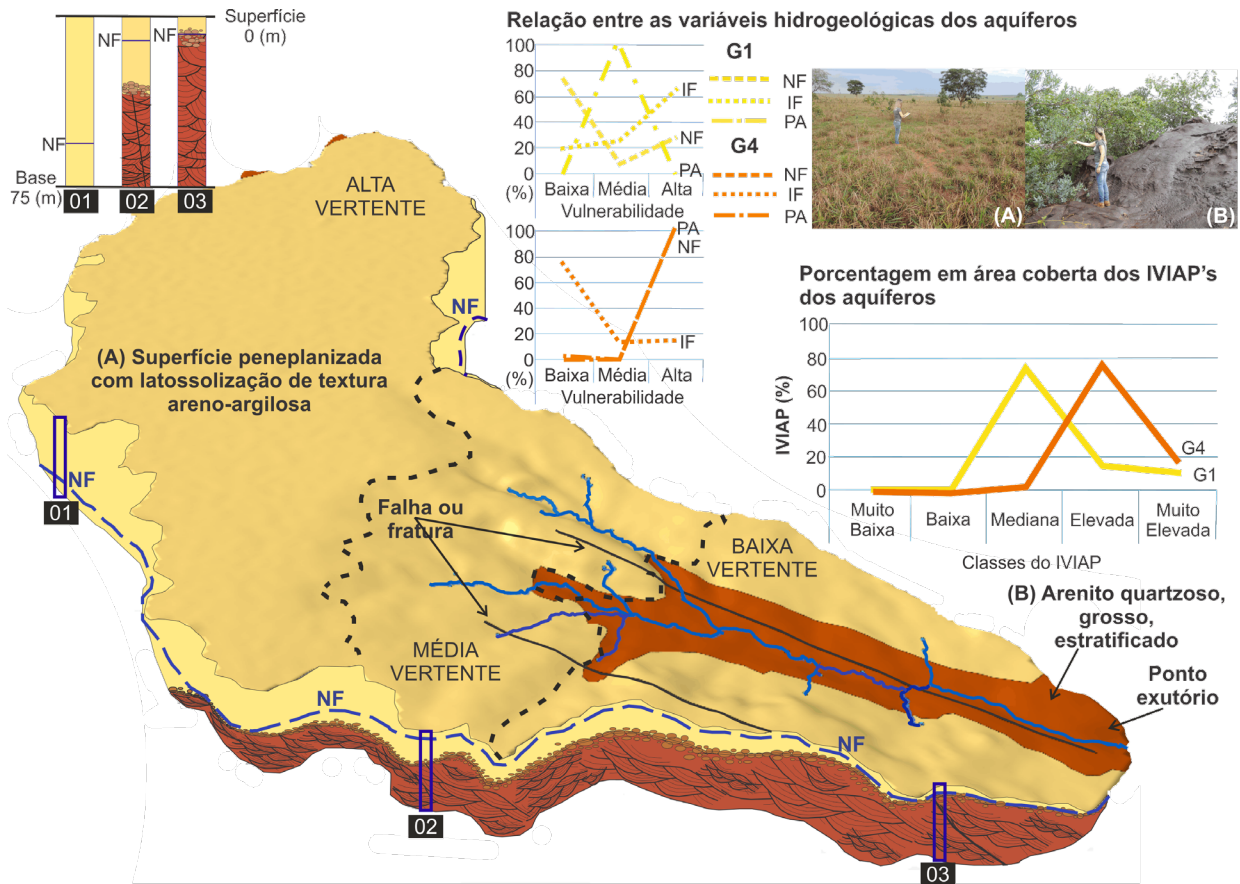
Figura 10: Vulnerabilidade intrínseca à poluição dos aquíferos da BHCG.



Fonte: Os autores.

Ao longo do Córrego Grande existem fraturas/falhas não preenchidas com alto mergulho (75-90°) (CPRM; 2014). Provavelmente essa condição é um dos motivos que favorece a ocorrência de sumidouros, bem como a evidência de migração de nascentes. A oscilação do nível freático, onde este é raso, promove o encharcamento do terreno, especialmente próximo às veredas e zonas ripárias, favorecendo o hidromorfismo e a concentração de matéria orgânica nos horizontes superficiais de solos de caráter flúvico e/ou concrecionário amplamente mapeados no território rondopolitano. Nesse contexto foi determinado que o aquífero G1 (Figura 11.A) é de classe C para o IVIAP, enquanto o aquífero G4 (Figura 11.B) enquadra-se na classe D.

Figura 11: Modelo conceitual dos aquíferos G1(A) e G4(B) na BHCG e suas vulnerabilidades à poluição associadas as variáveis hidrogeológicas do IVIAP.



Fonte: Os autores.

Trojan (2015) ao analisar a vulnerabilidade à contaminação por agroquímicos na região de Ponta Grossa, em porção aflorante do aquífero Furnas, sob um sistema de produção agrosilvipastoril, condição semelhante à deste estudo, também detectou elevada vulnerabilidade. Este autor, ao analisar amostras de água subterrânea constatou presença de compostos agroquímicos de nitrogênio e seus derivados, além de pesticidas. O que revela, segundo ele, que mesmo em sistemas agrosilvipastoris, os quais integram numa mesma área, o plantio de roçados, a criação de animais e a preservação da mata, não possuem atributos que garantam a mitigação da contaminação dos recursos hídricos por agroquímicos.

No Brasil, há um grande número de agroquímicos extremamente tóxicos e altamente tóxicos com uso autorizado, sendo aplicados sazonalmente em culturas agrícolas de alimentos habitualmente consumidos neste país, o que de acordo Hess (2018) demonstra a urgente necessidade de aperfeiçoamento na atual legislação. Segundo Pignati, Calheiros e Neri (2018), no Brasil as maiores incidências de agravos à saúde (intoxicações, cânceres, má-formação e crises respiratórias), são correlatas as regiões de maior produtividade agrícola, demonstrando que os municípios de base econômica agroindustrial estão conseqüentemente mais expostos à cenários de contaminação por agroquímicos. Nesse sentido, a utilizações

periódicas de pesticidas e agroquímicos em geral, em monoculturas, ao longo de vários anos dessas atividades na BHCG potencializam ainda mais a chegada de contaminantes em suas unidades aquíferas, principal fonte de captação de água para a população nela inserida. Vale ressaltar que Balsan et al. (2019) contribuíram para a especialização e identificação de pontos de monitoramento de recursos hídricos predispostos a contaminação por pesticidas, superficiais e/ou, subterrâneos, propondo um método alternativo e genérico, o qual estabelece plano de informações hierarquizados em SIG.

Na BHCG há também problemas relacionados à incidência e evolução de processos erosivos lineares, os quais aliados a práticas não conservacionistas em solos mecanicamente frágeis (ROSS, 1994), intensificam o assoreamento do córrego Grande, com elevado aporte de sedimentos para o canal de drenagem principal.

CONCLUSÕES

O método de espacialização da vulnerabilidade à poluição de aquíferos adotado neste estudo (IVIAP) apresenta-se como um modelo eficaz na prevenção e gestão dos recursos hídricos em escala regional, podendo ser replicado em qualquer outra unidade hidrogeológica do Cerrado.

Foi constatado neste estudo que o aquífero poroso, Formação Furnas, ao ocorrer na forma livre, é interceptado por sistemas de descontinuidades geológica-estruturais (falhas ou fraturas), em compartimentos geomorfológicos mais dissecados (domínio de depressão), favorecendo elevada densidade relativa de nascentes, mais predispostas à propagação de contaminantes no sistema ecológico aquático.

Há necessidade de implantação de alternativas que priorizem a preservação e conservação da quantidade e qualidade das águas subterrâneas, sobretudo na unidade aquífera Furnas, tanto na BHCG quanto em outras regiões onde a mesma ocorre na forma livre.

É salutar ao Plano Diretor Municipal de Rondonópolis explicitar outras potenciais fontes poluidoras, além dos cemitérios, estabelecendo graus de risco à contaminação para as mesmas, a fim de contemplar maior número de atividades que fazem uso da água e que inerentemente geram danos às reservas hídricas existentes.

REFERÊNCIAS

- ADAMAT-AL, R.; AL-SHABEEB, A.A. A simplified method for the assessment of groundwater vulnerability to contamination. **Journal of Water Resource and Protection**, v.9, n.3, p.305-321, 2017. DOI: 10.4236/jwarp.2017.93020
- AGUIAR JUNIOR, T.R.; BORTOLOZO, F.R.A.; HANSEL, F.A. et al. Riparian buffer zones as pesticide filters of no-till crops. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, n.14, p.10618-10626, 2015a. DOI: 10.1007/s11356-015-4281-5
- AGUIAR JUNIOR, T.R.; RASERA, K.; PARRON, L.M. et al. Nutrient removal effectiveness by riparian buffer zones in rural temperate watersheds: The impact of no-till crops practices. **Agricultural Water Management**. v.149, n.1, p.78-80, 2015b. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.10.031

ALASKA SATELLITE FACILITY. Imagem de Radar ALOS-1 (*Advanced Land Observing Satellite*) PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) - **JAXA** (*Japan Aerospace Exploration Agency*). Disponível em: <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> Acesso em: 22 set. 2017.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H. et al. **DRASTIC**: a Standardized System for Evaluating Ground-Water Potential using Hydrogeologic Settings. Oklahoma: Ada, 1987.

ALVARES, C.A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.S. et al. Köppen's climate classification map of Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

BALSAN, L.; GUIRRA, A.P.M.; BARBOSA, D.S. et al. Espacialização do risco intrínseco à contaminação por pesticidas em corpos hídricos e determinação de pontos de monitoramento. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n.1, p. 496-513. 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_496_513

CAMARGO, L. (Org.). **Abordagem socioeconômico-ecológica**. Atlas de Mato Grosso - Cuiabá: Entrelinhas / SEPLAN - MT, 2011.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. GEOBANK. **Carta Geológica da Folha Rondonópolis (SE-21-X-B). Escala 1:250.000**. 2014. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>> Acesso em: 28 jun. 2017.

EREIO, P.K.B. **Qualidade ambiental das nascentes do Córrego Grande na bacia hidrográfica do Ribeirão Ponte de Pedra (Rondonópolis, MT)**. Rondonópolis, 2018. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT.

ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013. **ArcGis Desktop**: Release 10.2.1. Redlands, CA, U.S.A.

FILIZZOLA, B.R.; MAGALHÃES JÚNIOR. A.P.; FELIPPE, M.F. Proposta metodológica para desenvolvimento do índice de risco à poluição das águas de nascentes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...**

GEMAIL, K.S.; ALFY, M.E.; GHONEIM, M.F. et al. Comparison of DRASTIC and DC resistivity modeling for assessing aquifer vulnerability in the central Nile Delta, Egypt. **Environmental Earth Sciences**, v.76, n.350, p.1-17, 2017. DOI: 10.1007/s12665-017-6688-4

GUIRRA, A.P.M., SANTOS, C.A.M. O uso de geoestatística na correlação entre graus de vulnerabilidade e fragilidade ambientais associados à intensidade pluviométrica e erosividade das chuvas em parte da região sudeste e centro-sul matogrossense. In: PEREZ FILHO, A; AMORIM, R.R. (org). **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2017. p. 1375-1387. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2046

HESS, S.C. Brasil, o país campeão no uso de agrotóxicos. In: HESS, S.C. (ed.), **Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil**. São Paulo:, Expressões, 2018.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Imagem CBERS-4**. Disponível em <<http://geocatalogo.mma.gov.br/index.jsp>> Acesso em: 11 nov. 2017.

NOBRE, R.C.M.; NOBRE, M.M.M.; ROTUNNO, O.C.F.; MANSUR, W.J. Mapeamento do Índice de Perigo ao Consumo de Águas Subterrâneas Vulneráveis à Contaminação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.2, p.101-111, 2008. DOI: 10.21168/rbrh.v13n2.p101-111

OLIVEIRA, P.T.S.; LEITE, M.B.; MATTOS, T. et al. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian Cerrado. **Ecohydrology**, v.10, n.2, p.1-8, 2017. DOI: 10.1002/eco.1759

PEREIRA, L.C.; LOMBARDI NETO, F. **Avaliação da aptidão agrícola das terras**: proposta metodológica. Jaguariaúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2004.

PIGNATI, W.A.; CALHEIROS, D.F.; NERI, F.A. O modelo de (des)envolvimento agrícola em Mato Grosso e os impactos dos agrotóxicos na saúde ambiental e humana. In: HESS, S.C. (ed.), **Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil**. São Paulo: Expressões, 2018. p.165-188.

RONDONÓPOLIS. **Plano Diretor Participativo de Desenvolvimento Urbano e Ambiental do Município de Rondonópolis**. Lei Complementar n. 43, de 28 dez. 2006. Rondonópolis, 2006.

- ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, p.63-74, 1994. DOI: 10.7154/RDG.1994.0008.0006
- RUMBLE, H.; ANGEOLETTO, F.; CONNOP, S. et al. Understanding and applying ecological principles in cities. In: LEMES DE OLIVEIRA, F.L.; MELL, I. (Eds.). **Planning Cities with Nature: Theories, Strategies and Methods**. Amsterdam: Springer Nature, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01866-5_15
- SALTON, J.C.; COMUNELLO, E.; FIETZ, C.R. **Estimativa de índices de erosividade da chuva para o Estado de Mato Grosso**. Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2013.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2013.
- SILVA, N.M.; ANGEOLETTO, F.; SANTOS, J.W. et al. The negative influences of the new Brazilian forest code on the conservation of riparian forests. **European Journal of Ecology**, v.3, n.2, p.116-122, 2017. DOI: 10.1515/eje-2017-0019
- STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v.38, n.1, p.913-920, 1957. DOI: 10.1029/TR038i006p00913
- TROJAN, M. **Análise da vulnerabilidade à contaminação por agroquímicos do aquífero Furnas sob uso agrossilvipastoril**. Curitiba, 2015. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, UFPR.
- VACCHIANO, M.C.; SANTOS, J.W.C.M.; ANGEOLETTO, F.; SILVA, N.M. Do Data Support Claims That Brazil Leads the World in Environmental Preservation? **Environmental Conservation**, v.46, n.2, p.118-120, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892918000371>

Data de submissão: 28/fev. /2019

Data de aceite: 30/ jul. / 2019