Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Características hidrogeológicas e vulnerabilidade à contaminação das unidades aquíferas da bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante - Jaciara (MT)

Vanderley Severino dos Santos¹, Reinaldo Lorandi²

¹Professor Titular, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - Campus Cuiabá. Av. Mario Palma, 125, bairro Jardim Mariana, Cuiabá, MT, CEP: 78040-640 - Brasil - email: rovander@gmail.com (autor correspondente). ²Professor colaborador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos. Rodovia Washington Luis, km. 235. São Carlos, SP, CEP: 13565-905, Brasil - email: lorandir@gmail.com.

Artigo recebido em 12/04/2017 e aceito em 23/07/2017

RESUMO

O aumento na demanda por água e o aumento da poluição compromete a qualidade natural das águas subterrâneas. Conhecer o comportamento hidrogeológico dos aquíferos é importante para analisar a vulnerabilidade desse sistema, assim como, identificar e monitorar as fontes potenciais de poluição. Com base nesta preocupação os objetivos desse trabalho foram identificar, caracterizar e mapear as unidades aquíferas da bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante (Jaciara, Mato Grosso, Brasil), bem como, determinar a vulnerabilidade à contaminação das unidades aquíferas utilizando o método de G.O.D (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table). Os mapas foram produzidos na escala 1:50.000. Os resultados mostram que nos 339,56 km² da bacia ocorrem os aquíferos Cachoeirinha, Furnas e Ponta Grossa e a atividade agrícola predominante é o cultivo da cana-de-açúcar. Foi verificado também que o aquífero Cachoeirinha é do tipo poroso livre e apresenta extrema vulnerabilidade e ocupa 74,01% da área. O aquífero Furnas também é do tipo poroso livre apresenta média vulnerabilidade e ocupa 25,73% da área. O aquífero Ponta Grossa é do tipo misto apresenta baixa vulnerabilidade e ocupa somente 0,26% da área total da bacia.

Palavras-chave: Água subterrânea, mapeamento, risco de poluição.

Hydrogeological features and vulnerability to contamination of aquifer units in basin of Amaral and Brilhante River - Jaciara (MT)

ABSTRACT

The increase in the demand for water and the increase of pollution compromise the natural quality of groundwater. The knowledge of the hydrogeological dynamics in aquifers it is basic importance to analyze the degree of vulnerability of this system, as well as identifying the potential sources of pollution. For this reason, this work aims to identify, characterize and map the aquifer units of the Amaral and Brilhante (Jaciara, Mato Grosso, Brazil) river basin, as well as assess the vulnerability to pollution of these aquifer units using G.O.D method (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table). The studied basin has an area of 339.56 km²; the maps have been created in a 1: 50.000 scale. The results show the occurrence of Cachoeirinha, Furnas and Ponta Grossa aquifers. It has been found out that sugarcane crops are predominant in the area, that the Cachoeirinha aquifer can be classified as belonging to the free porous type, that it is extremely vulnerable and occupies 74.01% of the region; the Furnas aquifer is also a free porous type aquifer, presents an average vulnerability and occupies 25.73% of the region. Finally, the Ponta Grossa aquifer belongs to the mixed type and presents low vulnerability, occupying only 0.26% of the region.

Keywords: Groundwater, mapping, risk of pollution.

Introdução

Um aquífero corresponde a um reservatório subterrâneo de águas. Suas camadas ou formações geológicas são relativamente permeáveis, apresentam capacidade de armazenar

e transmitir água em quantidade suficiente para o aproveitamento como fonte de abastecimento e usos diversos (Iritani e Ezaki, 2009).

Segundo a Resolução 15 do CONAMA (2001), um aquífero corresponde a um corpo

hidrogeológico que acumula e transmite água através dos poros, fissuras ou espaços que resultam da dissolução e do carreamento de materiais rochosos.

As águas acumuladas em aquíferos correm o risco de contaminação em consequência dos efeitos da poluição provocada pela urbanização desordenada e impactos provocados pelas atividades agrícolas, industriais e de exploração mineral (Foster et al., 2006).

A tomada de consciência da importância que as águas representam para o desenvolvimento humano fez aumentar a preocupação com a segurança dos mananciais subterrâneos (Rocha et al., 2003).

Devido ao aumento da preocupação com a degradação das águas subterrâneas surgiram inúmeros estudos que contribuem com conhecimentos que podem ser utilizados em planos de conservação desse recurso natural. Porém, estes estudos não são suficientes e precisam ser expandidos para diversas regiões.

Segundo Arraes (2008), ainda são necessários estudos para obter informações complementares sobre as bacias hidrogeológicas e as relações que estas apresentam com as bacias hidrográficas sobrepostas.

A bacia hidrográfica é a unidade física utilizada em diferentes tipos de análises do ambiente, adotamos o conceito de visão integrada da paisagem e do meio ambiente quando a utilizamos como unidade de planejamento (Almeida, 2016).

Conforme Campanelli e Lorandi (2012), tendo a bacia hidrográfica como unidade física, o zoneamento (geo)ambiental é realizado para subsidiar o planejamento ambiental, durante esse processo, o mapeamento das unidades aquíferas permite identificar atributos do meio físico que podem contribuir com informações para importantes decisões.

O mapeamento das unidades aquíferas pode ser útil na compreensão do sistema hídrico e serve como base para o processo de tomada de decisão sobre o planejamento e a gestão de bacias hidrográficas (Lorandi et al., 2014; Pinheiro et al., 2015).

Além do mapeamento das unidades aquíferas, o conhecimento da sua vulnerabilidade à contaminação acrescenta informações que também podem ser essenciais para elaboração do zoneamento (geo)ambiental.

Os mapas de vulnerabilidade permitem entender os vários graus de fragilidade dos aquíferos, tendo seu emprego com o propósito de gerenciamento do desenvolvimento local e regional (Menezes Ribeiro et al., 2016).

A vulnerabilidade dos aquíferos pode ser conceituada como a facilidade com que um elemento contaminante atinge de forma negativa as águas subterrâneas. Para Foster e Hirata (1988) trata-se da susceptibilidade que um aquífero ou manancial pode ser degradado por determinada atividade executada pela ação humana.

Os métodos para determinar a vulnerabilidade à contaminação consideram o tipo de uso do solo, as características do contaminante e principalmente as características geológicas da área em questão.

O conhecimento da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos desde 1990 tornou-se importante no planejamento e controle do uso do solo e proteção dos recursos hídricos, principalmente, nos países desenvolvidos.

No Brasil, tem-se buscado conhecer a vulnerabilidade dos aquíferos, porém, acontece ainda em número reduzido e apenas alguns Estados conhecem as características dos seus aquíferos (Cutrin e Campos, 2010).

A vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos pode ser avaliada por métodos diversos, porém o método, Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table (GOD), difundido pela Organização Mundial de Saúde é o mais simplificado (Rocha et al., 2003).

Para Tavares et al. (2009) e Meira et al. (2014) o referido método é a alternativa preferida, por causa da sua simplicidade conceitual e facilidade de aplicação, pois, o mesmo apresenta vantagens, principalmente, quando a quantidade de dados disponíveis for restrita e também pelas dificuldades operacionais corriqueiras em levantamento de campo em áreas extensas.

O método GOD emprega somente dados do tipo de aquífero, da litologia e da profundidade do lençol freático, por esse motivo é usado, principalmente, nas regiões carentes de dados. Batista et al. (2017) utilizaram este método pela facilidade de determinação dos seus parâmetros e de espacialização dos dados com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas.

O método GOD foi usado no Brasil pela primeira vez no Estado de São Paulo durante a produção do Mapa de Vulnerabilidade dos aquíferos do Estado (Monteiro e Peixoto, 2013).

Santos et al. (2010) lembram que apenas o fato de um aquífero apresentar elevado índice de vulnerabilidade não significa que o mesmo se encontra contaminado, mas sim, de que o risco existe. Os autores acima afirmam que a contaminação do aquífero depende de como as atividades antrópicas sobre ele são praticadas, pois, um aquífero pode apresentar alta

vulnerabilidade, porém não ser suscetível ao risco de contaminação por estar em área isenta de fontes causadoras de poluição.

Diante da necessidade de contribuir com estudos, para obter informações regionais dos aquíferos, neste caso, da bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante (Jaciara, Mato Grosso, Brasil), apresenta-se neste trabalho, a partir das características geológicas, a identificação, a caracterização e o mapeamento das unidades aquíferas, bem como, determina-se a vulnerabilidade à contaminação desses aquíferos, utilizando o método GOD.

Material e métodos

A área de estudo está situada na borda norte do pantanal de Mato Grosso, abrange a bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante, formadores do Rio Tenente Amaral, afluente do São Lourenço, o qual pertence a bacia do Cuiabá/Paraguai/Paraná.

Localizada no município de Jaciara, na região Centro-Sul do Estado, entre as coordenadas geográficas: 15°48'S a 16°00'S e 55°00'W a 55°20'W, localização compatível com a folha SD-21-Z-D-IV-4, em uma área de aproximadamente 339,56 km² com perímetro de 75,5 km (Figura 1).

A nascente principal do Córrego Brilhante encontra-se nas coordenadas 15°49'46.37"S e 55°13'59.09"W e a do Córrego Amaral nas coordenadas 15°54'00.22"S e 55°18'17.44"W.

As rochas que compõem o substrato dessa região estão representadas pelas Formações Furnas, Cachoeirinha e Ponta Grossa. A área pertence à Província Hidrogeológica do Centro-Oeste, subprovíncia Alto Paraguai, onde predominam formas de relevo erosivas com superfície pediplanada e, superfície de aplanamento elaborada por processos de pediplanação (Lacerda Filho et al., 2004).

Na região, são encontrados relevos característicos dos compartimentos superiores e intermediários da Unidade Geomorfológica denominada Planalto dos Guimarães (Ross e Santos, 1982).

O Planalto dos Guimarães localiza-se na borda norte - noroeste da Bacia Sedimentar do Paraná, no topo de uma região de planaltos. Compõe-se de relevo plano a pouco dissecado, de amplas áreas planas, baixa densidade de canais de drenagem e altitudes entre 600 a 800 metros (Ross, 2015).

Numa escala geológica continental, a área está inserida no domínio geológico denominado Cobertura Fanerozoica (inclusive da província subandina), na compartimentação geotectônica Cráton Paraná, na Província Estrutural do Paraná (Hasui, 2012).

O clima da região é tropical quente e semi-úmido/subúmido, com média superior a 18° Celsius em todos os meses. Conforme critérios de classificação propostos por Wilhelm Köppen, o clima do local é Aw, denominado de clima tropical chuvoso de savana.

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante, em Jaciara-MT.

Conforme a classificação proposta por Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o clima do local está inserido em área de domínio de clima tropical úmido-seco ou tropical do Brasil Central com quatro a cinco meses de seca, influenciado pelas massas de ar equatorial continental (MEC), massa de ar polar atlântica (MPA) e massa de ar tropical atlântica (MTA).

A vegetação é constituída por formações Savânicas dos tipos Arborizada; Florestada; Parque e Gramíneo-Lenhosa e formações Florestais do tipo Estacional Semidecidual; Hidrófila e de Galeria.

Em termos de uso/coertura solo, ocorre predomínio do plantio de cana-de-açúcar na região, aonde se verifica também, plantações de soja, milho, sorgo, milheto e pastagens.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SIBCS (EMBRAPA, 1999), a cobertura pedológica da área é composta pelas classes de solos: Latossolos Vermelhos Ácricos; Latossolos Vermelhos Distróficos; Latossolos Vermelho – Amarelos Distróficos; Latossolos Amarelos Distróficos; Plintossolos Argilúvicos Distróficos; Plintossolos Pétricos Concrecionários Distróficos; Gleissolos Háplicos Tb Distróficos; Neossolos Quartzarênicos Hidromórficos; Neossolos Quartzarênicos

Órticos; Organossolos Fólicos Fíbricos e Afloramentos Rochosos.

As informações cartográficas com os limites e os drenos da bacia foram compiladas de FEMA (1999). Os dados da geologia da área de estudo foram baixados do portal INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais), também se obteve dados da geologia da área a partir do trabalho de mapeamento da geologia da Região Centro-Leste de Mato Grosso publicados em PETROBRAS (1970) na escala 1:100.000.

As informações geológicas em conjunto com informações de levantamentos de campos realizados durante o desenvolvimento desse estudo permitiram elaborar para o local uma nova carta geológica na escala 1:50.000.

A partir das informações geológicas contidas na legenda da nova carta, identificaram-se as unidades aquíferas, o grau de confinamento hidráulico da água subterrânea e a ocorrência de estratos de cobertura (litologia e consolidação), uma vez que, conforme Campanelli e Lorandi (2012), as unidades aquíferas guardam correspondência com as formações geológicas.

A profundidade do lençol freático foi identificada a partir do relatório de informações dos poços, disponibilizadas pelo sistema de informações de águas subterrâneas (SIAGAS),

desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM. O SIAGAS é composto por uma base de dados de poços permanentemente atualizados e de módulos capazes de realizar consultas, pesquisa, extração e geração de relatórios *on line*.

O índice de vulnerabilidade dos aquíferos foi determinado com base na aplicação da metodologia GOD (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table) proposta por Foster e Hirata (1988) e modificada por Foster et al. (2006).

Este método permite avaliar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, utilizando apenas três parâmetros: grau de confinamento hidráulico do lençol freático; Litologia da zona vadosa e camadas confinantes e espessura da zona vadosa (profundidade do lençol freático). Essas informações em geral encontram-se disponíveis e podem ser conseguidas com facilidade (Foster et al., 2006).

Bós e Thomé (2012) descrevem que por este método a avaliação da vulnerabilidade é dividida em três etapas que são interligadas e sucessivas. O índice de vulnerabilidade do aquífero é o produto da multiplicação dos três parâmetros que são associados a uma escala de valores crescentes de vulnerabilidade que pode variar de 0 a 1.

Conforme descrito em Foster et al. (2006), usando informações da carta geológica e

de relatórios técnicos foi identificado o grau de confinamento hidráulico das águas subterrâneas da bacia, para esta classificação considera-se valores entre 0 a 1, os quais são atribuídos conforme indicado na Figura 2, etapa I, permitindo, assim, obter o denominado índice “G” do método GOD.

O índice “O” do referido método foi obtido associando valores entre 0,3 a 1 as suas respectivas formas de ocorrência de estratos de cobertura e caracterização litológica e grau de consolidação da zona não saturada, assim, o grau de vulnerabilidade foi estabelecido conforme ilustra a Figura 2, etapa II.

De posse dos dados de profundidade dos poços extraídos do SIAGAS, o índice “D”, que representa a vulnerabilidade em relação à profundidade do nível da água (nível estático), foi estabelecido atribuindo valores que variam de 0,4 a 1, conforme Figura 2 etapa III.

Posteriormente, os índices relativos aos três parâmetros foram multiplicados ($G \times O \times D$) para obter os valores de vulnerabilidade dos aquíferos (Figura 3). Ou seja, o índice final integral de vulnerabilidade à contaminação do aquífero é produto dos três índices atribuídos anteriormente a cada parâmetro.

Figura 2 - Esquema para avaliação/identificação da vulnerabilidade natural à contaminação (Fonte: adaptado de Foster et al., 2006 e Bós e Thomé, 2012).

Segundo Foster et al. (2006) o mapa final apresentará áreas de vulnerabilidade classificadas com os índices assim associados: Vulnerabilidade insignificante (< 0,1), Vulnerabilidade baixa (de 0,1 a 0,3), Vulnerabilidade média (de 0,3 a 0,5), Vulnerabilidade alta (de 0,5 a 0,7) e Vulnerabilidade extrema (de 0,7 a 1,0).

Para verificar os possíveis riscos que os diferentes usos do solo podem causar ao meio ambiente, foi produzido uma 'carta de vegetação, uso e ocupação das terras' empregando imagens do satélite Resourcesat-2, câmera imageadora LISS-3, resolução espacial de 23,5 metros, órbita/ponto 321/088 de julho de 2015, bandas (b) 1, 2 e 3. Sendo a banda 1 produzida aplicando a equação 1:

$$b1 = (0.85 * b2) - (0.15 * b4) \quad (1)$$

A classificação foi realizada com o aplicativo Geographic Data Mining Analyst, GeoDMA, que para Korting et al. (2013) é um sistema de mineração de dados espaciais. O mapa resultante da classificação foi convertido ao

formato shapefile para manipulação em softwares compatíveis.

A avaliação do risco realizou-se com a operação em SIG denominada sobreposição usando os mapas de vulnerabilidade dos aquíferos e carta de vegetação, uso e ocupação das terras.

Para conhecer alguns indicadores ambientais os parâmetros morfométricos: amplitude altimétrica, direção e padrão dos canais, densidade dos rios e densidade de drenagem foram calculados conforme Christofletti (1980), com base no DEM Topodata da área. A ordem dos canais foi calculada conforme Strahler (1952).

A erosividade das chuvas foi determinada segundo a equação de Bertoni e Lombardi Neto (2005).

Os procedimentos computacionais que permitiram efetuar cálculos, tratar e manipular os dados para caracterizar e determinar a vulnerabilidade dos aquíferos foram executados utilizando principalmente o software QGIS.

As cartas foram produzidas com resolução espacial de 30 m, georreferenciadas aos parâmetros do Sistema de Referência Geocêntrico

Figura 3 - Esquema para produção em SIG de mapas de vulnerabilidade natural a contaminação, conforme método GOD (Fonte: Foster et al., 2006).

Resultados e discussão

Conforme o método de Strahler (1952) os drenos principais da bacia são de terceira ordem, na junção dos dois canais dá origem um canal de quarta ordem. Essa ordem de ramificação indica que o relevo da bacia é pouco acidentado, em geral, quanto mais ramificada for a rede de drenagem, mais acidentado será o relevo.

Os canais de drenagem principais da bacia apresentam direção NE para SW, característica também observada por Ross (2003) para os canais de drenagem dessa região. A drenagem apresenta canais muito retos, o padrão de drenagem foi identificado como subdendrítico com vales em “V” abertos ou mesmo planos, padrão típico aos desenvolvidos em rochas de resistência uniforme ou em estruturas sedimentares horizontais (Christofolletti, 1980).

A amplitude altimétrica é de 437 m, a densidade dos rios é 0,06 rios por Km², enquanto a densidade de drenagem é muito baixa (0,45 Km/Km²), consequentemente nesta bacia hidrográfica a taxa de infiltração das águas das

chuvas é grande, o que teoricamente reduz os riscos de erosão.

Na Figura 4 encontra-se o mapa com as informações geológicas do local e regional. Este mapa permite visualizar a distribuição espacial das Formações Furnas, Ponta Grossa e Cachoeirinha na Bacia do córrego Amaral e Brilhante e das demais feições geológicas na região de entorno.

Usando as informações da carta geológica foi elaborado outro documento cartográfico com as unidades aquíferas e os respectivos graus de vulnerabilidade (Figura 5). Nesta carta, observa-se que a unidade aquífera Furnas ocorre numa faixa ao longo dos principais canais de drenagem, circundada pela unidade Cachoeirinha. Foi constatado em visitas ao local que os limites litológicos entre as unidades Furnas e Cachoeirinha ocorrem na transição de um relevo inclinado para um relevo plano.

Nos dados da Tabela 1, observa-se que todas as unidades aquíferas pertencem a província hidrogeológica Centro-Oeste/Alto Paraguai e ao domínio hidrológico Bacias Sedimentares. Portanto, são sistemas aquíferos que apresentam

condições semelhantes de armazenamento, circulação e qualidade de água.

Figura 4 - Carta Geológica da bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante - (Adaptado de PETROBRAS, 1970 – Escala 1:50.000) sobreposta ao mapa geológico da região (Escala 1:250.000).

O aquífero Furnas é do tipo Poroso e Livre (Tabela 1) e conforme descrito em Lacerda Filho et al. (2004) é composto de sedimentos essencialmente arenosos, com níveis de conglomerados e siltitos argilosos, destacando-se bancos com estratificação cruzada. A litologia constitui-se de Arenito Conglomerático, interdigitado com argilito, siltito e folhelho.

A unidade aquífera Furnas ocupa 87,36 km², o equivalente a 25,73% da área total da bacia (Tabela 2). Campos (2004) classifica o aquífero Furnas como sedimentar, livre a confinado e pode apresentar vazões que variam entre 10 e 50 m³/h.

O aquífero Ponta Grossa ocupa 0,9 km², o equivalente a 0,26% da área total da bacia hidrográfica (Tabela 2). Esta unidade é de

domínio hidrológico poroso-fissural do tipo misto, aparece apenas em duas pequenas manchas situadas leste da bacia, em uma região com relevos relativamente movimentados (Figura 5).

Conforme PETROBRAS (1970) a Formação Ponta Grossa apresenta sedimentos clásticos finos de cores cinza e cinza esverdeada. Em superfície apresenta-se muito alterado por intensa laterização. Litologicamente nesta unidade são encontrados folhelhos, siltito e arenito.

O aquífero Cachoeirinha é do tipo poroso e livre, pertence ao domínio hidrológico formações cenozóicas, sua litologia é composta de sedimentos inconsolidados, areno-argilosos, de cor vermelha, parcialmente laterizados. Pode ocorrer arenito amarelado, médio grosseiro,

argiloso, estratificação espessa, sugerida por níveis de conglomerado e argilito cinza

esverdeado com grãos de areia esparsos e estratificação incipiente (PETROBRAS, 1970).

Tabela 1. Correspondência entre formações geológicas e unidades aquíferas, determinada em função da província hidrogeológica, domínio hidrológico e litologia e tipo de aquífero.

Geologia*	Unidade aquífera	Província hidrogeológica**	Domínio hidrológico**	Litologia*	Tipo de aquífero*
Formação Cachoeirinha	Cachoeirinha	Centro-Oeste (Alto Paraguai)	Bacias Sedimentares	Sedimentos Arenosos-argilosos.	Poroso e Livre
Formação Furnas	Furnas	Centro-Oeste (Alto Paraguai)	Bacias Sedimentares	Arenito Conglomerático, interdigitado com argilito, siltito e folhelho.	Poroso e Livre
Formação Ponta Grossa	Ponta Grossa	Centro-Oeste (Alto Paraguai)	Bacias Sedimentares	Folhelhos, siltito e arenito.	Misto

* Fonte: PETROBRAS (1970).

**CPRM (2004).

O aquífero Cachoeirinha predomina no local, cobrindo 251,30 km², distribuídos por toda a bacia, exceto nas proximidades e nos fundos dos vales (Figura 5), equivale a 74,01% de toda área da bacia (Tabela 2).

O mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação via de regra é a fase inicial na avaliação do risco de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade, seja em escala municipal ou estadual (Foster et al., 2006).

Os valores de vulnerabilidade observados na bacia segundo a metodologia GOD variaram de 0,175 a 1, identificando no local apenas três das cinco classes possíveis (Extrema, Alta e Baixa vulnerabilidade). Porém, com o predomínio de áreas de Extrema vulnerabilidade (Figura 5).

Na Tabela 2, constam os valores de vulnerabilidade das unidades aquíferas calculados segundo o método GOD, que considera os tipos

de aquíferos, a litologia e a profundidade do lençol freático. Tais dados permitiram mapear as unidades aquíferas e reconhecer a sua vulnerabilidade, conforme indicado na Figura 5.

Os relatórios gerados com os dados SIAGAS indicaram que os poços localizados na região foram perfurados entre os anos 2000 a 2012 com a finalidade principal de abastecimento doméstico, apresentam profundidade máxima de 120 m, mínima de 73 m e média de 94,8 m. O nível estático máximo de 29,5 m, mínimo de 22,8 m e médio 25,8 m, e desvio padrão de 2,4 m.

A análise do mapa de vulnerabilidade dos aquíferos da bacia hidrográfica dos córregos Amaral e Brilhante permitiu identificar as áreas mais e menos vulneráveis à contaminação. Essas informações segundo Santos et al. (2016) constituem-se em excelentes ferramentas para proteção das águas subterrâneas e monitoramento dos aquíferos.

Tabela 2: Vulnerabilidade (índice e classe) das unidades aquíferas, litologia, tipo de aquífero e profundidade do lençol freático e área em km² e em percentual (%) de ocupação por unidade aquífera.

Unidades aquíferas	Litologia	Tipo de aquífero	Profundidade do lençol freático	Índice de vulnerabilidade*	Classes de vulnerabilidade	Área (km ²)	Área (%)
Cachoeirinha	1	1	0,7	0,70	Extrema	251,30	74,01
Furnas	0,7	1	0,7	0,49	Média	87,36	25,73
Ponta Grossa	0,5	0,5	0,7	0,175	Baixa	0,90	0,26
						339,56	100,00

*Obtido com a multiplicação dos valores de vulnerabilidade atribuídos a Litologia e consolidação x tipo de aquífero x Profundidade do Lençol Freático.

O emprego do método GOD, permitiu calcular a vulnerabilidade dos aquíferos, essa informação contribui para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, fornecendo orientação para a correta ocupação do espaço e uso desse recurso, resultando assim, na

diminuição dos impactos negativos sobre os aquíferos (Santos et al., 2013).

As informações de vulnerabilidade dos aquíferos (Tabela 2) também podem ser úteis na elaboração do Zoneamento Ambiental desta bacia hidrográfica, conforme Lorandi et al. (2014)

informações sobre a vulnerabilidade do aquífero possibilita elaborar planos de proteção visando a manutenção da qualidade das águas subterrâneas.

A unidade Cachoeirinha apresenta extrema vulnerabilidade (Figura 5), ela é vulnerável à maior parte dos contaminantes de impacto rápido se acaso vir ocorrer contaminação. Resultado que sugere que está formação geológica é de elevada permeabilidade. Segundo Barboza et al. (2007), locais de extrema vulnerabilidade são muito mais sensíveis à ação de diversos poluentes, com rápido impacto.

A unidade Furnas foi classificada como de alta vulnerabilidade, estas áreas apresentam sensibilidade a muitos poluentes, exceto aos considerados muito pouco móveis e pouco

persistentes em várias condições de contaminação.

A unidade Ponta Grossa apresenta baixa vulnerabilidade, sendo vulnerável apenas aos contaminantes conservadores e quando continuamente lançados ou lixiviados de forma ampla (Foster et al., 2006 e Barboza et al., 2007).

No mapa de vulnerabilidade dos aquíferos (Figura 5) verificou-se o predominam regiões de extrema vulnerabilidade, cujos solos são baixa resistência à penetração de poluentes e, independentemente dessa resistência, em qualquer situação, conforme o material e o tempo em que o solo ficar exposto, os danos podem ser muito graves.

Figura 5 - Unidades aquíferas e respectivas vulnerabilidade à contaminação da bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante.

Segundo Foster et al. (2006) as atividades que se desenvolvem na superfície podem oferecer riscos a qualidade das águas subterrâneas. No mapa do uso do solo (Figura 6), que mostra as atividades desenvolvidas no local, entre as seis classes de usos mapeadas, ficou evidente o predomínio da cultura da cana-de-açúcar e, dependendo das práticas de manejo utilizadas, pode haver risco de contaminação aos aquíferos, pois, o cultivo da cana-de-açúcar em suas várias etapas exige o emprego de adubos químicos, corretivos minerais, herbicidas e defensivos agrícolas.

A sobreposição dos mapas de uso do solo ao mapa de vulnerabilidade permitiu verificar que

nos locais mapeados como de extrema vulnerabilidade é cultivado principalmente a cana-de-açúcar. Nesses locais os solos são da classe Latossolos e Neossolos Quartzarênicos que apresentam elevada perda de água por infiltração rápida, ou seja, a água poderá encontrar o lençol freático com mais rapidez.

De acordo com Costa et al. (2015), em estudos realizados na bacia hidrográfica do Ribeirão do Meio em Leme - SP, conhecer a relação entre os atributos do solo e o uso e cobertura deste é essencial para compreender o potencial de contaminação dos aquíferos.

Figura 6 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica dos córregos Amaral e Brilhante.

Além dos problemas que as formas de uso empregadas na bacia podem causar as águas subterrâneas, essas também, podem facilitar o surgimento de processos erosivos de baixa intensidade e frequência, devido ao predomínio de escoamento difuso e taxa de infiltração alta, mas, que podem ser agravados por causa da extensão das rampas, pela constituição arenosa dos materiais superficiais e principalmente pelo elevado potencial erosivo das chuvas locais que variam de 4.905 a 9.810 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ e culminar com o surgimento de processos erosivos que assoreiam os corpos d'água.

Conclusões

1. A análise do Mapa de Vulnerabilidade à Contaminação possibilitou identificar a existência de três classes de vulnerabilidade na área de estudo: Extrema, Alta e Baixa.
2. A Unidade aquífera Cachoeirinha é do tipo poroso e livre, pertence ao domínio hidrológico Formações Cenozóicas é constituída por material arenoso, predomina na bacia, ocupa 74,01% da área e, apresenta extrema vulnerabilidade à contaminação.
3. A Unidade Aquífera Furnas também é do tipo poroso e livre. Aparece em áreas mais inclinadas numa faixa ao longo dos principais canais de drenagem, ocupa cerca de 25% do total da bacia e, apresenta alta vulnerabilidade à contaminação.
4. A Unidade Ponta Grossa é do tipo misto, ocupa apenas 0,26% da área e, apresenta baixa vulnerabilidade à contaminação.
5. Os locais de extrema vulnerabilidade são explorados, principalmente, com o cultivo da cana-de-açúcar e recomenda-se que o uso do solo seja sempre realizado com adoção de práticas conservacionistas.
6. O mapeamento da vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos da bacia hidrográfica dos córregos Amaral e Brilhante oferece informações que servem para o planejamento adequado das atividades que apresentam potencial poluidor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento e Bolsa concedida ao primeiro autor, a Chefia do Departamento de Engenharia Civil (DECIV/UFSCar) pela infraestrutura disponibilizada para a execução desta pesquisa.

Referências

- Almeida, M. I. S. de, 2016. A bacia hidrográfica como unidade fundamental de análise da paisagem: a Bacia do Pacuí e a sua relação com a Bacia do São Francisco. Revista Cerrados [online] 13. Disponível: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5730811.pdf>. Acesso: 24 de mar. 2017.
- Arraes, T.M., 2008. Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas. Dissertação (Mestrado). Brasília, UNB.
- Barboza, A.E.C., Rocha, S.F., Guimaraes, W.D., 2007. Estudo preliminar da vulnerabilidade do aquífero livre localizado na região de Ponta da Fruta, Vila Velha ES. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis.
- Batista, C.S.P., Gesualdo, G. C., Leite, P.C.C., Lastoria, G., Gabas, S.G., Cavazzana, G.H., Casadei, J.de M., Azoia, de S.T., 2017. Aplicação do método GOD para avaliação de vulnerabilidade de aquífero livre em bacia hidrográfica. Águas Subterrâneas [online] 31. Disponível: http://www.abas.org/xixcabas/anais/102292_113_Artigo_CABAS_Carla_Gabriela.pdf. Acesso: 10 out. 2016.
- Bertoni, J. e Lombardi Neto, F. (2005) Conservação do solo. 5ª ed. Editora Ícone, São Paulo.
- Bós, S. M., Thomé, A., 2012. Métodos para Avaliar Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas, 1ª ed. Poa Comunicação, Porto Alegre.
- Campanelli, L.C., Lorandi, R., 2012. Importância da carta de unidades aquíferas para a elaboração de zoneamento (geo)ambiental: estudo de caso na bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. v. 29. pp. 83-90.
- Campos, H.C.N.S., 2004, Águas subterrâneas na Bacia do Paraná. Geosul [online] 19. Disponível: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/13558>. Acesso: 06 jan. 2016.
- Christofolletti, A., 1980. Geomorfologia, 2. ed. Edgard Blücher/EDUSP, São Paulo.
- CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2001. Resolução 15, de 11 de janeiro.
- Costa, C.W., Moraes, M.P., Cançado, C.J., Guerrero, J. R., Marangon, F., Lorandi, R., Lollo, J.A., Moschini, L. E., 2015. Potencial

- de Contaminação de Aquíferos por Atividades Antrópicas da Bacia do Ribeirão do Meio - Município de Leme - SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online] 20. Disponível: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/ab6c3ec547b357d7f56f1e998706fbf5afa1fcae4dc4819581711bfb63b69a25.pdf>. Acesso: 22 mar. 2016.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO E MINERALÓGICO DO BRASIL. 2004. Mapa de domínios e subdomínios hidrogeológicos do Brasil. São Paulo, mapa. Escala 1:2.500.000.
- Cutrim, A.O., Campos, J.E.G., 2010. Aplicação dos métodos DRASTIC E POSH para a determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [online] 15, Disponível em: http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/ab6c3ec547b357d7f56f1e998706fbf5_afa1fcae4dc4819581711bfb63b69a25.pdf. Acesso: 18 out. 2016.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1999. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro.
- FEMA. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 1999 Estudo Integrado da Bacia do rio Tenente Amaral uma Proposta de Zoneamento Ambiental. Cuiabá.
- Foster, S., Hirata, R.C., & Rocha, G.A. 1988. Riscos de Poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. *Águas Subterrâneas*. 175-185.
- Foster, S.; Hirata, R.C.; Gomes, D.; D'Elia, M.; PARIS, M., 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Servemar. São Paulo.
- Hasui, Y., 2012. Compartimentação Geológica do Brasil, in: Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F. M. de, Bartorelli, A. (Org.), *Geologia do Brasil*. Beca, São Paulo, pp. 112-122.
- Iritani, M.A., Ezaki, S., 2009. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. *Cadernos de Educação Ambiental.. Secretaria de Estado do Meio Ambiente*. São Paulo.
- Körting, T.S., Fonseca, L.M.G., Câmara, G., 2013. GeoDMA—Geographic data mining analyst. *Computers & Geosciences*, 57, 133-145.
- Lacerda Filho, J.V.D., Abreu Filho, W., Valente, C.R., Oliveira, C.C.D., Albuquerque, M.C. 2004. *Geologia e Recursos Minerais do Estado de Mato Grosso*. Escala 1: 1.000.000. Goiânia.
- Lorandi, R. Cançado, C.J., & Oliveira, A.R. 2014. Investigação preliminar da potencialidade de contaminação nas unidades aquíferas da Bacia Hidrográfica do Rio Almada (BA). *SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, Natal.
- Meira, J.C.R., De-Campos, A.B., P., Lindolfo C., 2014. Avaliação da vulnerabilidade, risco e perigo à contaminação de zona de recarga do aquífero Guarani com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Águas Subterrâneas* [online] 28. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27412>. Acesso : 24 de mar. de 2017.
- Mendonça, F.A., Danni-Oliveira, I.M., 2007. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. Editora Oficina de Textos, São Paulo.
- Menezes Ribeiro, D.D. de, de Moraes Nascimento, S. A., Garcia, A. J. V., 2016. Vulnerabilidade dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Marum, bacia sedimentar de Sergipe-Alagoas. *Águas Subterrâneas* [online] 30. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28634>. Acesso: 28 mar. 2017.
- Montero, R.C., Peixoto, A.S.P., 2014. Vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos no Alto Aguapeí e Alto Peixe, SP. *Ciência & Engenharia* [online] 22. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/22499>. Acesso: 29 de mar. de 2017.
- PETROBRAS. Petróleo Brasileiro S.A., 1970. *Geologia do Centro Leste de Mato Grosso*. Ponta Grossa.
- Pinheiro, R.J.B, Rauber, A. C. C., Nummer, A.V., Silva, J.L.S. da., 2015. Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria- RS. *REGA*, [online] 12. Disponível: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/19a7f83aa5a7499a23ca0433b7750f5c354b4bdec8e1107a770afca63c33e898.pdf>. Acesso: 15 de jan. 2017.
- Rocha, S.F.; Alves, M. G.; Almeida, T.A. 2003. Estudo Preliminar da Vulnerabilidade dos Aquíferos em Campos dos Goytacazes. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Belo Horizonte.
- Ross, J.L.S., 2015. Chapada dos Guimarães: borda da bacia do Paraná. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, v. 28, p. 180-197.
- Ross, J.L.S., 2003. *Geomorfologia Ambiental*. In: CUNHA, S. B. da, GUERRA, A. J. T. (Org.), *Geomorfologia do Brasil*. Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp. 351-388.

- Ross, J.L.S.; Santos, L. M. Geomorfologia. 1982. Projeto RADAMBRASIL. Folha SD-21, Cuiabá: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Rio de Janeiro, Levantamento de Recursos Naturais, 26, 193 - 256.
- Santos, A.C.B. dos, Mendes, R.L.R., Silva, G.N., Tavares, A.D.N., 2013, Vulnerabilidade de aquíferos: uma análise da aplicação do método GOD com a base de dados SIAGAS. Águas Subterrâneas [online] 31. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27856/18077>. Acesso: 30 de mar. de 2017.
- Santos, R.A., Cruz, M.J.M., Nascimento, S. A. M., 2010. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios pra uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Caderno de Geociências [online] 7. Disponível: <http://www.cadernosdegeociencias.igeo.ufba.br>. Acesso: 15 fev. 2017.
- Santos, R.G., 2016. Geoprocessamento aplicado a análise do índice de vulnerabilidade DRASTIC no sistema aquífero Guarani em Ribeirão Bonito-SP. Revista Brasileira de Cartografia [online] 68. Disponível: <http://www.rbc.lsie.unb.br/index.php/rbc/article/view/897>. Acesso: 27 de set. de 2016.
- Strahler, A.N., 1952. Hypsometric (area altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, v. 63, n. 11, p. 1117-1142.
- Tavares, P.R.L., Castro, M.A.H. de, Costa, C.T.F. da, Silveira, J.G.P. da, Almeida JR. F.J.B. de. 2009. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. REM [online] 62. Disponível: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672009000200015. Acesso: 29 mar. de 2017.