

## VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO ALTER DO CHÃO EM SUA ÁREA DE AFLORAMENTO NO MUNICÍPIO DE ITACOATIARA/AM

Contamination vulnerability of the aquifer Alter do Chão in outcropping area in the municipality of  
Itacoatiara/AM

Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Alter do Chão en su área de afloramiento en el municipio de  
Itacoatiara/AM

Miqueias Lima Duarte  
Universidade Federal de Rondônia  
[miqueiaseng@hotmail.com](mailto:miqueiaseng@hotmail.com)

Marília Locatelli  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agroflorestal de Rondônia -EMBRAPA.  
[marilialocatelli@yahoo.com.br](mailto:marilialocatelli@yahoo.com.br)

Eliomar Pereira da Silva Filho  
Universidade Federal de Rondônia

### Resumo:

As águas subterrâneas são fontes essenciais ao suprimento das necessidades humanas. A proteção desses mananciais é de suma importância à manutenção dos ciclos naturais no ambiente e à continuidade do desenvolvimento humano, pois, à medida que aumentam as demandas de utilização dos recursos hídricos superficiais, crescem os casos de poluição desses recursos. Objetivou-se com este estudo avaliar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero Alter do Chão na área de afloramento no município de Itacoatiara/AM, por meio do uso do método GOD (*Groundwater occurrence; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table*). A aplicação do método possibilitou identificar que cerca de 57,44% da área apresenta média vulnerabilidade à contaminação do aquífero, 25,98% alta vulnerabilidade à contaminação e apenas 16,54% baixa vulnerabilidade à contaminação. A predominância de média vulnerabilidade seguida de alta vulnerabilidade à contaminação do aquífero no município de Itacoatiara é preocupante, uma vez que o sistema de saneamento básico é precário e o sistema de captação de água é realizado por meio de poços rasos. Nesse sentido, é importante a adoção de medidas públicas para o melhor gerenciamento da área e proteção do manancial.

**Palavras-chave:** Aquífero livre, Alter do Chão, fragilidade ambiental.

### Abstract:

Groundwater is essential to supply sources of human needs. The protection of these watersheds is of paramount importance to the maintenance of natural cycles in the environment and to the continuity of

human development because, as they increase the demands for the use of surface water resources, growing pollution cases of these resources. The aim of this study to assess the vulnerability to contamination of the aquifer Alter do Chão in upwelling area in the municipality of Itacoatiara/AM, through the use of the method GOD (Groundwater occurrence; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table). The application of method made it possible to identify about 57.44% of the area presents average vulnerability to contamination of the aquifer, 25.98% high vulnerability to contamination and 16.54% only low vulnerability to contamination. The predominance of medium vulnerability followed by high vulnerability to contamination of the aquifer in the municipality of Itacoatiara is worrisome, since the system of basic sanitation is precarious and the water system is carried out by means of shallow wells. In this sense, it is important to adopt measures for the better management of the area and watershed protection.

**Keywords:** Free aquifer, Alter do Chão, environmental fragility.

### **Resumen:**

Agua subterránea es esencial suministrar fuentes de las necesidades humanas. La protección de estas cuencas es de suma importancia para el mantenimiento de los ciclos naturales en el medio ambiente y a la continuidad del desarrollo humano porque, a medida que aumentan las exigencias para el uso de los recursos hídricos superficiales, creciendo casos de contaminación de estos recursos. El objetivo de este estudio para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Alter do Chão en área de surgencia en el municipio de Itacoatiara/AM, mediante el método de GOD (aparición de agua subterránea; Litología global de la zona no saturada; y la profundidad de la tabla de agua). La aplicación del método permitido identificar cerca de 57.44% del área presenta media vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, 25.98% alta vulnerabilidad a la contaminación y 16.54% sólo baja vulnerabilidad a la contaminación. El predominio de vulnerabilidad media seguida de alta vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en el municipio de Itacoatiara es preocupante, ya que el sistema de saneamiento es precario y el sistema de agua se realiza mediante pozos poco profundos. En este sentido, es importante adoptar medidas para mejorar la gestión de la protección del área y cuenca.

**Palabras clave:** Libre acuífero, Alter do Chão, Fragilidad ambiental.

### **Introdução**

Os problemas advindos do uso irracional da água, seja ele no meio urbano ou rural, têm despertado cada vez mais o interesse de estudiosos e pesquisadores do mundo inteiro. Com o aumento da população mundial e o conseqüente aumento da demanda por recursos hídricos, cientistas buscam soluções visando ao uso mais eficiente e à preservação desse recurso. Por se tratar de um recurso vital para o suprimento das necessidades humanas, e sendo um fator limitante que pode comprometer o desenvolvimento econômico e social de uma região, o fornecimento de água em quantidade e qualidade adequadas para a população é um dos desafios atuais que a humanidade tem enfrentado.

Os recursos hídricos para abastecimento humano têm sido afetados negativamente em quantidade e qualidade pelas diversas atividades antrópicas exercidas na superfície do terreno, em proporções alarmantes. A boa gestão desse recurso é fundamental para o suprimento das necessidades humanas do presente, assegurando o desenvolvimento das diversas atividades fundamentais e básicas da população e garantindo o acesso desse recurso às populações futuras.

As diversas atividades exercidas pelo homem vêm causando sérios danos aos recursos hídricos. A falta de práticas adequadas quanto a sua utilização, juntamente a degradação das nascentes, a deposição de esgotamento sanitário em corpos hídricos, a deposição inadequada de resíduos sólidos e até mesmo as atividades agrícolas desordenadas tem causado grandes prejuízos a esses recursos (CLEARY, 2006, p.11; FOSTER et al., 2013). O mal-uso desses recursos por parte dos ocupantes do espaço tem comprometido a qualidade de corpos hídricos que serve como base para o abastecimento de diversos núcleos urbanos em todo o mundo.

A segurança hídrica de uma região a curto e longo prazo tem sido uma das principais preocupações atualmente. Nesse sentido, um sistema de abastecimento considerado seguro deve apresentar não apenas qualidade, bem como quantidade suficiente para suprir as necessidades da população.

Os sistemas de abastecimento de água constituídos por fontes superficiais são mais vulneráveis em quantidades e qualidade, em períodos de anormalidade nas precipitações, pois suas reservas são afetadas consideravelmente, sendo poluídas com facilidade por fontes pontuais e difusas de contaminação. Por outro lado, as águas subterrâneas são menos vulneráveis às flutuações anuais de precipitação e geralmente apresentam boa qualidade físico-química em comparação às fontes superficiais, caracterizando-se como uma reserva mais confiável para abastecimento municipal (FOSTER et al. 2006; CLEARY, 2007, p.11).

A qualidade físico-químicas das águas subterrâneas, as tornam aptas ao consumo humano, muitas vezes sem a necessidade tratamento prévio, fazendo com que sejam fonte de abastecimento de vários núcleos urbanos e no meio rural em todo Brasil. Segundo relatório da Agencia Nacional de Águas (ANA, 2010), cerca de 39% dos municípios brasileiros (aproximadamente 2.153 municípios) são abastecidos integralmente por água subterrânea para o suprimento das necessidades básicas. Cidades como São Luiz (MA), Ribeirão Preto (SP), Maceió (AL) dentre outras, são abastecidas exclusivamente por águas subterrâneas.

As vantagens da utilização de fontes subterrâneas são diversas, dentre elas destacam-se os fatos: são mais protegidas da poluição, menor custo de captação e distribuição, uma vez que a captação pode ser realizada nas proximidades da área consumidora, geralmente apresenta boa qualidade física e química dispensando tratamento prévio (AZEVEDO, 2006; FILHO et al., 2011; FOSTER et al., 2013).

Apesar das fontes de águas subterrâneas serem bem mais protegidas naturalmente contra cargas poluentes, uma vez que a zona insaturada atua como filtro natural impedindo a percolação de poluentes nos sistemas de aquíferos, sua qualidade tem sido afetada nos últimos anos. Se por um lado as fontes de água subterrâneas são excelentes reservatórios naturais para abastecimento, por outro, quando esses sistemas são

contaminados, podem levar muito tempo até que consiga promover uma descontaminação do sistema (FOSTER et al., 2006; CLEARY, 2007, p. 11).

Segundo Foster et al. (2006), são diversas as atividades exercidas na superfície do terreno que podem comprometer a qualidade desses mananciais, tais como a deposição inadequada de resíduos sólidos, o uso inadequado de insumos agrícolas, vazamentos de tanques de armazenamento de postos de combustíveis e a superexploração, no entanto, segundo o autor, o ponto de entrada mais comum de carga contaminante no sistema de aquífero tem sido poços mal instalados ou mesmo abandonados.

A avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas é uma excelente ferramenta na gestão dos recursos subterrâneos, pois por meio deste, é possível delinear áreas de proteção do aquífero, possibilitando o melhor planejamento da área (TAVARES et al., 2009; CUTRIM & CAMPOS, 2010). Existem várias metodologias de avaliação intrínseca de vulnerabilidade à contaminação de aquífero, destacando o método GOD (*Groundwater occurrence; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table*) desenvolvido por Foster e Hirata (1988) e modificado por Foster et al. (2006), que por sua facilidade na aplicação e disponibilidade de dados tem sido o mais utilizado.

O método GOD avalia basicamente três parâmetros: o índice “G” (*Groundwater hydraulic confinement*) que corresponde o grau de confinamento hidráulico, o índice “O” (*Overla-ying strata*) que representa a litologia das formações superiores a zona de saturação e o índice “D” (*Depth to groundwater table*) que corresponde a profundidade do nível da água subterrânea.

Aliado à técnica de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos, a utilização do Sistema de Informações Geográficas/SIG tem sido de grande relevância, pois possibilita um mapeamento interativo das características hidrogeológicas dos aquíferos, bem como a espacialização dos índices de vulnerabilidade das áreas e perigo à contaminação do aquífero, o que facilita a identificação espacial dos pontos que devem ser tomadas medidas preventivas quanto a sua utilização.

Com o emprego do método GOD e aplicando técnicas de SIG, trabalhos notáveis foram desenvolvidos por Cutrim e Campos (2010) na cidade de Rondonópolis/MT, Barbosa et al. (2011) nas áreas de afloramento do aquífero Guarani no estado de São Paulo, Feron e Reginato (2014) na região central de Canoas/RS, Meira et al. (2014) na zona de recarga do aquífero Guarani e Junior et al. (2015) no aquífero Bauru no estado de Goiás. Todos obtiveram resultados satisfatórios que auxiliaram para um melhor gerenciamento da área e proteção do sistema de aquífero.

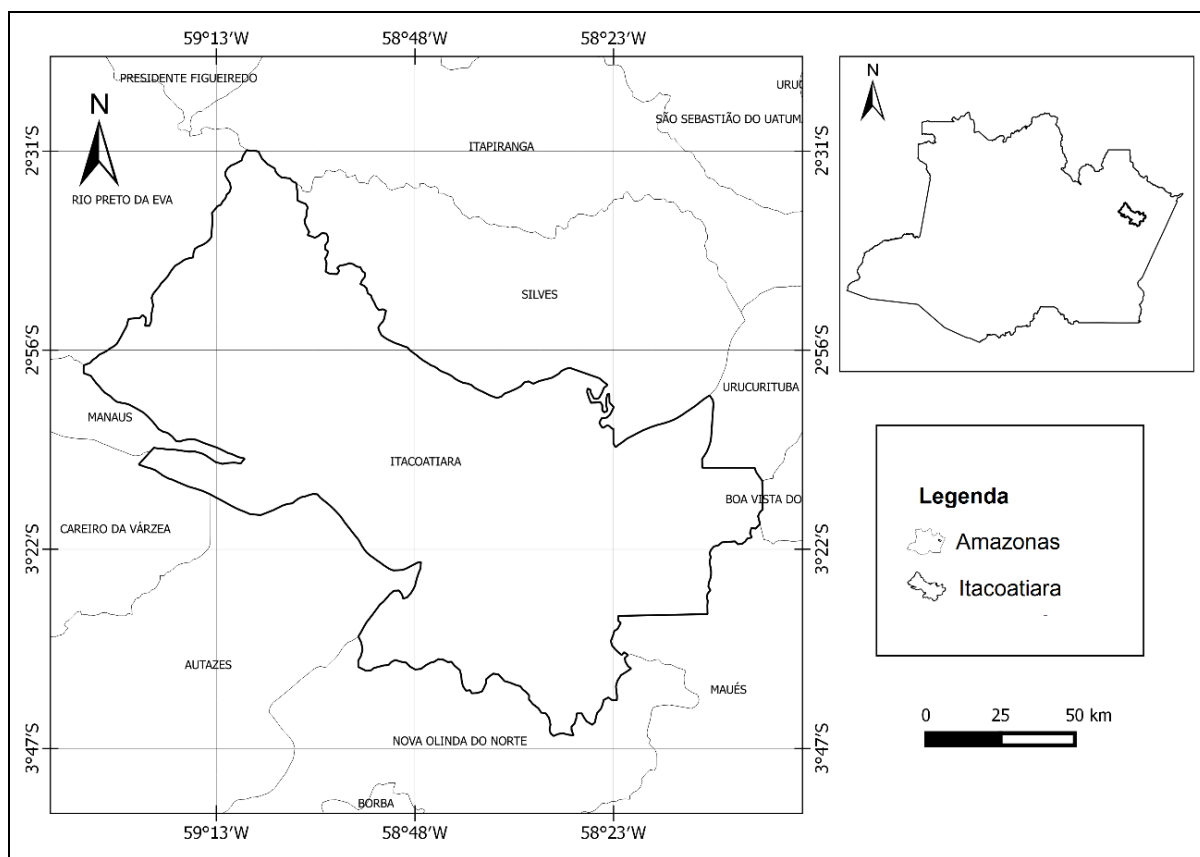
A região norte como um todo, apesar de possuir grande quantidade de corpos hídricos superficiais, abastece grande parte dos núcleos urbanos por fontes de águas subterrâneas. Manaus e Belém, as maiores metrópoles da região, também utilizam esses recursos como complemento no abastecimento de água para a população. Apesar de os recursos hídricos subterrâneos serem muito utilizados, existem poucos trabalhos desenvolvidos na região que visam à caracterização desses sistemas. A exemplo do sistema de aquífero Alter do Chão, que se constitui o sistema de aquífero mais importante da região norte, base para abastecimento público de diversos núcleos urbanos no estado do Amazonas e Pará. No entanto, existe uma insuficiência de

informações referente a esse sistema, sendo raros os trabalhos desenvolvidos na região com intuito de avaliar a fragilidade desse manancial.

Com base no exposto, este trabalho visa à avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na área de afloramento do aquífero Alter do Chão no município de Itacoatiara, estado do Amazonas, com a aplicação do método GOD de avaliação e com auxílio do Sistema Informações Geográficas/SIG para a espacialização dos resultados.

### Área de estudo

O município de Itacoatiara fica localizado na região nordeste do Estado do Amazonas, sob coordenadas geográficas 3°8'12"S e 58°26'3"O, abrangendo uma área de aproximadamente 7.426,88 km<sup>2</sup>. Limita-se ao norte com o município de Silves, ao sul com o município de Manaus, a leste com o município de Rio Preto da Eva e a oeste com o município de Maués (Figura 1). A sede deste município fica localizado à margem esquerda do Rio Amazonas, distante cerca de 285 km da capital do estado, com acesso pela Rodovia AM 010 e por via fluvial pelo Rio Amazonas.



**Figura 1. Localização da área de estudo.**

A população do município de Itacoatiara, segundo o IBGE (2010), é de 86.839 habitantes, a sede municipal consiste na terceira maior cidade do Estado do Amazonas, perdendo somente para Manaus e Parintins. O abastecimento de água no município é proveniente exclusivamente de fontes subterrâneas (aquífero Alter do Chão) capturado por poços rasos ou “tipo amazonas” (ANA, 2010).

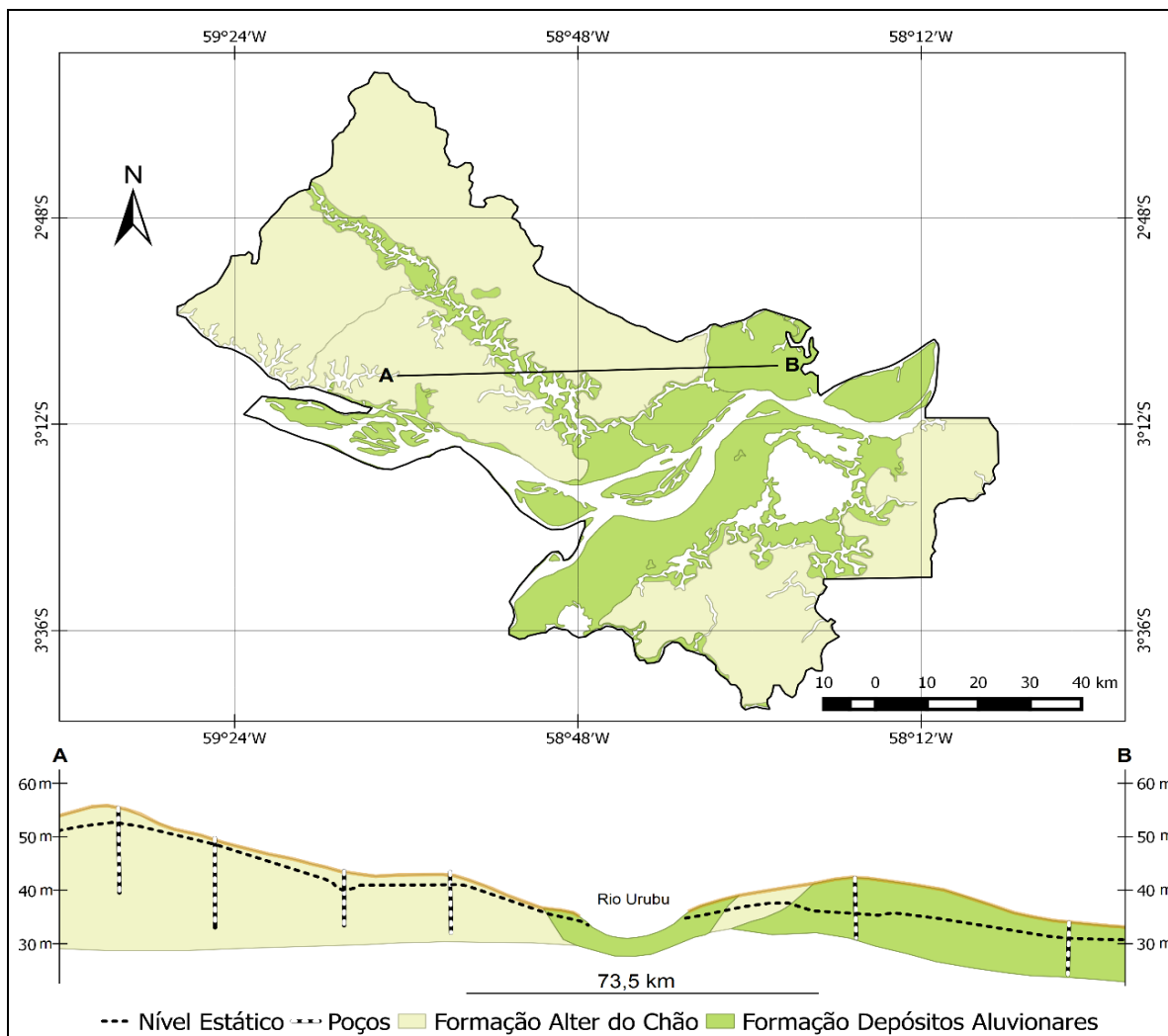
## Geologia

Na área de estudo afloram as Formações Alter do Chão (K2ac) nas áreas mais elevadas e a Formação Depósitos Aluvionares (N4a) no entorno dos grandes rios. Ambas Formações provenientes de depósitos fluviais da sequência Cretácea. Essa sequência é caracterizada por um sistema fluvial de alta energia, sob clima úmido. Com o surgimento da Cadeia Andina, os rios cretáceos transformaram-se em lagos doces e rasos, alimentados por rios de baixa energia (SILVA & BONOTTO, 2000; SOUZA et al., 2013).

A Formação K2ac é composta por arenitos grossos, friáveis e de cores variadas, que recobrem os estratos paleozoicos. No estudo de perfilagem geofísica de poços e sobre informações litológicas de amostragem de calha na Formação K2ac, realizado por Souza (2006), na área urbana de Manaus, ficou demonstrada a ocorrência de fácies sedimentares arenosa, argilosa, arenoargilosa e o ‘Arenito Manaus’ depositados em ambiente fluvial e fluviodeltaico.

Já a Formação N4a é descrita e representada por sedimentos arenosos e argilosos que são classificados como inconsolidados a semiconsolidados, associando-lhes níveis de cascalho e de matéria orgânica (REIS, 2006, p. 86; SOUZA et al., 2013).

A Figura 2 apresenta a geologia da área de estudo e um perfil geológico esquemático elaborado com base em dados do Serviço Geológico do Brasil, a CPRM e sobre os poços instalados na área de estudo obtidos junto ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas/SIAGAS. O perfil geológico dos poços nos locais denominados de Depósitos Aluvionares apresenta camadas sobrepostas de Argilitos/arenitos/siltitos, os poços possuem profundidades maiores e nível estático mais profundo, já os locais de Formação Alter do Chão a litologia predominante é constituída por arenitos médio e grosso, os poços são mais rasos e o nível estático próximo a superfície do terreno.



**Figura 2. Geologia e perfil esquemático da área de estudo. Fonte: Dados de geologia do Estado do Amazonas, CPRM (2005); dados de litologia de poços tubulares disponível no SIAGAS (2017).  
Hidrogeologia**

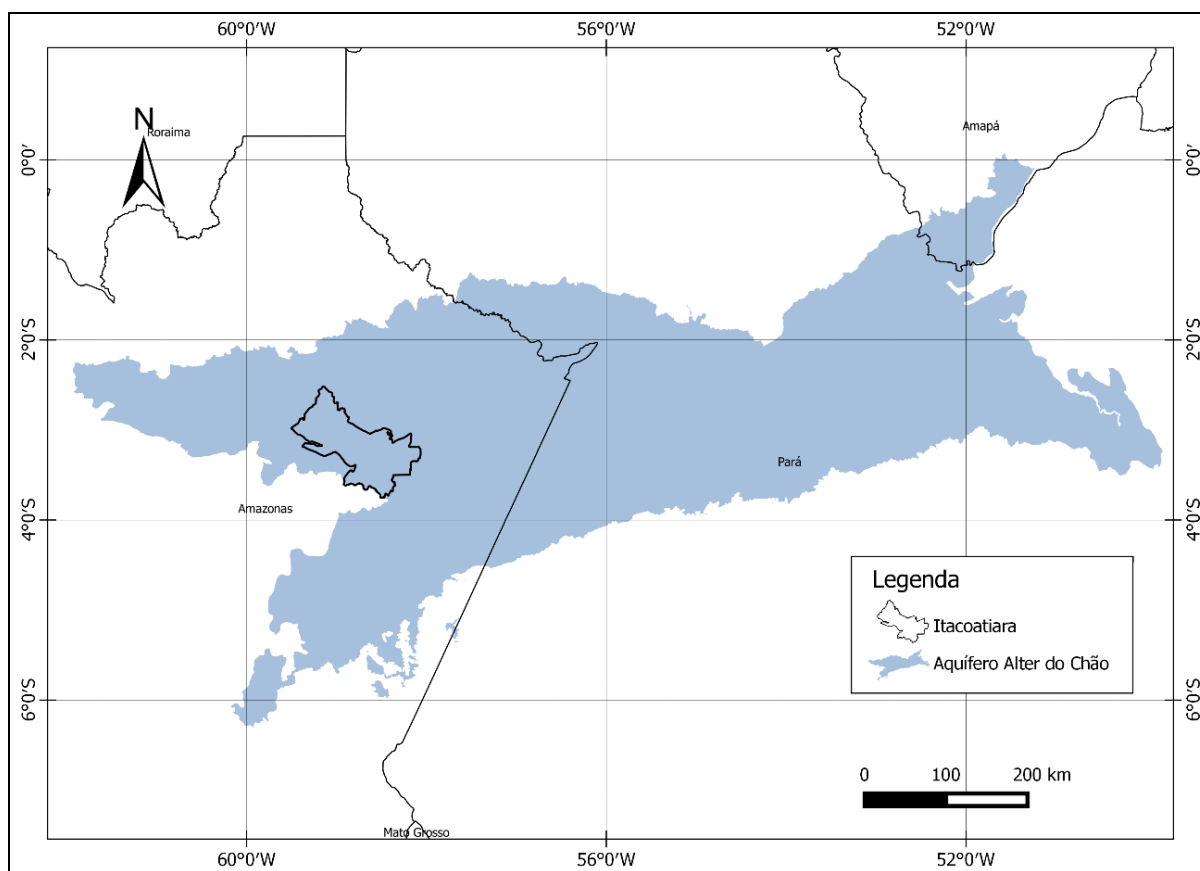
Os aquíferos são constituídos por formações geológicas com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenarem e transmitirem quantidades significativas de água sobre gradientes hidráulicos naturais. O termo “quantidades significativas” é obviamente relativo e depende do uso final de cada poço, e que serve como balizamento para a determinação da viabilidade na instalação de um poço em uma região (CLEARY, 2007, p.36).

O aquífero Alter do Chão compreende um sistema hidrogeológico com propriedades de aquífero livre e confinado e está inserido na Região Hidrográfica Dominante do Amazonas, ocorre na região sul do Amapá, centro-oeste do Pará e leste do Amazonas (Figura 3), ocupa uma área de 312,574 km<sup>2</sup>. É explorado principalmente nas cidades de Manaus, Belém, Santarém e na Ilha de Marajó (ANA, 2010).

Na cidade de Manaus, o sistema de aquífero Alter do Chão apresenta-se com espessura média de aproximadamente 160 m (porção saturada e arenosa da formação). O limite inferior corresponde ao contato com os evaporitos e calcários da Formação Nova Olinda, apresentando nível estático médio de 30 m, vazão média em torno dos 32 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> e vazão específica de 1,45 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>. Já na cidade de Belém, o sistema de aquífero Alter do Chão atinge espessuras totais de 480 m e é constituído por uma sucessão de camadas arenosas, com permeabilidade e espessura variáveis, intercaladas com aquicludes e aquítarde de pequena

espessura, apresentando vazão média de em torno de  $41 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e vazão específica  $1,28 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  (AGUIAR & MOURÃO, 2012).

A existência de níveis de água rasos somados à carência de saneamento básico nas áreas urbanas, onde proliferam habitações com grande quantidade de fossas e poços construídos sem requisitos mínimos de proteção sanitária, favorece a contaminação do aquífero Alter do Chão (ANA, 2010).



**Figura 3. Sistema de aquífero Alter do Chão. Fonte: Mapa do sistema de aquífero elaborado com base em dados da GONETWORK ANA.**

### Material e métodos

#### Base de dados

Para obtenção dos parâmetros do método GOD foram utilizados dados de poços tubulares da área de estudo obtidos diretamente no *website* do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas/SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil/CPRM.

No banco de dados do SIAGAS existem 232 registros de poços tubulares cadastrados no município de Itacoatiara, no entanto, apenas 163 registros de poços foram utilizados para análise, pois estes possuem os registros necessários para análise.

Foram utilizados a base dados do Sistema de Aquífero Aflorante do Brasil da ANA obtido no banco de dados do GEONETWORK para elaboração do mapa de sistema de aquífero (dados vetoriais escala 1:1.000.000), e dados de geologia do estado do Amazonas da CPRM obtido no banco de dados GEOBANK para elaboração do mapa geológico da área de estudo (dados vetoriais, escala de 1:1.000.000).

Para elaboração do mapa hipsométrico, foram utilizados dados do *Shuttle Radar Topography Mission/SRTM* com resolução espacial de 30m disponibilizado pelo United States Geological



Survey/USGS via *web* (folhas: S03W059; S04W059; S03W060; S04W060), para preenchimento das cotas topográficas nulas da base de dados disponível no SIAGAS.

## Método GOD

O método GOD é um método empírico para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquífero. Desenvolvido por Foster e Hirata (1988) e modificado por Foster et al. (2006), esse método avalia três parâmetros: 1) Tipo do aquífero (livre, confinado ou semi-confinado), 2) litologia da camada insaturada e 3) profundidade da água subterrânea. A Figura 4 apresenta em o método GOD conforme apresentado por Foster et al. (2006).

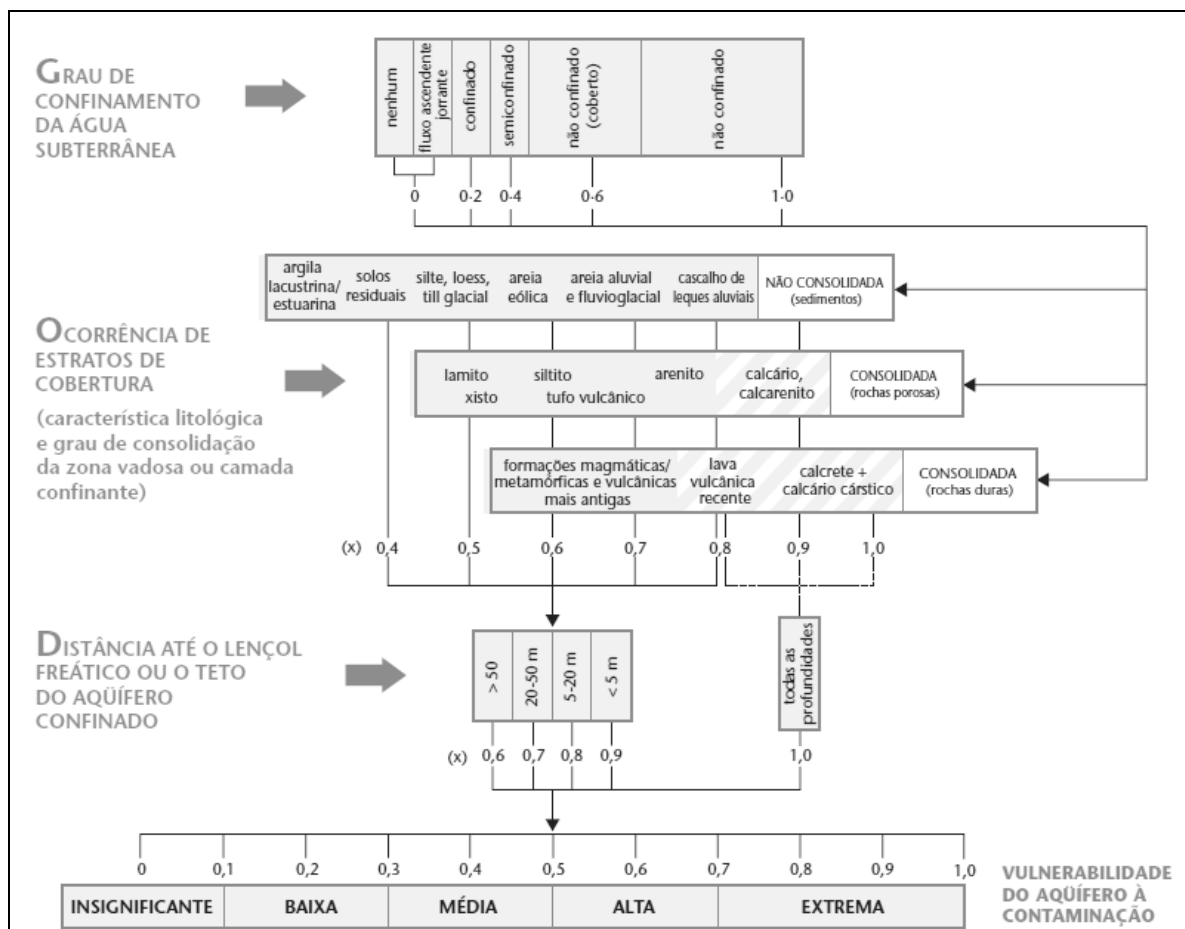


Figura 4. Sistema GOD de avaliação. Fonte: Foster et al. (2006).

Após a atribuição dos índices conforme características da área de estudo, é feito uma multiplicação dos três índices GOD o que determina a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. Segundo Souza (2013), a aplicação desse método possibilita determinar as áreas mais suscetíveis à problemas de contaminação, possibilitando o direcionamento das ações preventivas às regiões prioritárias.

Os dados obtidos junto ao website do SIAGAS e CPRM possibilitaram obter o índice de cada parâmetro do método. As ponderações de cada índice foram obtidas do seguinte modo:

- **Parâmetro G:** O aquífero Alter do Chão é do tipo livre, nesse caso, os índices empregados para esse tipo de aquífero é superior a 0,6 conforme o método GOD. Nesse estudo, o índice 0,6 foi empregado para os locais que possuíam camada vadosa constituída por argilito, que caracteriza

como uma camada protetora ao sistema de aquífero, os demais locais que apresentavam litologia constituída por arenitos, siltitos ou cascalho foram empregados o índice 0,9.

- **Parâmetro O:** Foram empregados índices 0,6 para litologia composta por argilito/arenito e/ou argilito/siltito, já os locais que apresentavam a predominância de arenitos/siltitos o índice empregado foi 0,8.
- **Parâmetro D:** Foram empregados índices 0,8 para os locais com profundidades variando de 5 a 20 m e 0,9 para locais com profundidades inferiores a 5 m.
- 

### **Interpolação e Confecção Cartográfica**

Os dados obtidos com a aplicação do método GOD foram agrupados em planilha Excel e posteriormente, inseridos no software QGIS 2.8 no qual foram realizados procedimentos padrões: adotou-se o sistema de referência de coordenadas Universal Transversal de Mercator/UTM e a base de referência SIRGAS 2000, Zona 21S. Os arquivos no formato CVS foram salvos em formato vetorial *shapefile* para manipulação.

Posteriormente, os dados foram exportados para o software SAGA GIS para a interpolação aplicando o método krigagem. Esse método é aplicado como um método geoestatístico não paramétrico para estimar dados de locais não amostrados baseando em pontos conhecidos (MARCUSO et al., 2011). Os índices G, O e D, índice de vulnerabilidade e potenciometrica foram interpolados para confecção cartográfica. Em seguida, os arquivos gerados no software SAGA foram exportados para o QGIS para confecção dos mapas.

### **Resultados e Discussão**

A maioria dos poços tubulares cadastrados que estão disponíveis no banco de dados do SIAGAS para o município de Itacoatiara apresenta uma insuficiência de informações, tais como as referentes à ausência de descrição do perfil litoestratigráfico, aos dados de nível estático, ao nível dinâmico, à vazão específica dentre outros, fato que impossibilitou a construção de uma malha amostral bem distribuída ao longo de toda área de estudo.

Apesar de existir uma insuficiência de informações sobre o sistema de aquífero Alter do Chão, estimativas apontam que esse sistema é um dos maiores do Brasil em volume e extensão, abrangendo uma área de 312,574 km<sup>2</sup>. No município de Itacoatiara, esse recurso é a fonte de abastecimento exclusiva. Encontram-se instalados no município poços rasos (profundidade média de 45,90 m), e apresentam bons índices de produtividade, com vazão média de 33,26 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, e vazão específica de 2,15 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>. Os bons índices de permeabilidade e porosidade atribuem a esse sistema propriedades adequadas para armazenar e transmitir quantidades significativas de água.

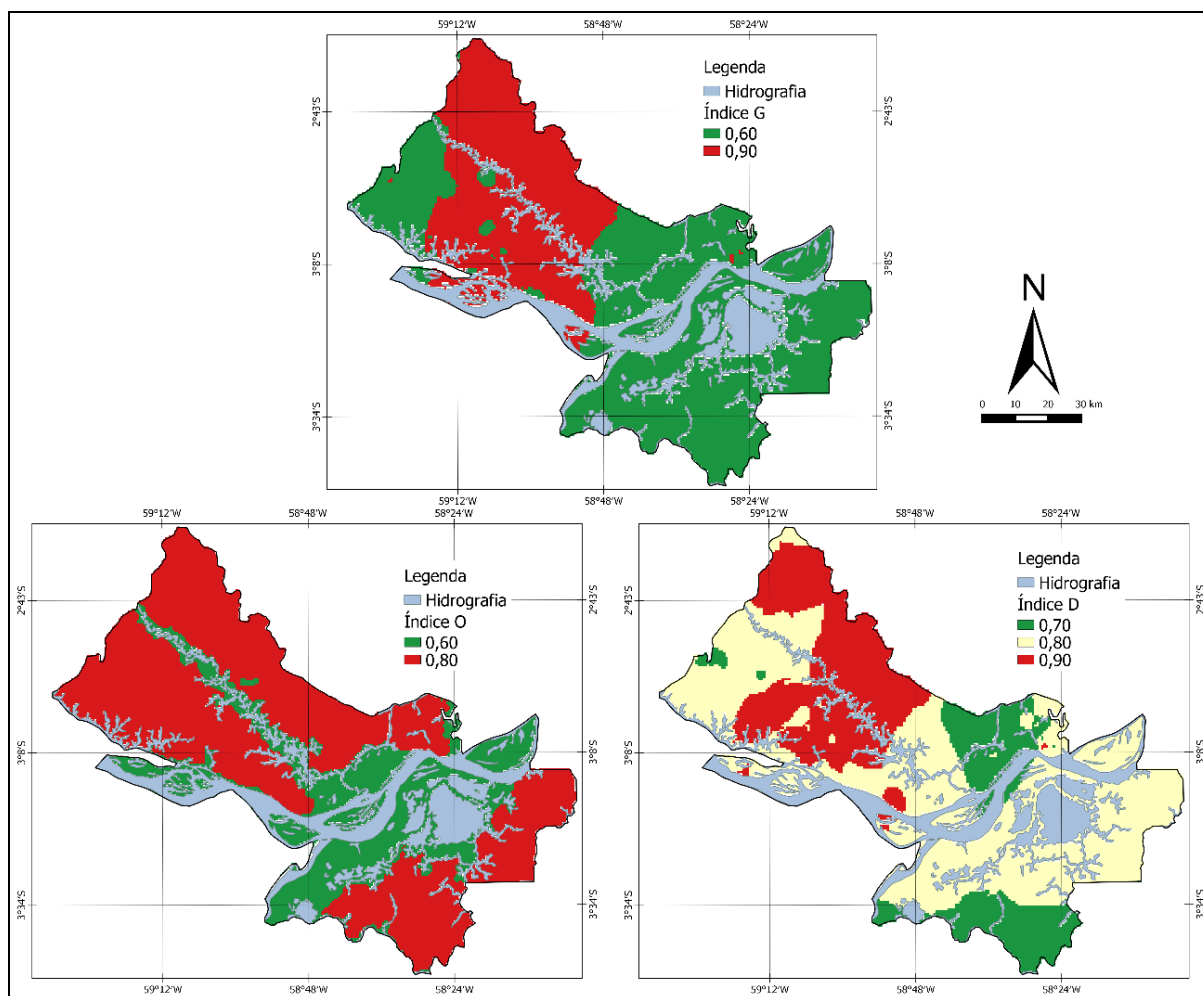
Os dados obtidos junto a CPRM e SIAGAS possibilitaram realizar uma caracterização da área de estudo, bem como a ponderação dos índices do método GOD de avaliação. Por meio da interpolação dos índices pelo método de krigagem foi possível espacializar os parâmetros para uma melhor compreensão, a Figura 5 apresenta a distribuição espacial dos índices do método GOD.

A Tabela 1 apresenta a distribuição das classes em área e porcentagem na área de estudo. Observa-se que 61,2% da área consiste de litologia de predominância arenosa proveniente da Formação Alter do Chão. Com respeito a profundidade da água subterrânea, observa-se que 57,5% da área do aquífero possui profundidades do nível freático entre 5 a 20 m, e demais 25,12% apresenta nível estático inferior a 5 m, ou seja, na área de estudo, o sistema de aquífero é caracterizado como um sistema que apresenta nível estático pouco profundo, e protegidos por uma litologia de predominância arenosa.

A ocorrência desse sistema nas proximidades dos grandes rios da região, bem como a constituição pela Formação Alter do Chão juntamente com a Formação Depósitos Aluvionares são atributos que agregam a esse sistema de aquífero na área de estudo uma susceptibilidade natural à contaminação do aquífero.

**Tabela 1. Distribuição das classes dos parâmetros GOD.**

Índice	Classe	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
<b>G</b>	0,6	57.166,90	64,84
	0,9	31.271,32	35,16
<b>O</b>	0,6	34.132,71	38,8
	0,8	54.305,59	61,2
<b>D</b>	0,7	15.462,08	17,38
	0,8	50.629,81	57,5
	0,9	22.346,41	25,12



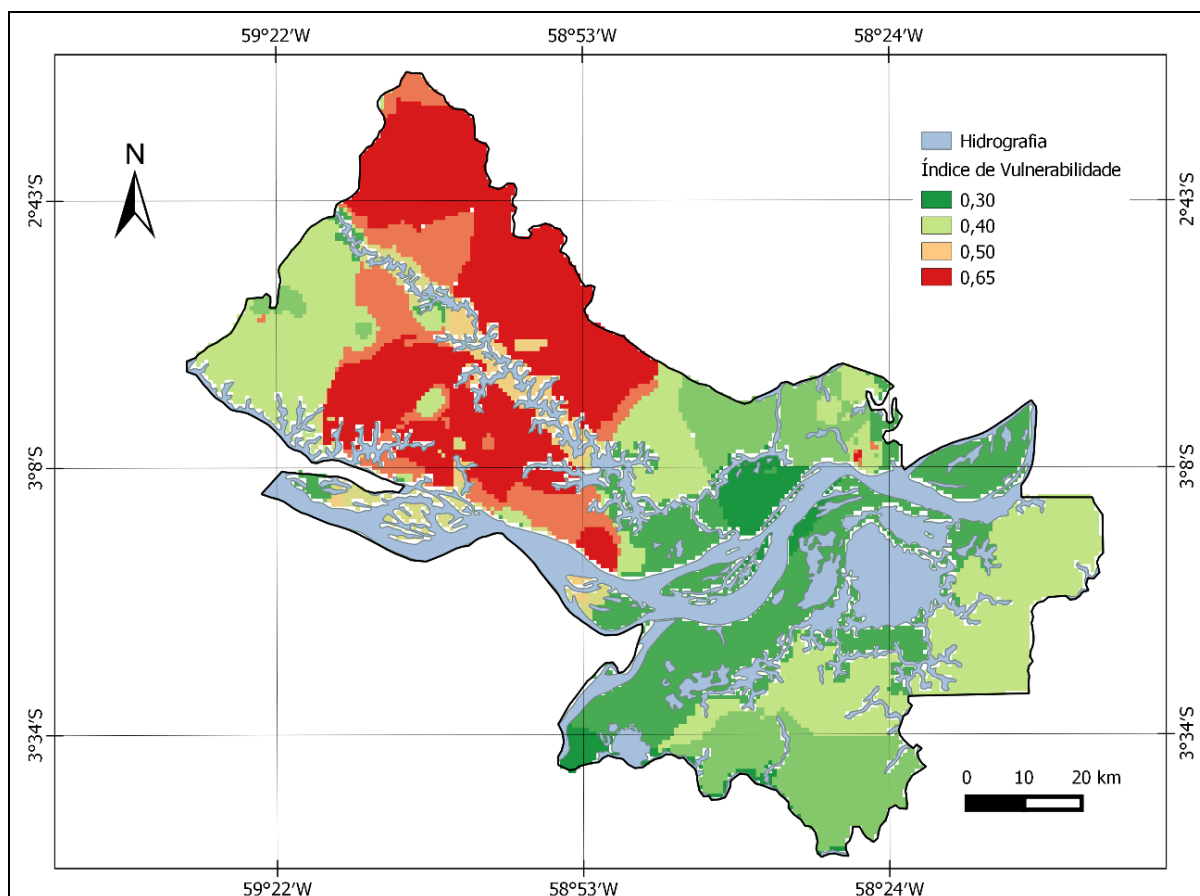
**Figura 5. Distribuição espacial dos índices G, O e D na área de estudo. Elaborado com base em dados de poços tubulares disponível no SIAGAS (2017).**

Conforme mencionado anteriormente, a Formação Alter do Chão apresenta em sua litologia, arenito médio e grosso. Levando em conta que a zona insaturada condiciona o tempo de deslocamento dos contaminantes e os vários processos de sua atenuação, de modo que litologias com maior granulometria possuem maior capacidade de atenuação do que litologias com granulometria mais fina. As áreas com existência de arenitos médio e grosso apresentam porosidade superior a 30%, de acordo a descrição litológica disponível nos dados de Geologia da CPRM, esses percentuais são preocupantes no que diz respeito a percolação de poluentes, uma vez o sistema de aquífero pode ser facilmente atingido por cargas contaminantes nesses locais.

A distribuição do parâmetro D deixa evidente que o sistema de aquífero apresenta um nível estático muito próximo a superfície do terreno, uma vez que apenas 17,38% da área apresenta nível estático superior a 20 metros, nos demais locais, ocorrendo principalmente na região sul da área de estudo.

A distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do aquífero Alter do Chão no município de Itacoatiara é apresentada na Figura 6, este foi espacializada a partir dos dados obtidos com a aplicação do método GOD e interpolados no ambiente SIG. Verificou-se na área de estudo a existência de três classes de vulnerabilidade à contaminação, sendo elas: baixa vulnerabilidade (16,54%), média vulnerabilidade (57,48%) e alta vulnerabilidade (25,98%).

A predominância de média vulnerabilidade seguida de alta vulnerabilidade à contaminação do aquífero no município pode ser explicada, como exposto anteriormente, pela existência em predominância de áreas constituídas por litologia arenosa da Formação Alter do Chão e nível estático pouco profundo, atributos que agregam altos índices de vulnerabilidade nesses locais pelo método empregado.



**Figura 6. Mapa de distribuição espacial do índice de vulnerabilidade à contaminação no município de Itacoatiara. Elaborado com base em dados de poços tubulares disponível no SIAGAS (2017).**

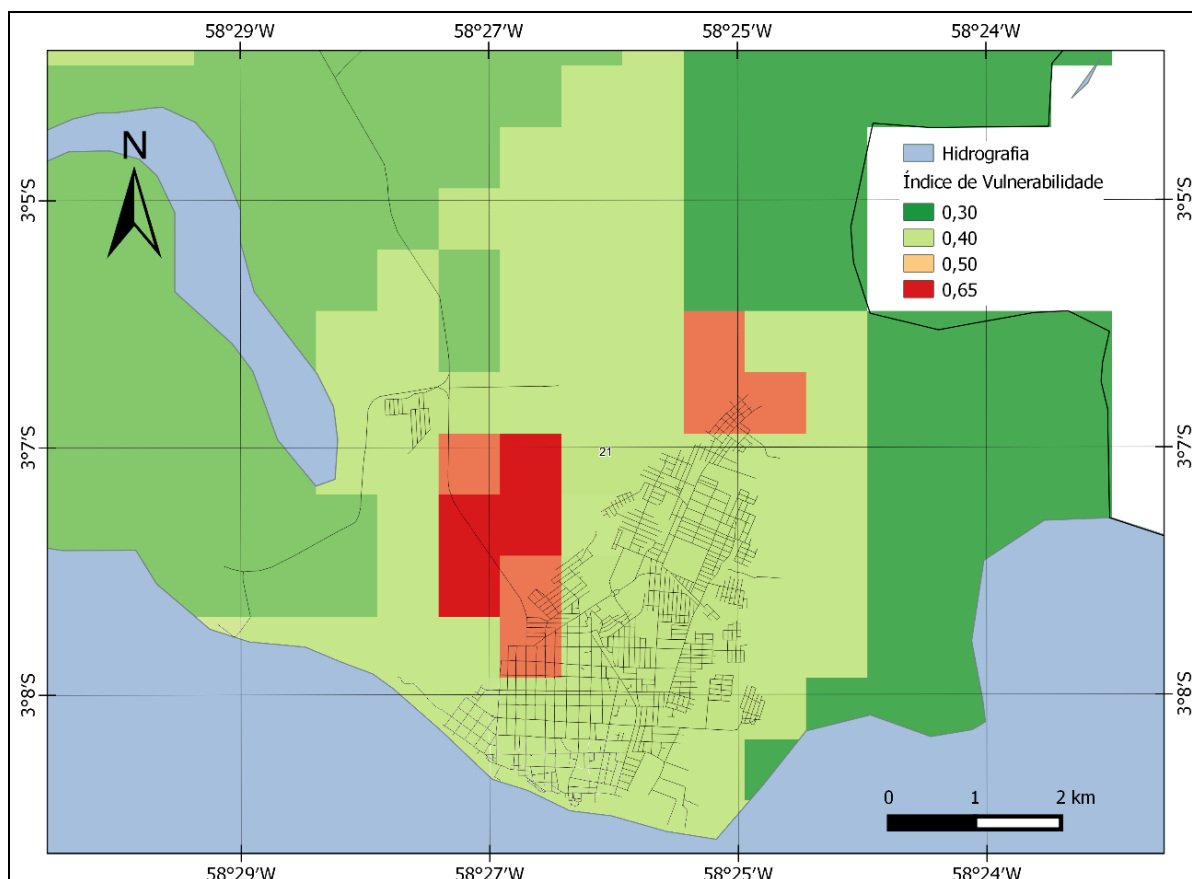
Observa-se na parte central e extremo norte os locais em que existe a maior concentração de alta vulnerabilidade à contaminação do aquífero (zona rural do município). Nesses locais, é de fundamental importância o desenvolvimento de medidas que visem à proteção do manancial, uma vez que caso exista fontes com potencial de geração de carga contaminante, é possível haver o comprometimento da qualidade do manancial subterrâneo.

Os locais caracterizados de alta vulnerabilidade ocorrem em predominância na zona rural do município, esses locais em predominância são ocupados por pecuária extensiva e pelas culturas temporárias de abacaxi e malva (TIAGO, 2015), o que representa um aporte no potencial poluidor nessas áreas.

A Figura 7 apresenta a distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação na área urbana do município, nela é possível identificar que existe alta vulnerabilidade à contaminação localizada na região leste e oeste do meio urbano, além do mais, vale ressaltar que em toda área urbana do município existe a predominância de média vulnerabilidade à contaminação, seguida de alta vulnerabilidade, não existindo a classe de baixa vulnerabilidade.

O meio urbano do município, por ser o local com maior demanda de recurso subterrâneo, merece maior atenção, uma vez que as condições sanitárias do município são precárias, a inexistência de rede de coleta de esgoto doméstico obriga a população utilizar o sistemas de deposição rústicos como fossa negra ou latrinas. Esses sistemas de deposição de efluentes podem comprometer a qualidade do manancial com facilidade, uma vez que o nível estático observado nesse local é próximo a superfície do terreno, nesse caso,

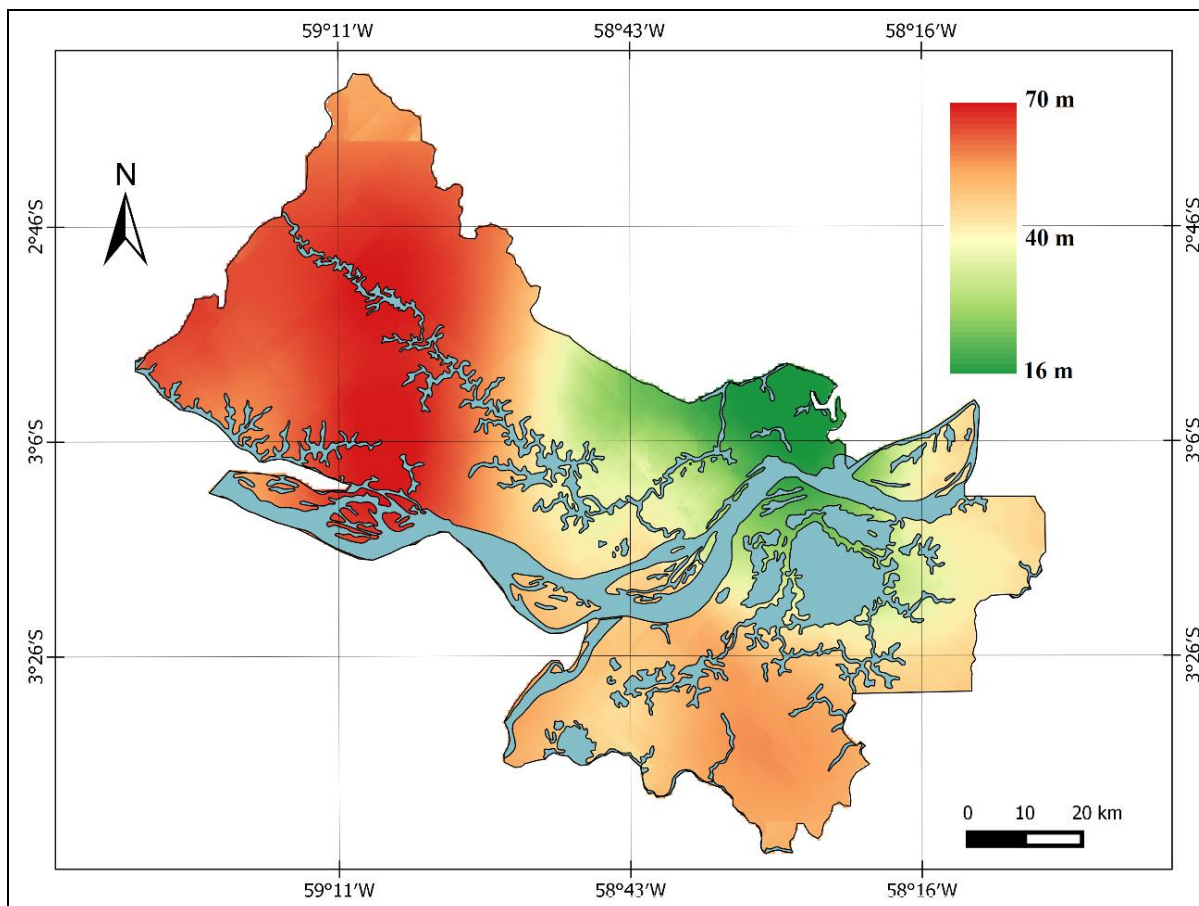
as fossas sépticas podem estar em contato direto com o nível estático do aquífero, como descrito por Duarte et al. (2016).



**Figura 7. Mapa da distribuição do índice de vulnerabilidade à contaminação na área urbana de Itacoatiara. Elaborado com base em dados de poços tubulares disponível no SIAGAS (2017).**

A baixa vulnerabilidade à contaminação observada em 16,54% da área não exclui a possibilidade de ocorrência de contaminação do aquífero, uma vez que o sistema de captação do município ocorre principalmente por meio de poços tipo “amazonas” que não possuem nenhum padrão técnico construtivo que serve como proteção contra a entrada de contaminantes no sistema de aquífero. Esses locais segundo Foster et al. (2006) são caracterizados como principal porta de entrada de contaminantes.

Uma informação complementar a análise da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero consiste na avaliação da predominância de direção de fluxo, essa informação é importante, uma vez que possibilita identificar a possível tendência de fluxo e movimentação de pluma em caso de contaminação do sistema. Nesse sentido, foi confeccionado o mapa de tendência de fluxo (Figura 8) para o município de Itacoatiara com base nos dados de nível estático disponíveis no banco de dados do SIAGAS e dados de elevação do SRTM, conforme metodologia apresentada por Lobler et al. (2014).



**Figura 8. Mapa potenciométrico do município de Itacoatiara. Elaborado com base em dados de poços tubulares disponível no SIAGAS (2017) e dados SRTM.**

A direção de fluxo de um aquífero ocorre da maior para menor carga hidráulica. Observa-se pelo mapa potenciométrico que as maiores cargas hidráulicas (entorno de 70 m) coincidem com os locais que apresentam maior vulnerabilidade à contaminação, o que torna preocupante, uma vez que, caso ocorra uma contaminação nesse local, a provável direção da pluma contaminante irá no sentido ao meio urbano do município, local que apresenta uma menor carga hidráulica na área.

### **Considerações Finais**

A aplicação do método GOD e a espacialização dos dados obtidos no ambiente SIG possibilitou identificar e localizar as classes de vulnerabilidade à contaminação na área de estudo. Esse método corresponde uma maneira eficaz de se proteger a qualidade do manancial, pois por meio deste pode-se subsidiar planos de desenvolvimento e orientar as atividades humanas para minimizar os impactos na qualidade do manancial.

O desenvolvimento do trabalho possibilitou identificar que existe uma predominância de média vulnerabilidade, seguido de alta vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na área de estudo, o que caracteriza o manancial no município como frágil, necessitando de adoção de medidas públicas que visem a sua proteção.

Deve-se evitar a utilização de fossas negras ou latrinas em áreas caracterizadas como de alta vulnerabilidade à contaminação, pois essas práticas colocam em risco a qualidade do manancial. Os poços rasos ou tipo amazonas devem ser fiscalizados e devidamente adequados aos padrões necessários de

funcionamento, conforme as exigências estabelecidas pela legislação pertinente, uma vez que esses locais são pontos potenciais de entrada de contaminante no manancial.

Propõe-se que as áreas caracterizadas como de alta vulnerabilidade à contaminação e devidamente identificadas, sejam contempladas pela legislação de proteção ambiental, bem como de políticas públicas voltadas ao melhor ordenamento do espaço visando à prevenção da contaminação das águas subterrâneas do município. Além do mais, é fundamental o monitoramento da qualidade da água distribuída para abastecimento no município, o que serve como indicador para a observação de anormalidade na qualidade da água.

### **Agradecimentos**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/CNPq pelo apoio financeiro nº 145574/2016-4 concedido no período de 2016/2018 ao autor principal.

### **Referências bibliográficas**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil), Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água: panorama nacional. Brasília: Agência Nacional de Águas; Engecorps/Cobrape. p. 24-26, 2010.

AGUAR, C. J. B.; MOURÃO, M. A. A. Projeto rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão no estado do Amazonas. Belo Horizonte. **CPRM**, 2012. 30p.

AZEVEDO, R. P. Uso de água subterrânea em sistema de abastecimento público de comunidades na várzea da Amazônia central. **Acta Amazônica**. v. 36. n. 3. p. 313-320, 2006.

BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P. FILHO, J. L. A.; CAVANI, A. C. M. Avaliação do Perigo de Contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua Área de Afloramento do Estado de São Paulo Decorrente das Atividades Agrícolas. **Águas Subterrâneas**, v. 25, n.1. p. 1-14, 2011.

CLEARY, R. W. Águas Subterrâneas. **Tampa**, FL, p. 112, 2007.

CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos m todos GOD e POSH. **Revista Geociências**, v.29, n. 3. p. 401-411, 2010.

DUARTE, M. D; ZANCHI, F. B.; NEVEZ, J. R. D.; COSTA, S. C.; JORDÃO, W. H. C. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no município de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Rev. Ambient. Água**. vol. 11 n. 2. p. 402-413, 2016.



- FERON, G. L.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos localizados na região central de Canoas – RS. **Águas Subterrâneas**. v. 28, n. 2. p. 1-13, 2014.
- FILHO, J. L. A.; BARBOSA, S. C.; AZEVEDO, S. G.; CARVALHO, A. M. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, v. 32, n. 2, p. 53-61, 2011.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. Lima: WHO/PAHO/HPECEPIS, p. 81, 1988.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?. *Hydrogeology Journal*. v.21. p. 1389-1392, 2013.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: Servemar, p. 15-29, 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo demográfico 2010. Disponível em:<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 17 mar. 2017.
- JUNIOR, L. C. P.; SOARES, H. L. T.; CASTRO, S. S. Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do aquífero Bauru no município de Rio Verde -GO. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n.2. p. 129-145, 2015.
- LOBLER, C. A.; TERRA, L. G. SILVÉRIO da SILVA, J. L. Dados da CPRM/SIAGAS e imagens SRTM como base cartográfica na elaboração de mapeamento em recursos hídricos subterrâneos em escala municipal: o caso de Nova Palma, RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 7. n.3. p. 513-523, 2014.
- MEIRA, J. C. R.; DE-CAMPOS, A. B.; PEREIRA, L. C. Vulnerabilidade Natural e Perigo à Contaminação de Zona de Recarga do Aquífero Guarani. **Águas Subterrâneas**. v. 28, n. 1. p. 31-46, 2014.
- REIS, N. J. **Geologia e recursos minerais do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, p. 35-96, 2006.
- SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – SIAGAS. Website. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br>. Acesso em: 10 mar. 2017.

SILVA, M. L.; BONOTTO, D. M. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA NA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO, MUNICÍPIO DE MANAUS (AM). **1<sup>st</sup> Joint World Congress on Groundwater**. p. 1-19, 2000.

SOUZA, E. L.; GALVÃO, P. H. F.; PINHEIRO, C. S. S.; BAESSA, M. P. M.; DEMÉTRIO, J. G. A.; BRITO, W. R. R. Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. v. 13, n.1. p. 107-117, 2013.

TAVARES, P. R. L.; DE CASTRO, M. A. H.; DA COSTA, C.T. F.; DA SILVEIRA, J. G. P.; ALMEIDA JÚNIOR, F. J. B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 2, p. 227-236, 2009.

TIAGO, A. Dados estatísticos da produção agropecuária e florestal do Estado do Amazonas: ano 2013 – Brasília, DF: **Embrapa**, p. 105, 2015.