

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO
MUNICÍPIO DE CAETITÉ-BA**

ELDIMAR DA SILVA PAES

CRUZ DAS ALMAS, 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO
MUNICÍPIO DE CAETITÉ-BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia pelo discente Eldimar da Silva Paes como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental, sob a orientação do Prof. **Jorge Luiz Rabelo**.

ELDIMAR DA SILVA PAES

CRUZ DAS ALMAS, 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO
MUNICÍPIO DE CAETITÉ-BA**

Aprovada em: ____/____/____

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Jorge Luiz Rabelo _____

Prof. Dr. Paulo Romero Guimarães Serrano de Andrade _____

Prof. Msc. Vinícius Menezes Borges _____

ELDIMAR DA SILVA PAES

CRUZ DAS ALMAS, 2017

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter proporcionado todas as bênçãos e forças para chegar até aqui, e ter colocado pessoas boas no meu caminho fazendo com que os fardos fossem minimizados (EBENEZER). À minha família que não mediu esforços para que esse grande dia chegue, em especial minha mãe Maria e meu Pai Aurelino, meus irmãos Sergio e Tânia, minhas tias Dinha, tia nega, Tibeu e tia Mera, aos meus primos Joabe, William, Iza, Ró, Carlinha, Gilson, Jailton, Jadir, Sula, Neide, Rosânia, Zete, Gilberto. Não poderia deixar de mencionar meus amigos que por aqui conheci e criei vínculo, sendo que muitos deles participaram das mesmas batalhas que aqui lutei, iniciando pela alcatéia Precioso, Pregas, Pivete, Judas, Danuza, João. Aos meus amigos e colegas Talita, Renata, Hugão do Bcet, Junior sobrinho de Lelego, Anny Bastos, Jadeu, Higor, Vanessa, Bruninho, Igor, a lista é grande rs. Não posso esquecer dos professores que também fizeram parte dessa vitória, Selma Cristina, Paulo Serrano, Alex Santana, Gilberto Pina, Edwin, Abdon, Andrea Fontes, Gabriela Botelho, querido professor Josyclésio, entre outros que fizeram grandes contribuições para minha vida acadêmica.

De forma geral gostaria de agradecer a galera da Propaae, RU, a galera dos babas dos professores e demais babas que disputamos, a galera da IASD e todos que de alguma forma compactuaram para que essa vitória fosse alcançada.

E por fim, gostaria de deixar meu eterno agradecimento por ter acreditado em mim, no meu potencial e na minha proposta de trabalho, ao professor Rabelo que na sua infinita paciência, não mediu esforços para que esse trabalho fosse apresentado. Ao meu amigo Vinícius que durante toda essa trajetória de busca do conhecimento nunca negou auxílio. Gostaria de agradecer aos meus amigos Nenza, Glorinha, Rafael (Barrão), Plínia, Plínio, Maurício, que mesmo longe todo esse tempo nossas amizades permaneceram.

E por fim, fim, fim mesmo, à minha doce namorada, que durante esses dias me suportou e me incentivou para que esse trabalho fosse feito. Bárbara Millene, obrigado meu amor!

Frei sim carregar as cicatrizes que irão provar

Que estive em batalhas

Que ninguém me viu lutar aqui

Thiago Azeite

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE CAETITÉ-BA**

RESUMO

A contaminação das águas subterrâneas está relacionada com a vulnerabilidade intrínseca e a presença dos contaminantes na bacia hidrográfica. Onde a vulnerabilidade significa o quão fácil ou o quão difícil é o contaminante percorrer pelo subsolo até alcançar as águas subterrâneas. O mapeamento da vulnerabilidade é uma importante ferramenta para o auxílio nas tomadas de decisões quanto às estratégias e planejamento de uso do solo. No município de Caetité, no Sudoeste da Bahia, as águas subterrâneas têm uma grande importância no atendimento das demandas hídricas rurais e urbanas. O município se destaca por sua ascensão econômica proveniente de atividades mineradora como a extração de urânio, ferro, ametista e manganês. E neste sentido, torna-se necessário um olhar mais criterioso sob o ponto de vista da contaminação das águas subterrâneas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas no município de Caetité-BA, utilizando o método GOD, onde são considerados três parâmetros: Grau de confinamento, Ocorrência dos estratos de cobertura e Distância até o lençol freático ou teto do aquífero confinado. Os resultados mostraram que 66% das áreas do município estão classificadas em classe de vulnerabilidade média, 28% em classe baixa, 4% alta e 2% insignificante. Tais resultados mostram a necessidade do monitoramento periódico da qualidade das águas e da sua proteção em regiões de classe de vulnerabilidade média e alta, que ocorre principalmente na região sul do município, onde se localiza atividades mineradoras.

Palavras-chave: Aquíferos; GOD; Vulnerabilidade natural.

**EVALUATION OF NATURAL VULNERABILITY TO CONTAMINATION OF
UNDERGROUND WATERS IN THE CAETITÉ-BA MUNICIPAL**

ABSTRACT

Groundwater contamination is related to the intrinsic vulnerability and presence of contaminants in the river basin. Where vulnerability means how easy or how difficult it is for the contaminant to travel underground to reach groundwater. Vulnerability mapping is an important tool for aiding decision making in land use planning. In the municipality of Caetité, in the Southwest of Bahia, groundwater has a great importance in meeting rural and urban water demands. The municipality stands out for its economic rise from mining activities such as the extraction of uranium, iron, amethyst and manganese. And in this sense, the most critical view is needed from the point of view of contamination of groundwater. The objective of this work was to evaluate the natural vulnerability to groundwater contamination in the municipality of Caetité-BA, using the GOD method, where three parameters are considered: Groundwater occurrence (G), Overall lithology of aquifer or aquitard (O) and Depth to groundwater table (D). The results showed that 66% of the areas of the municipality are classified as medium vulnerability class, 28% in low class, 4% high and 2% insignificant. These results show the need for periodic monitoring of water quality and its protection in regions of medium and high vulnerability, which occurs mainly in the southern region of the municipality, where mining activities are located.

Keywords: Aquifers; GOD; Natural Vulnerability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1: Seção transversal do Sistema Aquífero Guarani.....	9
Figura 3. 2: Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade	11
Figura 3. 3: Aquíferos confinados e não confinados	13
Figura 3. 4: Tipos de aquíferos quanto à porosidade	14
Figura 3. 5: Processos comuns de poluição das águas subterrâneas.....	16
Figura 3. 6: Esquema do método GOD.....	20
Figura 3. 7: Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade	21
Figura 3. 8: Mapa de Vulnerabilidade GOD	23
Figura 3. 9: Mapa de Vulnerabilidade de Caldas da Cavaca.....	24
Figura 4. 1: Localização do município de Caetité em relação ao país, estado e a microrregião da Serra Geral	27
Figura 4. 2: Mapa hidrográfico do Município de Caetité-BA	30
Figura 4. 3: Mapa Geológico de Caetité.....	32
Figura 4. 4: Mapa de Solos do município	33
Figura 4. 5: Distribuição espacial dos poços estudados no município de Caetité.....	37
Figura 4. 6: Perfil de poço tubular localizado no município de Caetité, com registro nº 2900004463, apresentando condições de confinamento e índice de vulnerabilidade insignificante	40
Figura 4. 7: Perfil de poço tubular localizado no município de Caetité, com registro nº 2900004426 no SIAGAS, na condição de livre e com índice de vulnerabilidade alta ...	41
Figura 5. 1: Mapa referente ao grau de confinamento dos aquíferos do município de Caetité	44
Figura 5. 2: Mapa referente estratos de cobertura dos aquíferos do município de Caetité ...	47
Figura 5. 3: Mapa referente à profundidade do nível estático dos aquíferos do município de Caetité	49
Figura 5. 4: Mapa de índice de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Caetité	52
Figura 5. 5: Mapa referente ao índice de vulnerabilidade e os conflitos e usos da água e solo	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1: Fontes de contaminação e tipos de contaminantes mais comuns	16
Tabela 3. 2: Principais métodos de avaliação da vulnerabilidade	19
Tabela 5. 1: Classificação das litologias encontradas conforme método GOD de vulnerabilidade	45
Tabela 8. 1: Informações dos poços cadastrados.....	68
Tabela 8. 2: informações dos poços cadastrados	69
Tabela 8. 3: Informações dos poços cadastrados	70
Tabela 8. 4: Informações dos poços cadastrados	71
Tabela 8. 5: Informações dos poços cadastrados	72
Tabela 8. 6: Resultados dos parâmetros e índices de vulnerabilidade (iv)	73
Tabela 8. 7: Resultados dos parâmetros e índices de vulnerabilidade (iv)	74
Tabela 8. 8: Resultados dos parâmetros e índices de vulnerabilidade (iv)	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4. 1: Gráfico com temperaturas máximas, médias e mínimas relacionadas com a precipitação acumulada mensal da cidade de Caetité-BA.....	28
Gráfico 5. 1: Quantidade de poços com informações quanto ao grau de confinamento	42
Gráfico 5. 2: Quantidade de poços com informações de índices do parâmetro O	46
Gráfico 5. 3: Quantidade de poços com informações de índices do parâmetro D	48
Gráfico 5. 4: Percentual de áreas com índices de vulnerabilidade	50

LISTA DE ABREVIATURA/SIGLA/SÍMBOLOS

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INB – Indústria Nuclear do Brasil

SAG – Sistema Aquífero Guarani

SIAGAS - Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo Geral.....	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. Revisão de Literatura.....	4
3.1. Principais aspectos das águas subterrâneas.....	4
3.1.1. Evolução do conhecimento das águas subterrâneas.....	4
3.1.2. Evolução do uso das águas subterrâneas no Brasil	6
3.1.2. Ocorrências das águas subterrâneas no subsolo	9
3.2. Principais fontes de contaminação das águas subterrâneas.....	14
3.3. Vulnerabilidade de aquíferos à contaminação	17
3.3.1 Metodologias para determinação da vulnerabilidade	19
3.3.2 Conceitos do método GOD.....	20
3.3.3 Estudos de vulnerabilidade utilizando o método GOD	22
4. Materiais e Métodos	26
4.1 Descrição da área de estudo	26
4.1.1 Características gerais e localização do município.....	26
4.1.2 Aspectos hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, climatológicos e hidrográficos.....	27
4.2 Procedimento para avaliação da vulnerabilidade.....	35
4.2.1 Obtenção dos dados para aplicação do método.....	36
4.2.2 Procedimento para obtenção do mapa do parâmetro G (grau de confinamento) 38	
4.2.3 Procedimento para obtenção do mapa do parâmetro O (Ocorrência de estratos de cobertura)	38
4.2.4 Procedimento para obtenção do mapa do parâmetro D (Distância do nível estático) 39	

4.2.5	Procedimento para obtenção do mapa de vulnerabilidade.....	39
4.2.6	Considerações do método GOD.....	39
5.	Resultados e Discussões.....	42
5.1	Mapeamento do parâmetro G.....	42
5.2	Mapeamento do parâmetro O.....	45
5.3	Mapeamento do parâmetro D.....	48
5.3	Mapeamento da Vulnerabilidade pelo método GOD.....	50
5.4	Análise geral das atividades geradoras de poluição.....	53
5.4.1	Extração de Urânio.....	53
5.4.2	Extração de outros minérios.....	54
5.4.3.	Outros tipos de poluições.....	54
6.	Conclusões.....	56
7.	Referências bibliográficas.....	58
8.	Anexos.....	68
8.1	Dados dos poços obtidos no SIAGAS.....	68
8.2	Resultados do método GOD para os poços estudados.....	73

1. Introdução

As águas subterrâneas têm um papel importante para o abastecimento da população mundial e para a redução dos déficits hídricos existentes em regiões semiáridas. Elas representam cerca de 60% no continente europeu e, em determinadas regiões do planeta, elas são as únicas fontes possíveis para o atendimento das demandas (SILVA, 2008).

No Brasil as reservas de águas subterrâneas compreendem aproximadamente 42,3 mil m³/s, que equivale 24% do escoamento dos rios do país em média, ou 46% das águas superficiais disponíveis (ANA, 2010).

Vários fatores influenciam o uso das águas subterrâneas, além dos fenômenos hidrológicos que propiciam a escassez hídrica. O crescimento populacional também desencadeia uma série de atividades que interferem na qualidade e na quantidade das águas superficiais (tais como agricultura irrigada, pecuária, indústria, abastecimento público, etc.), sendo necessário a utilização das águas subterrâneas como alternativa para atendimento das demandas hídricas. Embora seja necessário que essas águas estejam em quantidades e qualidades suficientemente boas para sua utilização, para não causar riscos à saúde dos usuários. Boa parte dos problemas relacionados às águas subterrâneas estão diretamente relacionados às atividades antrópicas, tais como: a compactação do solo, tornando-o impermeável de forma a dificultar a infiltração das águas; poluição e contaminação por contaminantes oriundos de atividades humanas; e a superexploração, isto é, extração de um volume superior à quantidade que se infiltra (BRASIL, 2007).

A vulnerabilidade é tida como uma ferramenta de auxílio na gestão territorial, parcelamento e uso do solo, pois o seu mapeamento vem sendo uma importante estratégia para tomadas de decisões quanto às medidas de proteção das águas subterrâneas.

No município de Caetité-BA, as águas subterrâneas têm uma grande importância no atendimento das demandas de abastecimento, principalmente na zona rural do município, onde o serviço público de abastecimento de água potável é inexistente. O município passa, atualmente, por um crescimento econômico favorável, destacando-se atividades como: agricultura, pecuária, implantação de parques eólicos e geração de energia limpa, construção de trecho da ferrovia Leste-Oeste, obra do

governo federal, atividades de mineração, tais como extração de urânio, pedras semipreciosas e minério de ferro, influenciando de forma significativa a expansão urbana. Nesse panorama, torna-se necessário um olhar mais criterioso sob o risco de contaminação das águas subterrâneas por essas atividades, já que o uso e ocupação do solo não é considerado quanto a sua vulnerabilidade. Este trabalho propõe uma investigação da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas no município de Caetité-BA, utilizando o método GOD desenvolvido por Foster e Hirata (1988).

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas na área de estudo, delimitada pelo município de Caetité-BA.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar levantamento hidrogeológico por dados secundários dos parâmetros referentes ao seu grau de confinamento, estratos de cobertura dos aquíferos e profundidade do nível estático;
- Elaboração de mapas temáticos referentes aos parâmetros do método GOD
- Análise geral das atividades geradoras de poluição;

3. Revisão de Literatura

3.1. Principais aspectos das águas subterrâneas

3.1.1. Evolução do conhecimento das águas subterrâneas

O uso de águas subterrâneas ocorre desde os primórdios da humanidade, basicamente cerca de 4.000 anos a.C., os chineses já perfuravam poços com profundidades na ordem de centenas de metros. A captação da água subterrânea era conhecida também, dos antigos persas e no Egito, que em torno do ano 2100 a.C. utilizavam de águas de poços para abastecimento. Na formação da terra, pela concepção da religião, verifica-se a presença de águas subterrâneas em diversas partes das escrituras sagradas. Isaac, Jacó, Abraão e outros personagens utilizavam águas de poços para abastecimento e dessedentação de animais (FUNASA, 2014).

Ainda na concepção religiosa, o livro de Gênesis escrito por Moisés descreve: “No dia em que Noé completou seiscentos anos um mês e dezessete dias, precisamente nesse mesmo dia, todas as fontes das grandes profundezas jorraram, e as comportas do céu se romperam” (BÍBLIA, Gn. 7:11, sd).

Muitos filósofos gregos, dentre eles Platão, questionavam a origem das águas subterrâneas. Para eles a hipótese mais conclusiva para essa questão, era que as águas do mar formavam as nascentes através de canais subterrâneos, e interligavam até as montanhas e chegava até as superfícies. Tinham a ideia de que essas águas eram purificadas devido à sua passagem pelo solo, afirma Walton (1970) citado por Manoel Filho (2000).

Segundo o mesmo autor, por volta de 500 a 428 a.C. Anaxágoras, outro filósofo grego, entendia que, as águas das chuvas abasteciam os rios e as águas abaixo da superfície da terra. Já nos anos compreendidos entre 384 a 322 a.C., outro filósofo bastante conhecido atualmente, Aristóteles, consegue distinguir o fato de que existe um ciclo para esse fenômeno, conhecido hoje como o ciclo da água, ao qual, as águas de superfície evaporam, condensam no ar e precipitam na terra, sendo arrastadas para os rios e mananciais. Já o entendimento de que parte das águas de precipitação percola no solo por meio da infiltração, acumulando-se no subsolo, passou a ser conhecida nos primórdios da era cristã, por um arquiteto romano chamado Vitruvius. Até o fim do século XVII tinha-se a ideia de que as chuvas não eram suficientes para manter os fluxos permanentes dos rios, mas a partir de estudos feitos pelo advogado

francês Pierre Perrault, ao qual conseguiu demonstrar que as chuvas eram suficientes para garantir o fluxo dos rios. Perrault conduziu um experimento numa bacia localizada no rio Sena, com uma área de drenagem de 122 km². Durante três anos consecutivos, compreendidos entre 1668 a 1670 d.C. ele estimou uma precipitação média anual de 520 mm, correspondente a 16% dos fluxos dos rios. O volume de chuva era da ordem de 63 milhões de m³/ano, enquanto a do rio era de 10 milhões de m³/ano. Nessa mesma época, o físico francês Edmé Mariotté, mediu as vazões do rio Sena, e com os resultados obtidos publicou trabalhos comprovando que parte dessa água que precipita infiltrava no solo, confirmando-se então o trabalho de Perrault. E, por conseguinte, o astrônomo inglês Edmond Halley, que no ano de 1693 conseguiu comprovar através de observações contínuas que as águas que evapora do mar tinham quantidades suficientes para manter os fluxos de rios e nascentes.

Conforme Otálvaro (1999), no período da Idade Média e do Renascimento, os estudos hidrogeológicos era insignificantes, embora Leonardo da Vinci conduzia trabalhos relacionados ao ciclo hidrológico e a circulação da água entre as rochas, em constante retorno com rios e mares, que somente um século e meio após passou a ter notoriedade. As técnicas de perfuração de poços pelo método percussivo passou então a ser desenvolvido no Ocidente, embora tal método era bastante utilizado pelos chineses há cerca de 1500 anos a.C..

Ainda segundo Manoel Filho (2000), no século XVIII, iniciou-se o conhecimento do movimento das águas subterrâneas, assim como a melhor concepção de sua existência através dos fundamentos geológicos. No ano de 1915, compreende-se por meio do francês Vallesièrre, a existência da camada de confinamento das águas subterrâneas, mantendo-as sob pressão. Tais estudos ganharam grande importância na França até meados do século XIX, devido à necessidade de perfuração de poços para abastecimento de comunidades. Foi através de estudos do engenheiro Henry Darcy, que se conseguiu entender a dinâmica de percolação dos fluxos de água no solo. Em seus experimentos, Darcy observou a passagem de água em colunas de areia, e assim, conseguiu formular uma expressão que relaciona a descarga de água à condutividade hidráulica do meio poroso ao qual a água percola, e do gradiente hidráulico, numa determinada superfície, conhecida como Lei de Darcy.

No século XX, cresceu-se o campo de estudo no que diz respeito às águas subterrâneas dentro da geologia, principalmente nos países europeus, onde

passaram-se então a entender os aquíferos e suas estimativas em volumes armazenados, dando então grande importância para os trabalhos desenvolvidos por hidrogeólogos, conforme Souza (2010).

Com o evidente crescimento das pesquisas quantitativas voltadas para as águas subterrâneas, passa-se então, a partir dos anos 80, a ter-se uma preocupação quanto a qualidade das águas subterrâneas, pois seu uso de maneira inadequada para abastecimento público influencia diretamente na saúde pública, acarretando prejuízos econômicos e sociais. A proteção das águas ganha espaço na “Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento”- Rio 92, que foi definida como um instrumento de planejamento visando o desenvolvimento sustentável, onde foi assinado em 14 de junho de 1992 o documento denominado AGENDA 21, que aborda em um dos itens do capítulo 18 medidas de proteção às águas subterrâneas, tais como: boas práticas agrícolas, medidas para mitigar a intrusão salina em aquíferos litorâneos, proteção a áreas de recarga, proteção e manejo de aterros sanitários, proteção e monitoramento de poços (BRASIL, 1994).

3.1.2. Evolução do uso das águas subterrâneas no Brasil

Conforme Rebouças (1998), o desenvolvimento da ciência e tecnologias aplicadas para as águas subterrâneas no Brasil teve início devido às crises hídricas, principalmente no Nordeste, onde a variabilidade na distribuição das chuvas no espaço e no tempo são fatores que influenciam diretamente na disponibilidade de água. Basicamente a perfuração de poços era uma das técnicas mais utilizada para suprir as demandas de abastecimentos e combate à seca da região. Os primeiros relatos de usos, no período colonial (1500-1822), dão conta que as águas subterrâneas eram captadas por poços feitos por escavações manuais, revestidos de alvenaria, com diâmetro de até 3 metros, denominados de cacimbões, porém em períodos de grandes estiagens os poços cacimbões não eram suficientes para atendimento da demanda hídrica. Após a Corte Portuguesa se instalar no Brasil, uma empresa norte americana foi contratada para perfuração de poços no Ceará. A empresa contratada trouxe três máquinas percussoras a vapor e equipe técnica especializada para desenvolver suas atividades, perfurando poços de até 150 metros de profundidade na região de Fortaleza, mas para isso era necessária uma licença para captação de água, ao qual, era elaborado um relatório e encaminhado para o Museu Imperial. Porém a empresa não teve sucesso pois os poços perfurados não

atendiam a cláusula de contrato, onde os poços perfurados não eram jorrantes, conforme ocorria no Texas, EUA.

Ainda conforme o mesmo autor, além do Ceará, em outras regiões do Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil passaram-se a exigir a perfuração de poços para o desenvolvimento de suas atividades, tais como abastecimento das indústrias e da população. Nesse período era exigido pela Corte Portuguesa no Brasil (1808-1822) licença para captação de águas subterrâneas, sendo que as amostras das formações, juntamente com o relatório de perfuração eram entregues ao Museu Imperial.

Hager e D'almeida (2008), afirma que, a partir de 1934 foi estabelecido no Brasil o Código das Águas, apresentado no Congresso Nacional em 1907 através do Decreto Federal N° 24.643/1934. E no que diz respeito às águas subterrâneas, o Código das Águas dispõe –se algumas determinações, como:

Art. 96. O dono de qualquer terreno poderá apropriar-se por meio de poços, galerias, etc., das águas que existam debaixo da superfície de seu prédio contanto que não prejudique aproveitamentos existentes nem derive ou desvie de seu curso natural águas públicas dominicais, públicas de uso comum ou particulares.

Parágrafo único. Se o aproveitamento das águas subterrâneas de que trata este artigo prejudicar ou diminuir as águas públicas dominicais ou públicas de uso comum ou particulares, a administração competente poderá suspender as ditas obras e aproveitamentos.

Art. 97. Não poderá o dono do prédio abrir poço junto ao prédio do vizinho, sem guardar as distâncias necessárias ou tomar as precisas precauções para que ele não sofra prejuízo.

Art. 98. São expressamente proibidas construções capazes de poluir ou inutilizar para o uso ordinário a água do poço ou nascente alheia, a elas preexistentes.

Art. 99. Todo aquele que violar as disposições dos artigos antecedentes, é obrigado a demolir as construções feitas, respondendo por perdas e danos.

Art. 100. As correntes que desaparecerem momentaneamente do solo, formando um curso subterrâneo, para reaparecer mais longe, não perdem o caráter de coisa pública de uso comum, quando já o eram na sua origem.

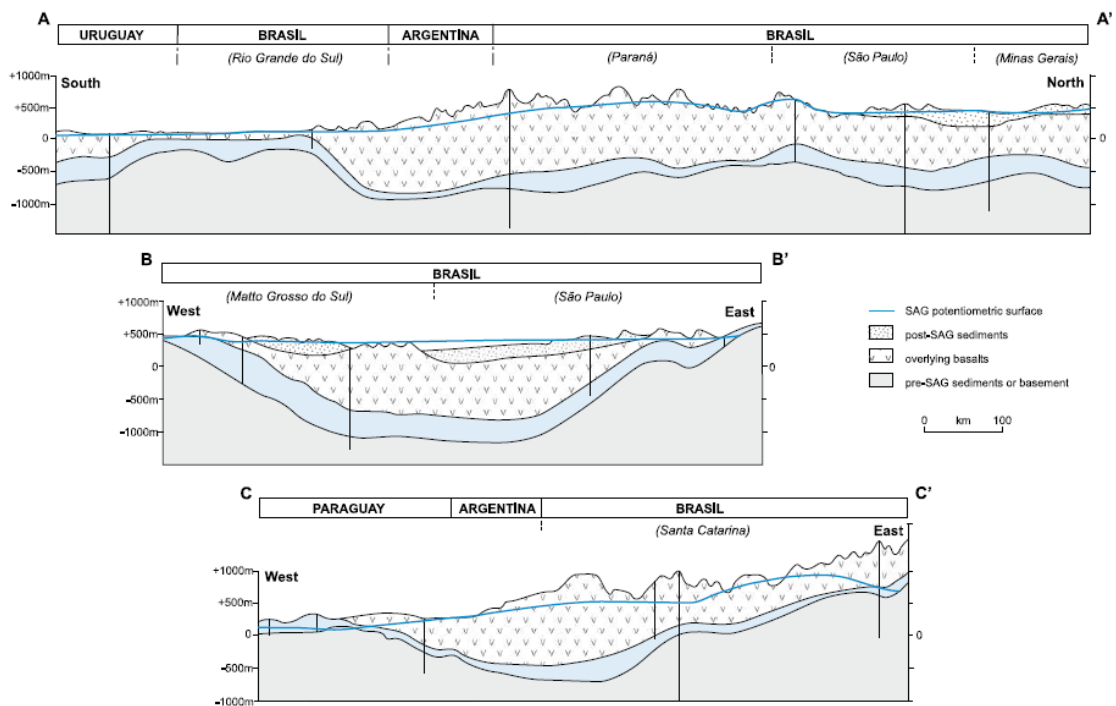
Art. 101. Depende de concessão administrativa a abertura de poços em terrenos do domínio público.

Conforme os mesmos autores, a evolução das políticas públicas voltadas às águas subterrâneas ocorreu atrelado à gestão dos recursos hídricos de forma geral, dando uma ênfase maior às águas superficiais. A Constituição Federal de 1988 acaba com a privatização da água e institui o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, ao qual estabelece de domínio dos Estados os recursos hídricos subterrâneos. Já em 1997, o governo federal sanciona a lei 9.433, que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), além da criação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos- SINGREH, onde destaca que as águas subterrâneas estão sujeitas a outorga, que é um instrumento da PNRH.

Villar (2010), menciona que um dos marcos que alavancaram na atualidade estudos e avanços técnicos relacionados às águas subterrâneas no Brasil ocorreu com a descoberta do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Após sua descoberta, muitos projetos a nível internacional sucederam buscando entender sua dinâmica e suas características geológicas, pois o SAG se estende além do Brasil, por países como Argentina, Uruguai e Paraguai.

Conforme Foster *et al* (2009), o Aquífero Guarani compreende 62% do seu potencial no território Brasileiro, atinge profundidades de até 1000 metros conforme mostra a Figura 3.1, e estima-se que seu volume é de cerca de 30.000 km³, o que equivale a 100 anos de fluxo acumulados no rio Paraná.

Figura 3. 1: Seção transversal do Sistema Aquífero Guarani



Fonte: Foster et al (2009).

De acordo Ribeiro *et al* (2007), no Brasil, as investigações voltadas à qualidade da água subterrânea vêm ganhando espaço gradativamente, embora se compararmos a países como Estados Unidos, Canadá ou Alemanha, ainda representa um estágio inicial. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) monitora os principais aquíferos do estado desde a década de 90. Além de monitoramento, muitos estudos têm sido feitos com relação a presença de contaminantes em aquíferos, modelos matemáticos hidrodinâmicos e conceituais, para entender o comportamento dos fluxos de água e atrelados, os contaminantes.

3.1.2. Ocorrências das águas subterrâneas no subsolo

De acordo com Manoel Filho (2000), a distribuição vertical de água no subsolo é dividida em duas zonas horizontais, conhecidas como zonas saturadas e zonas não saturadas, sendo elas:

Zonas saturadas ou zonas de saturação: são localizadas abaixo do lençol freático, e como o próprio nome diz, seus espaços vazios são completamente saturados e suas águas encontram-se em pressões diferentes da atmosféricas, diferentemente da superfície freática, ao qual se encontra submetida à essa pressão.

Zona não saturada: também conhecida como zona de aeração ou ainda zona vadosa é a parte do solo situada na superfície freática, ao qual a pressão atmosférica prevalece e seus poros são preenchidos por água e ar, principalmente. Ela é composta por:

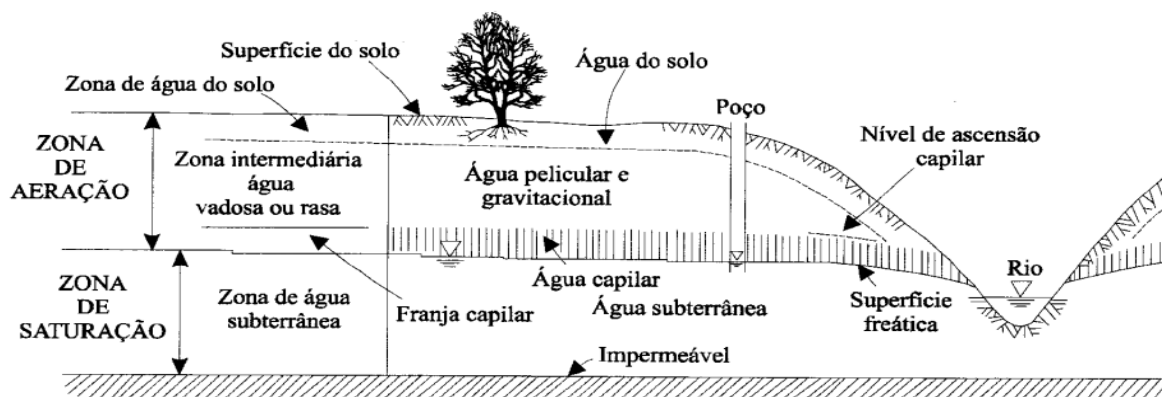
Zona de água no solo ou zona de evapotranspiração: é aquela que está localizada desde a superfície do solo até a parte mais profunda que as raízes das plantas podem alcançar, de forma que consiga sua nutrição, podendo variar a espessura, a depender do tipo de vegetação existente.

Zona intermediária: região que é envolvida pelo limite em que as raízes das plantas consegue alcançar até onde acontece a retenção da água por forças capilares.

Zona capilar: região delimitada entre a superfície de ascensão capilar até a superfície freática.

A Figura 3.2 exemplifica bem a distribuição de águas no solo e as zonas por onde elas ocorrem. Vale destacar ainda, que na hidrogeologia, são consideradas águas subterrâneas, as águas que estão abaixo do lençol freático, e que tem pressões diferentes da atmosférica, e que estão localizadas nas zonas de saturação, situada abaixo da zona de aeração, sendo na zona saturada local que ocorre os aquíferos, aquícludes e aquíardos.

Figura 3. 2: Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade



Fonte: (modificado de Bear & Verruijt, 1987) apud Manoel Filho (2000).

Aquíferos: são definidos por Todd e Mays (2005), como uma formação geológica com capacidade de conduzir água através dos vazios, acumulando-a até grandes quantidades, sendo possível sua comunicação com os rios, poços e nascentes.

Já Cleary (2007), define aquífero como uma formação geológica de satisfatória permeabilidade e interconectados através de poros, de forma a armazenar e transmitir água em quantidades significantes, a depender do uso e da sua formação geológica.

Segundo o autor, os aquíferos podem ser classificados como confinados e não confinados, a depender da presença ou não do lençol freático. Sendo o lençol freático ou superfície freática a superfície superior da zona de saturação, onde sofre influência da pressão atmosférica, tendo valores típicos para sua profundidade variáveis de 10 a 100 metros, a depender de a região em que se encontra ser mais seca ou mais úmida, respectivamente característica dos limites superior e inferior desta faixa. Sendo as seguintes definições:

Aquífero confinado: são formados a partir de uma geologia de materiais relativamente impermeáveis acima e abaixo do seu contorno, estando sob pressão acima da pressão atmosférica. A Figura 3.3 traz um exemplo clássico de um aquífero confinado abordado nas principais literaturas relacionada à hidrogeologia. Embora seja um aquífero confinado, sua área de recarga fica localizada numa região onde ocorre o afloramento superficial, região não confinada. Segundo o autor, essa ideia se

popularizou devido a um trabalho de Meinzer (1923) publicado no U. S. Geological Survey (Serviços Geológicos dos Estados Unidos) sobre princípios das águas subterrâneas.

Aquífero não-confinado: Esses aquíferos também são denominados freáticos ou livres onde, a superfície freática movimenta-se para cima e para baixo em meios materiais como a argila, que é menos permeável (Figura 3.3). Seu fluxo é horizontal e os poços perfurados nesse aquífero tem o mesmo nível de água que a parte de fora do poço, devido à pressão atmosférica.

O autor ainda traz as seguintes definições:

Aqüitardos: são formações de baixa permeabilidade e suas quantidades de água não são suficientes para abastecerem poços. Eles ocorrem geralmente nas camadas de argila e folhelho que separam o aquífero confinado, sendo menos permeáveis até duas ordens de grandezas que o aquífero.

Aqüicludes: são exemplos particulares de aqüitardos, eles ocorrem em materiais com características de baixíssima transmissão de fluxos de água, a saber, os hidrogeólogos consideram que todo material tem um grau de permeabilidade, sendo os mais baixos podendo transmitir alguns metros em mil anos. Embora os aqüitardos já foram considerados impermeáveis no passado, eles são considerados desprezíveis em pequenas áreas e em curto período de tempo.

Teixeira e Gonçalves (2014), ainda traz os conceitos de aquífero semiconfinados e aquífero suspenso, como mostrado a seguir:

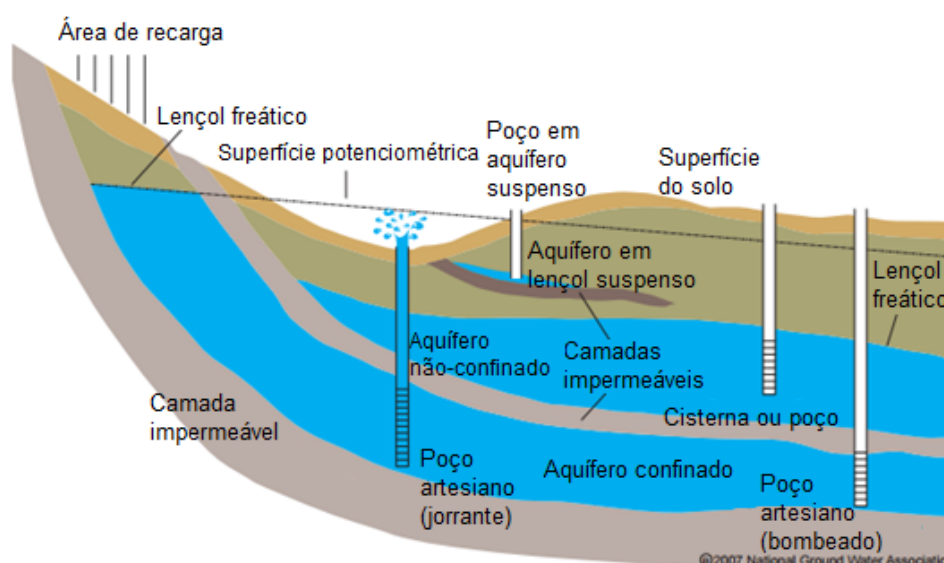
Aquífero semi-confinado: conhecido também como aquífero drenante, sua camada confinante não é espessa, possibilitando o fluxo de água de forma vertical (semipermeável).

Aquífero suspenso: é um caso particular de aquíferos livres, onde uma formação impermeável ocorre entre a zona de saturação e a superfície do solo.

Migliorini *et al* (2007), afirma que o preenchimento dos vazios do solo e das rochas ocorre da seguinte forma: para as rochas metamórficas e rochas ígneas, as águas são transmitidas e armazenadas através de fraturas devido à intemperismos e ações que as rochas sofrem no decorrer de seu tempo de existência; já as rochas e solos do tipo sedimentar, acontece a percolação da água através da porosidade desse meio material, o qual tem a característica de armazenar a água e conduzi-la por meio dos vazios. Todd e Mays (2005), ainda complementa que a porosidade é definida

como uma parte do solo que não é ocupada por material sólido, são chamados de vazios, interstícios ou até poros, e que têm a possibilidade da passagem de água por ela. Podendo ser classificada como interstícios primários e secundários, onde o primeiro é oriundo de processos de formações geológicas, e são encontrados em estruturas de rochas sedimentares, e o segundo são provenientes de ações posteriores à formação da rocha, tais como fissuras por intemperismos, ações antrópicas e outros fatores que são encontrados em estruturas de rochas ígneas e metamórficas.

Figura 3. 3: Aquíferos confinados e não confinados



Fonte: COELHO E HAVENS, 2015 adaptado de NGWA, 2007.

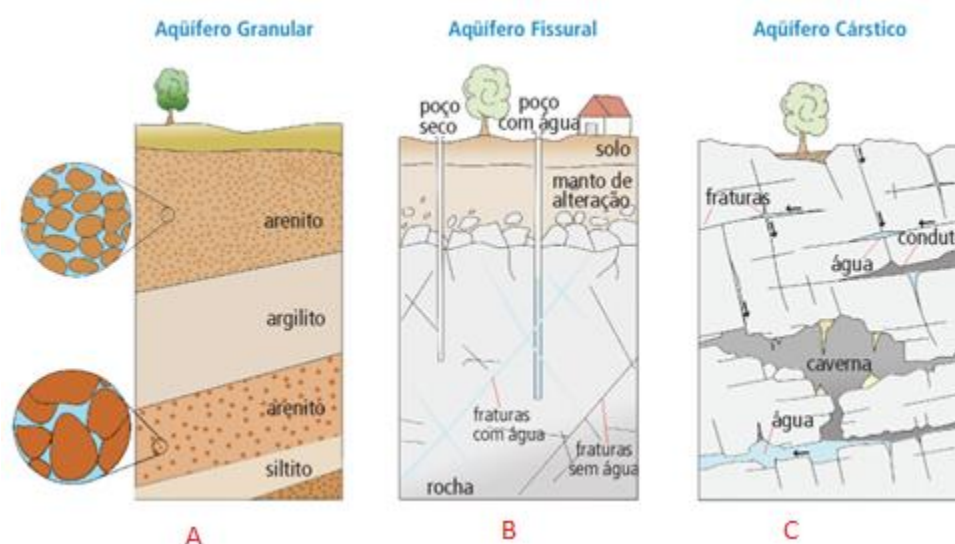
Quanto a litologia dos aquíferos, isto é, a formação que as caracteriza, temos três tipos de aquíferos, que segundo Boscardin Borghetti *et al* (2004), são eles:

Granular ou poroso: sua formação se dá por rochas sedimentares consolidadas, mas também em solos arenosos ou sedimentos inconsolidados, onde a água percola pelos espaços vazios entre os grãos de areia, silte ou argila de variadas granulações. Aquíferos com essas características possuem a capacidade de armazenamento de grandes volumes de águas. Sua porosidade geralmente é homogênea, permitindo o fluxo da água sem caminhos preferenciais, em função apenas da pressão hidrostática existente (Figura 3.4 A).

Fraturado ou fissural: são formações em rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, onde a água percola por fraturas, fendas ou falhas devido às atividades vulcânicas e intemperismos físicos. A capacidade de armazenamento e fluxo de água depende diretamente da quantidade de fraturas e aberturas nas rochas, mas geralmente nota-se que poços perfurados nesses embasamentos são de baixas vazões (Figura 3.4 B).

Cárstico: São formações em rochas calcáreas ou carbonáticas, tendo-se ocorrências de águas devido à fraturas e aberturas resultante da dissolução do carbono pela água. Esse aquíferos tem característica de descontinuidade, águas com índice elevado de dureza e fluxos de água como rios (Figura 3.4 C).

Figura 3. 4: Tipos de aquíferos quanto à porosidade



Fonte: Adaptado de Iritani e Ezaki (2009).

3.2. Principais fontes de contaminação das águas subterrâneas

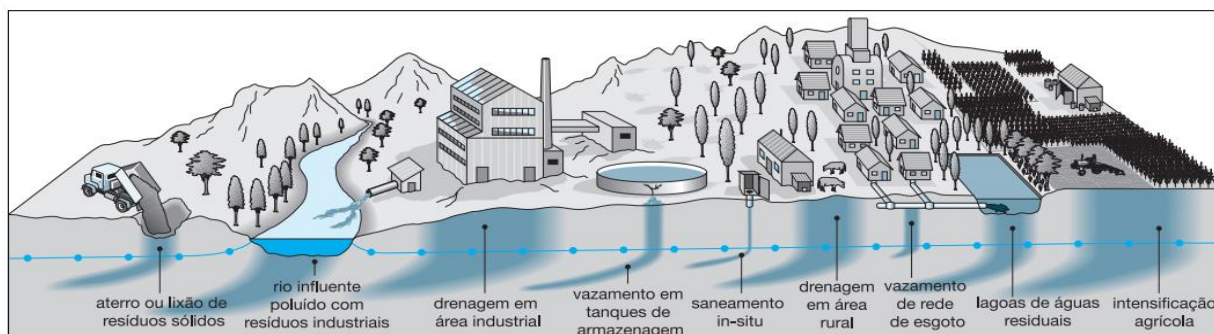
Os problemas de deterioração da qualidade da água de aquíferos e/ou reservas subterrâneas são inúmeros, e sua classificação está relacionada à sua fonte de origem. A contaminação de aquíferos pode ocorrer devido à falta de proteção de aquíferos que são naturalmente vulneráveis devido à presença de resíduos gerados a partir de atividades urbanas, industriais e lixiviados de origem agrícolas, com presença de agentes patógenos e matéria orgânica e inorgânica, tais como nitrogênio

total, cloretos, sulfatos, carbono orgânico, hidrocarbonetos, pesticidas, halogênicos entre outros, afirma Foster *et al* (2002).

Ainda de acordo os autores, a contaminação pode ocorrer no próprio poço de captação, devido a fatores como a sua construção inadequada, permitindo a entrada de águas superficiais e águas subterrâneas poluídas por microrganismos nocivos à saúde humana. Além desses problemas, os autores ainda destacam a intrusão salina de cloretos de sódio devido ao excesso de extração, favorecendo a entrada de poluentes de origem antrópica e conseqüentemente transmitindo-se para aquíferos de água doce. E a contaminação natural por agentes como fluoreto, ferro solúvel, sulfato de magnésio em algumas ocasiões, arsênio, manganês, selênio, cromo, entre outras espécies de origem inorgânicas, que estão diretamente relacionadas com a química da água subterrânea e também a dissolução de minerais devido à natureza geológica por onde a água percola e à poluição ligada à atividade humana e a exploração descontrolada do aquífero.

Os mesmos autores ainda mencionam que a contaminação dos aquíferos ocorre devido ao solo esgotar sua capacidade natural de degradação. A água da chuva infiltra no solo, carregando consigo impurezas encontrada na superfície, tanto de natureza geológica local, quanto provenientes de atividades desenvolvidas na bacia (Figura 3.5). Essa degradação elimina os poluentes naturalmente nos perfis naturais do subsolo durante seu transporte na zona vadosa, sendo essa degradação bioquímica e de reações químicas. Embora muitos dos perfis de subsolo e camadas adjacentes tenham essa característica de atenuação do contaminante, existe alguns tipos de aquíferos que não têm essa eficácia de atenuação, sendo assim, aquíferos em subsolos com essas características são ditos naturalmente vulneráveis à contaminação nestes lugares, a exemplo, rochas consolidadas muito fraturadas, sendo que o grau de atenuação está relacionado aos tipos de contaminantes e processos associados a uma determinado ambiente hidrogeoquímico.

Figura 3. 5: Processos comuns de poluição das águas subterrâneas



Fonte: Foster et al (2002).

A tabela 3.1 traz uma síntese dos principais tipos de contaminantes e suas fontes de origens:

Tabela 3. 1: Fontes de contaminação e tipos de contaminantes mais comuns

FONTE DE POLUIÇÃO	TIPOS DE CONTAMINANTES
Atividade agrícola	Nitrato; amônio; pesticidas; organismos fecais
Saneamento <i>in situ</i>	Nitrato; hidrocarbonetos halogenados; microrganismos
Postos de combustíveis, lava jato, garagens e oficinas	Hidrocarbonetos aromáticos e halogenados; metais pesados
Indústrias metalúrgicas	Tricloroetileno; tetracloretileno; hidrocarbonetos halogenados; metais pesados, fenóis; cianureto
Pintura e esmaltação	Alquibenzeno; hidrocarbonetos halogenados e aromáticos; metais; tetracloretileno
Indústria de madeira	Pentaclorofenol; Hidrocarbonetos halogenados e aromáticos
Indústria de Pesticida	Fenóis; arsênico; hidrocarbonetos halogenados
Lodo do esgoto	Nitrato amônio; hidrocarbonetos halogenados; chumbo; zinco
Extração de petróleo e gás	Salinidade (cloreto de sódio), hidrocarbonetos aromáticos
Mineração de carvão e metalíferos	Acidez; metais pesados; ferro; sulfatos
Curtumes	Cromo; hidrocarbonetos halogenados; fenóis

Fonte: Elaborado a partir de Foster et al (2002).

Conforme Zoby (2008), estudos sobre a qualidade das águas subterrâneas no Brasil comprovam que muitos aquíferos na sua forma natural têm seus teores de dureza e sólidos totais elevados, principalmente onde ocorre as rochas calcárias, ou em sistemas de aquíferos mais profundos, nesse último caso, nas partes confinadas das bacias sedimentares. Além disso, em aquíferos fraturados, ocorrentes principalmente no semiárido brasileiro, encontra-se valores elevados de sólidos totais dissolvidos, decorrentes das explorações das águas sem considerar a velocidade de sua recarga.

O autor aborda também que as atividades antrópicas tem afetado a qualidade da água subterrânea de forma significativa, identificando-se inadequada construção de poços rasos e profundos, propiciando a entrada de águas contaminantes; contaminação de poços por nitrato e agentes microbiológicos proveniente dos despejos de sistemas de saneamento; disposição inadequada de resíduos sólidos, onde pode ocorrer a infiltração do chorume até o aquífero.

3.3. Vulnerabilidade de aquíferos à contaminação

Os problemas relacionados à contaminação de aquíferos podem ser entendidos quanto a vulnerabilidade do aquífero a ser contaminado ou quanto à presença de carga contaminante que ocorre na bacia, seja antrópica ou natural. Essas duas características juntas (vulnerabilidade e presença de contaminante), são suficientes para que a poluição alcance o aquífero. Se existe a vulnerabilidade, mas não há presença de contaminantes significantes, o aquífero mesmo vulnerável, tem um risco mínimo de sofrer a contaminação. Tal fato leva a entender que, quanto à vulnerabilidade, nada se pode fazer para que modifique essa condição natural dos aquíferos, mas quanto à contaminação, é possível controlar e/ou modificar as atividades de potencial contaminação de uma área com alta vulnerabilidade (FOSTER *et al*, 2002).

Nesse sentido, Foster *et al* (2002), ainda afirma que a proteção desses aquíferos se dá através de políticas de restrição do uso e ocupação do solo de determinadas atividades que têm características que afere risco de contaminação das águas subterrâneas. A princípio, é compreendida a vulnerabilidade local, mapeada, de forma que as auxilie nas tomadas de decisões quanto às atividades que podem ser realizadas naquele local.

Ainda conforme Foster *et al* (2002), a base para proteção das águas subterrâneas é avaliar o perigo de contaminação, entendendo que a vulnerabilidade representa, de forma mais básica, a sensibilidade do aquífero com a influência de uma carga contaminante.

A expressão vulnerabilidade já foi alvo de diversas discussões no meio acadêmico e científica, e para um discernimento consistente, é preciso considerar a vulnerabilidade como uma característica intrínseca dos estratos que ocorrem acima da zona saturada, ao qual o contaminante percola até entrar em contato com as águas subterrâneas, determinando a susceptibilidade a ser adversamente afetado por uma carga de contaminantes provenientes da superfície do solo. Posteriormente, a vulnerabilidade passa a ser vista em função da inacessibilidade hidráulica, da zona de saturação quanto a percolação do contaminante, da capacidade de atenuação dos estratos da zona vadosa, resultante da retenção física e das reações químicas dos contaminantes com o meio (FOSTER, 1987; OSÓRIO, 2004).

Nessa percepção, o perigo à contaminação dos aquíferos torna-se conhecido como a probabilidade de que as águas subterrâneas sejam contaminadas por atividades na superfície. Já o risco (probabilidade de perigo) se caracteriza pela presença ou ausência do contaminante (ADAMS e FOSTER, 1992; OSÓRIO, 2004).

Em seguida, os conceituados grupos de pesquisadores revisaram o conceito e se pronunciaram sobre a sua aplicabilidade, dando ênfase a sua utilidade, passando a ser definida pelo Conselho Nacional de Pesquisas dos Estados Unidos da América, como a tendência ou probabilidade da presença do contaminante em uma posição específica do aquífero, após ele ter percorrido pelas camadas não saturadas (NRC, 1993; VRBA e ZAPOROZEC, 1994).

A pertinência da aplicação do conceito de vulnerabilidade pouco contribuiu para o desenvolvimento da ferramenta de avaliação. Notado isso, o conceito passou a ser aceito mundialmente e muitas ferramentas foram desenvolvidas para determinação da vulnerabilidade de aquíferos (OSÓRIO, 2004).

Albinet (1970), foi um dos pioneiros a mapear a vulnerabilidade de águas subterrâneas no mundo. Seu mapeamento considerou todo território da França em uma escala de 1:1.000.000. A partir desses resultados, fez-se mapas isolados com escalas inferiores (1:250.000 e 1:50.000) com objetivo de identificar as áreas sensíveis à contaminação por atividades antrópicas. Para o autor, os mapas com

escalas maiores apresenta melhores informações quanto ao uso e ocupação do solo, visando a proteção de poços, restringindo áreas vulneráveis às atividades como depósitos de resíduos, cemitérios e diversas outras com grau de poluição significativa.

3.3.1 Metodologias para determinação da vulnerabilidade

Conforme Meneses *et al* (2009), a escolha dos métodos de avaliação de vulnerabilidades de aquíferos se deve aos dados e informações existentes para sua aplicação. Primeiro analisa os dados existentes, e em seguida opta por um método mais simples e de baixo custo. Vale ressaltar que nem todos métodos se comporta bem conforme a variabilidade da natureza dos aquíferos.

Borges (2017), sintetiza os principais métodos para avaliação da vulnerabilidade utilizados atualmente, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3. 2: Principais métodos de avaliação da vulnerabilidade

Método	Uso	Parâmetros	Autor
AVI	Vulnerabilidade geral	Espessura da camada sedimentar e condutividade hidráulica	Van Stempvoort et al. (1992)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	D - Profundidade da água subterrânea, R - Recarga, A - Meio aquífero, S - Solo, T - Topografia, I - Impacto da zona vadosa, C - Condutividade hidráulica.	ALLER et al. (1985)
EKv	Vulnerabilidade geral	Espessura da zona subsaturada e permeabilidade da zona saturada	AUGE (1995)
EPIK	Vulnerabilidade geral (aquíferos cársticos)	Carstificação superficial, cobertura de proteção, infiltração e rede cárstica	DOERFLIGER; ZWAHLEN (1997)
EPPNA	Vulnerabilidade geral	Litologia do aquífero	EPPNA, 1998
IS	Contaminantes agrícolas	Profundidade do nível estático, recarga, litologia, topografia e ocupação do solo	Francés et al.(2001)
GOD	Vulnerabilidade geral	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade do nível d'água	FOSTER; HIRATA (1988)
LANDFILL RANKING	SITE Aterros sanitários	Distância aterro/poço, gradiente, permeabilidade e capacidade de atenuação.	LE GRAND (1983)
SANEAMENTO SITU	IN Maior perigo por sistemas de saneamento in situ	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade e qualidade da água	FERREIRA; HIRATA (1993)
SINTACS	Vulnerabilidade geral	Utiliza os mesmos parâmetros do DRASTIC, porém, com pesos diferentes.	CIVITA et al. (1990)
SITE RANKING METHODOLOGY	Disposição de resíduos sólidos	Contaminação, pluviometria, permeabilidade do solo, características do resíduo, manejo e aspectos operacionais e construtivos.	KULFS et al. (1980)
ΔHT'	Vulnerabilidade geral (aquífero semiconfinado)	Potencial hidráulico e transmissividade vertical	AUGE (2001)

Fonte: Elaborado a partir de Borges (2017).

3.3.2 Conceitos do método GOD

O método GOD de (FOSTER, 1987; FOSTER e HIRATA, 1988) é bastante conceituado e utilizado mundialmente devido a sua simplicidade de aplicação e eficiência, pois sua aplicabilidade depende apenas de três parâmetros hidrogeológicos:

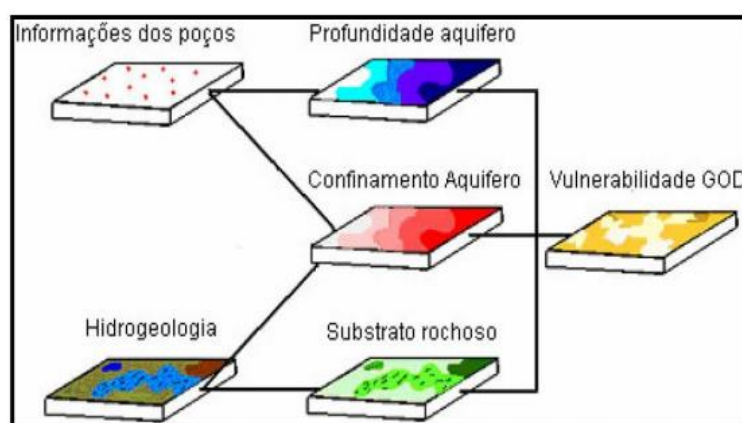
- G (**G**roundwater occurrence) – Grau de confinamento da água subterrânea;
- O (Lithology of the **O**verlying layers) - Ocorrência de estratos de cobertura (litologia da zona vadosa);
- D (**D**epth of Groundwater) - Distância até o lençol freático ou teto do aquífero confinado.

O produto dos três parâmetros gera um índice de vulnerabilidade do aquífero à contaminação, que pode variar de insignificante, baixa, média, alta e extrema.

Para a execução do método é preciso identificar o grau de confinamento, atribuindo-se um índice na escala de 0 a 1; especificação dos estratos de cobertura da zona saturada com relação ao grau de consolidação e litologia, atribuindo-se um índice na escala de 0,4 a 1 e estimar a profundidade do nível estático (aquíferos livres) ou do teto do aquífero (aquíferos confinados), com classificação na escala de 0,6 a 1.

A Figura 3.6 apresenta um modelo conceitual dos dados necessários para aplicação do método GOD.

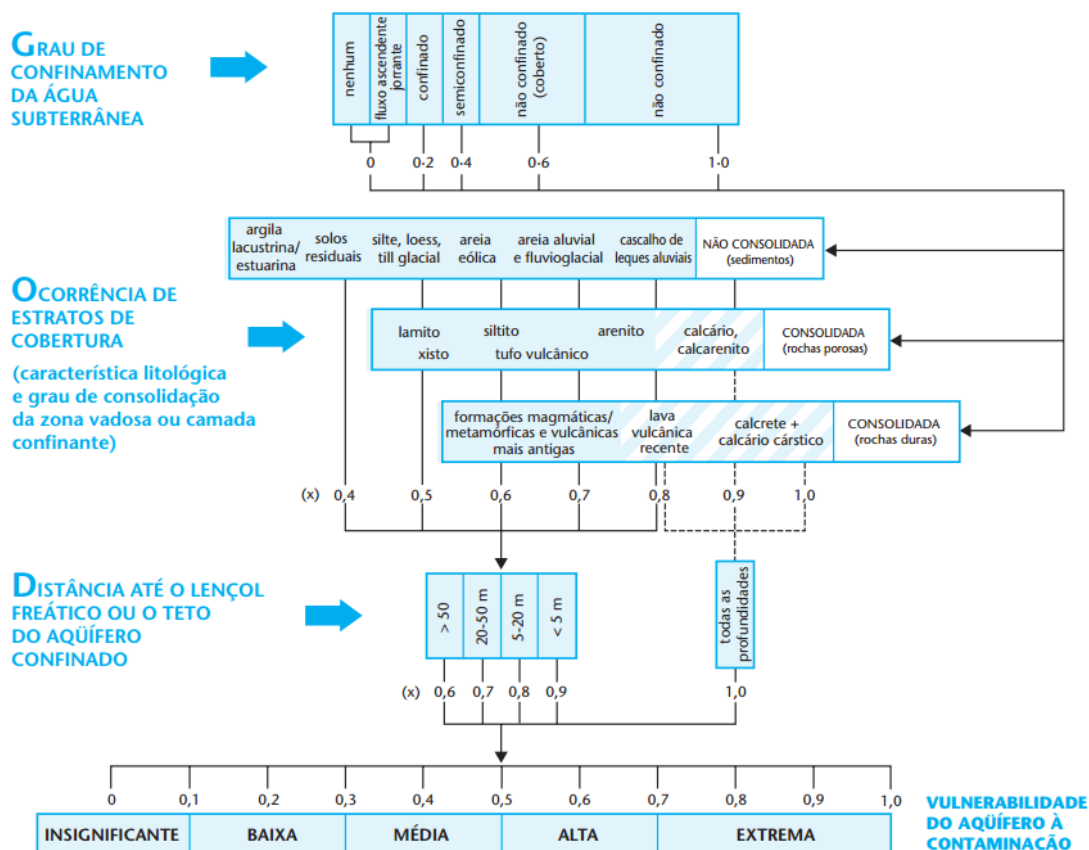
Figura 3. 6: Esquema do método GOD



Fonte: Adaptado por Silva (2013), de YAMADA (2007)

A Figura 3.7 mostra o procedimento para avaliação da vulnerabilidade pelo referido método.

Figura 3.7: Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade



Fonte: Foster et al (2002).

O mapa de vulnerabilidade GOD é gerado multiplicando-se os índices obtidos conforme a equação 01, abaixo:

$$\text{Índice de Vulnerabilidade} = G_i * O_i * D_i \quad (\text{Equação 3.1}).$$

Onde, G, O e D são os parâmetros utilizados, e *i* o índice de classificação de cada parâmetro.

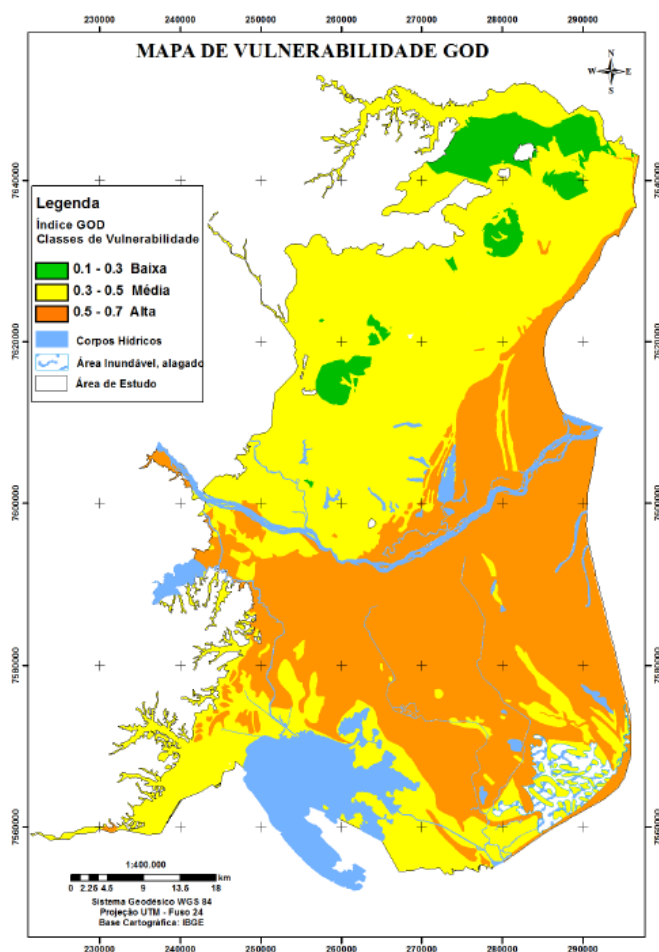
Conforme Foster e Hirata (1998), as classes de vulnerabilidade são definidas da seguinte forma:

- **Extrema:** com índice de 0,7 a 1,0 de vulnerabilidade a muitos poluentes e com rápido impacto.
- **Alta:** com índice de vulnerabilidade de 0,5 a 0,7, vulneráveis a muitos poluentes, com exceção daqueles poucos móveis e poucos persistentes.
- **Moderada:** com índice de 0,3 a 0,5, vulneráveis a alguns poluentes quando são lançados de forma continuada.
- **Baixa:** com índice de 0,1 a 0,3 de vulnerabilidade, sendo vulnerável a contaminantes conservativos em longo prazo, onde é lançado de forma continuada e ampla.
- **Desprezível:** com índice de 0 a 0,1 de vulnerabilidade, trata-se de camadas confinantes com fluxo vertical descendentes insignificantes.

3.3.3 Estudos de vulnerabilidade utilizando o método GOD

Muitos trabalhos têm sido realizados utilizando a metodologia proposta por Foster (1987). Chrispim (2016) estudou a vulnerabilidade dos aquíferos livres rasos da bacia sedimentar de Campos dos Goytacazes no Rio de Janeiro, dentre os métodos utilizados, a análise com o método GOD (Figura 3.8) apresentou um percentual de 44% da área com índice de vulnerabilidade alta, 53% média e apenas 3% baixa. Os estudos indicam que a vulnerabilidade corresponde aos bolsões de areia presentes nos solos da baixada campista, que são cambissolo eutrófico e neossoloflúvico; e a ocorrência de espodossolo na região costeira, composta por areias quartzosas. Um outro fator se deve aos níveis de profundidade do nível estático dessas áreas, que em média são iguais ou inferiores a 5 metros.

Figura 3. 8: Mapa de Vulnerabilidade GOD

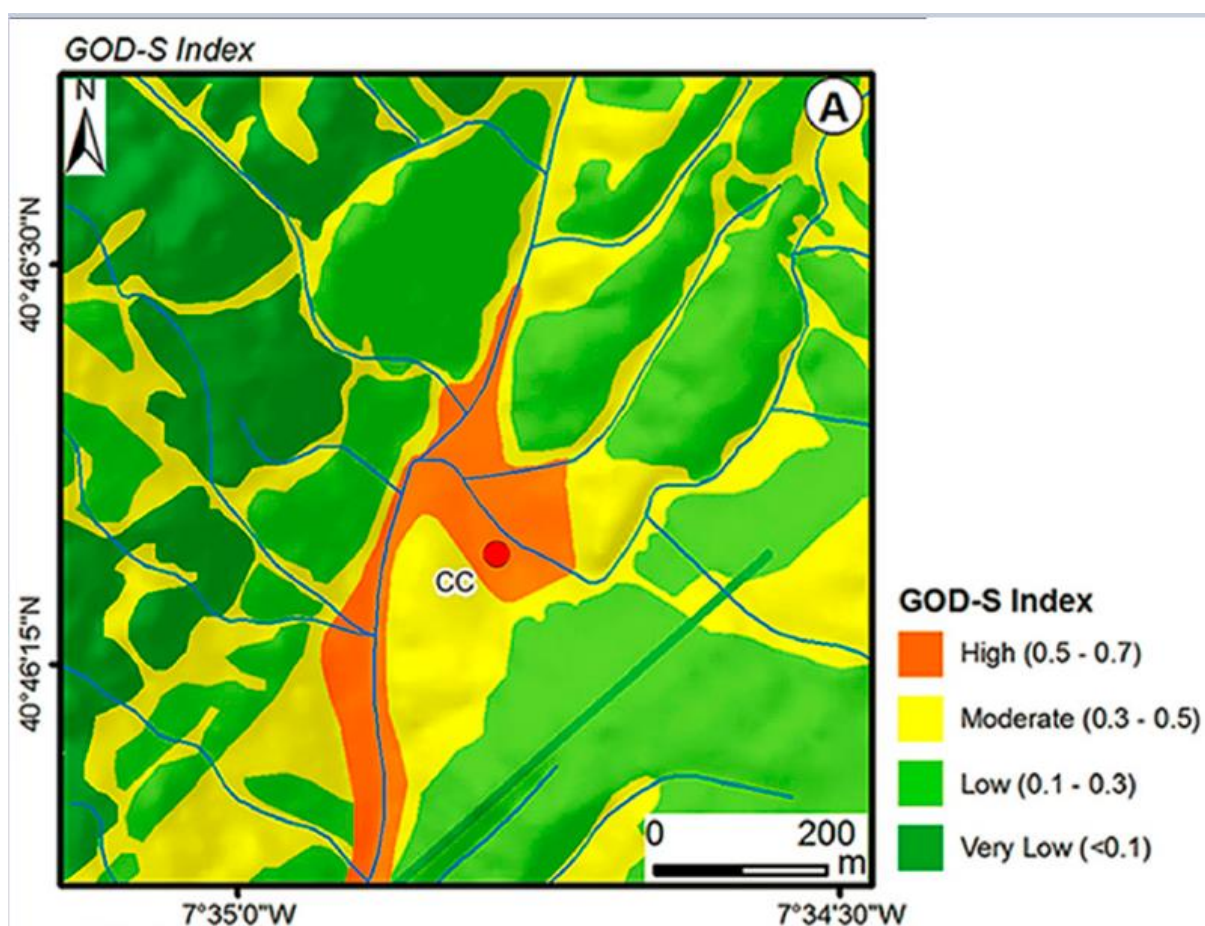


Fonte: Chispim (2016).

Meerkhanet *al* (2016) delimitou uma região de falhas tectônicas no município de Aguiar da Ribeira em Portugal, com o objetivo de avaliar os índices de vulnerabilidades a fim de proteger as águas subterrâneas. A região de estudo está localizada na zona Centro-Ibérica, parte do Complexo granítico do Dão, próximos ao limite Ocidental do Bragança-Vilarila-Manteigas, que é caracterizado pelas zonas de falhas do Dão. Essa região é conhecida por Caldas da Cavaca e tem a tradição por possuir fontes de águas termais. O estudo utilizou diversas metodologias de análises, dentre elas o método GOD acrescido do parâmetro S, que corresponde as propriedades do solo.

Os resultados obtidos da avaliação conforme os índices GOD-S mostraram que a maioria das áreas de Caldas da Cavaca se encaixa numa categoria de Vulnerabilidade moderada. O fato ocorre devido à presença de granito altamente degradado. Já a alta vulnerabilidade corresponde uma pequena região estreita considerada fundo de vale, cuja vulnerabilidade se dá pela presença significativa de coberturas aluviais. Já os índices de baixa vulnerabilidade estão relacionados à presença de granito com baixa resistência e pouco degradado. A figura 3.9 traz o mapa de vulnerabilidade dos autores utilizando o método GOD-S.

Figura 3. 9: Mapa de Vulnerabilidade de Caldas da Cavaca



Fonte: Adaptado de Meerkhan et al (2016)

Além desses, atualmente muitos outros trabalhos relevantes tem aplicações do método GOD ao redor do mundo. Vale destacar ainda trabalhos de Fernandes *et al* (2014) na bacia do rio Cabril em Portugal, Osório (2004) na microrregião Geográfica de Santa Maria no Rio Grande do Sul, Nascimento *et al* (2009) no Alto Cristalino de Salvador na Bahia, Khemiri *et al* (2013) na região semiárida da Tunísia, Ghazavi e Ebrahimi (2015) na planície de Abarkooh na província de Yazd (Centro do Irã), Moura (2014) na porção Norte do complexo industrial e portuário do Pecém, no estado do Ceará.

4. Materiais e Métodos

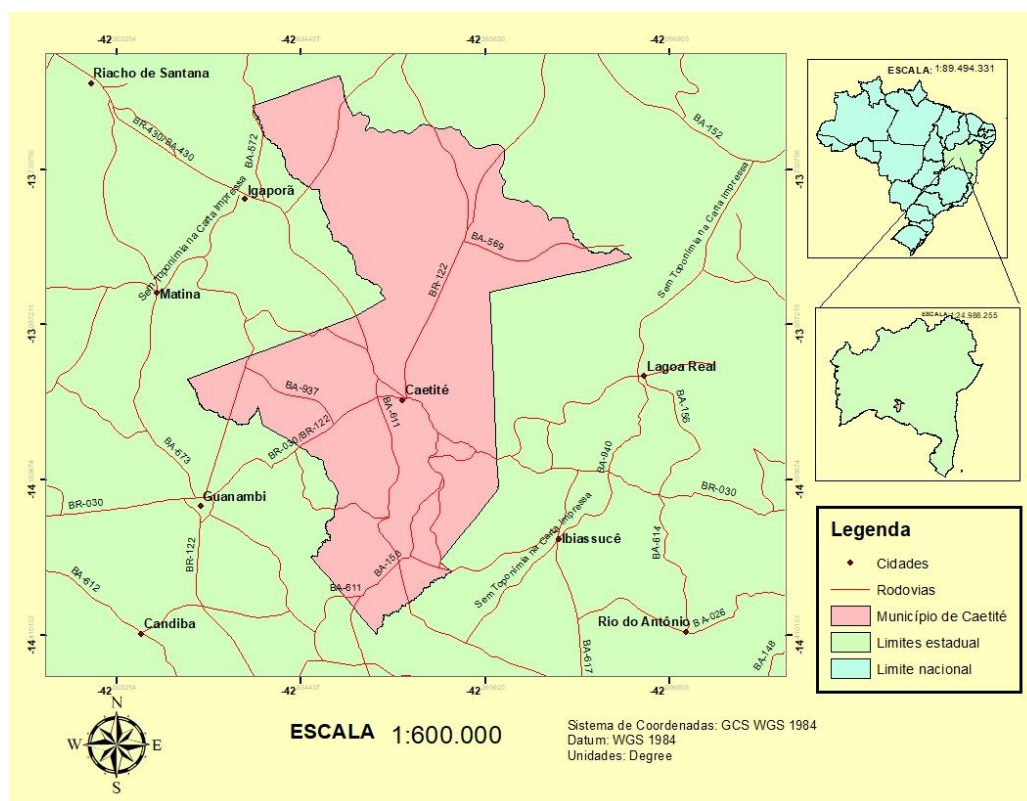
4.1 Descrição da área de estudo

4.1.1 Características gerais e localização do município

Caetité é um município localizado no sudoeste da Bahia, a cerca de 645 km de distância de Salvador, capital do estado. A sede do município fica a 825 metros de altitude, mas com área do município em altitudes pouco superior a 1000 metros. Apesar de situada no semiárido, possui um clima ameno, apresentando pluviosidade média de 862 milímetros ao ano. De acordo o IBGE (2010), sua população é de 47.515 habitantes, estimando-se 52.853 habitantes para o ano de 2017, área da unidade territorial do município é de 2.651,536 km², densidade demográfica de 19,45 hab./km². Caetité vem ganhando muito destaque no cenário nacional devido à sua diversidade de recursos naturais, tais como o urânio, que é extraído pela estatal Indústria Nuclear do Brasil, extração de minério de ferro, manganês e de ametista. Por ter uma altitude significativa, possui uma intensidade de vento com potencial de geração de energia eólica praticamente o ano todo, sendo que nos meses de maio até setembro apresentam maior intensidade nos ventos, chegando até 5,02 m/s equivalente a pouco mais de 18 km/hora, o que faz Caetité ser palco do maior complexo de energia eólica da América Latina. A sua vegetação é caatinga em partes mais baixas, e cerrado nas mais altas, sendo estes conhecidos por gerais. Além disso, a economia do município se destaca também pela pecuária, agricultura, indústria, comércio e o turismo. Sendo na pecuária a produção carne e leite, na agricultura a produção de cana-de-açúcar, café, milho e feijão. No setor industrial destaca-se as indústrias de cerâmica e têxteis.

A Figura 4.1 mostra a localização do município de Caetité com relação aos municípios vizinhos, estado e país, elaborado a partir da malha IBGE (2010).

Figura 4. 1: Localização do município de Caetité em relação ao país, estado e a microrregião da Serra Geral



Fonte: Próprio Autor

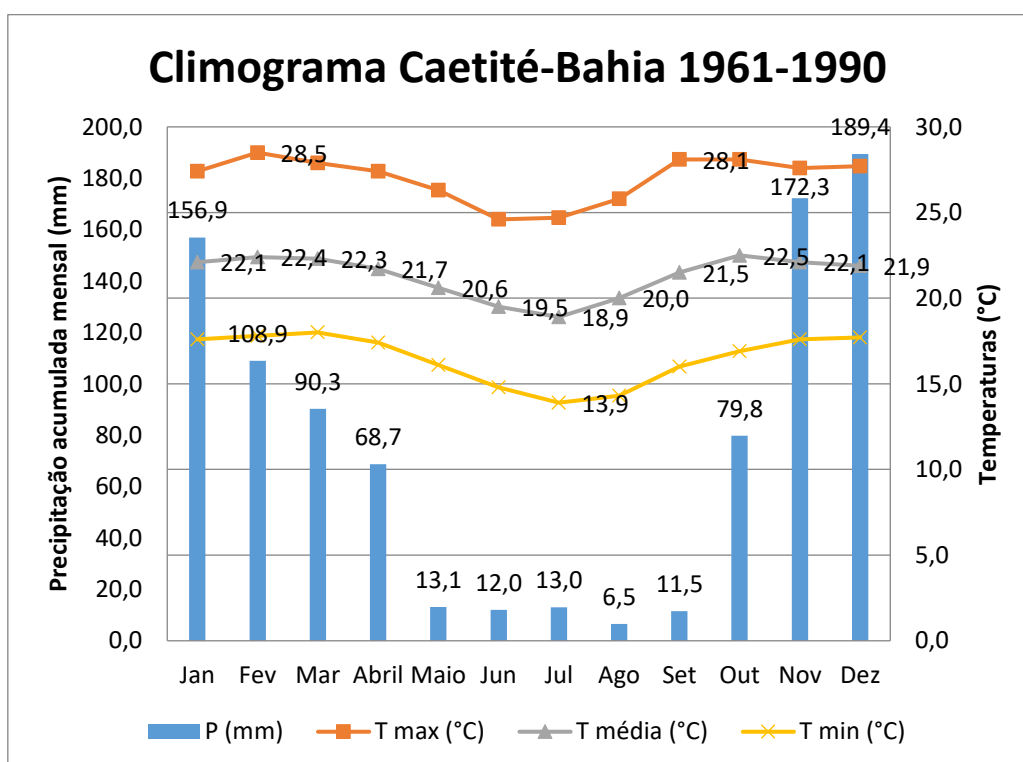
Em 2015, a população total atendida com abastecimento de água foi de 38.201 habitantes, o volume de água tratada por simples desinfecção foi de 74.940 m³/ano e a população urbana atendida com água com abastecimento de água foi de 31.450 habitantes (SNIS, 2015).

4.1.2 Aspectos hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, climatológicos e hidrográficos

O Gráfico 4.1 elaborado a partir das Normais Climatológicas do Brasil, de dados de estação meteorológica do INMET localizada no município de Caetité, mostra um clima com notáveis diferenças em relação a outras cidades do semiárido, mesmo as que estão geograficamente próximas. Sua característica topográfica influencia no clima local. Maio, junho, julho, agosto e setembro são os meses de menores médias de precipitações e temperaturas. Observa-se que os meses de maiores médias mensais de precipitações ocorrem entre os meses de novembro, dezembro e janeiro,

variando de um ano para outro, chegando a valores de máximas mensais de 189,4 milímetros de precipitação acumulada. Quanto às máximas temperaturas, os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro se destacam, sendo que, fevereiro anota 28,5°C, já em mínimas temperaturas estão os meses junho, julho e agosto, sendo que, julho apresenta a temperatura mínima de 13,9 °C. A temperatura média mais baixa ocorre em agosto (18,9 °C).

Gráfico 4. 1: Gráfico com temperaturas máximas, médias e mínimas relacionadas com a precipitação acumulada mensal da cidade de Caetité-BA

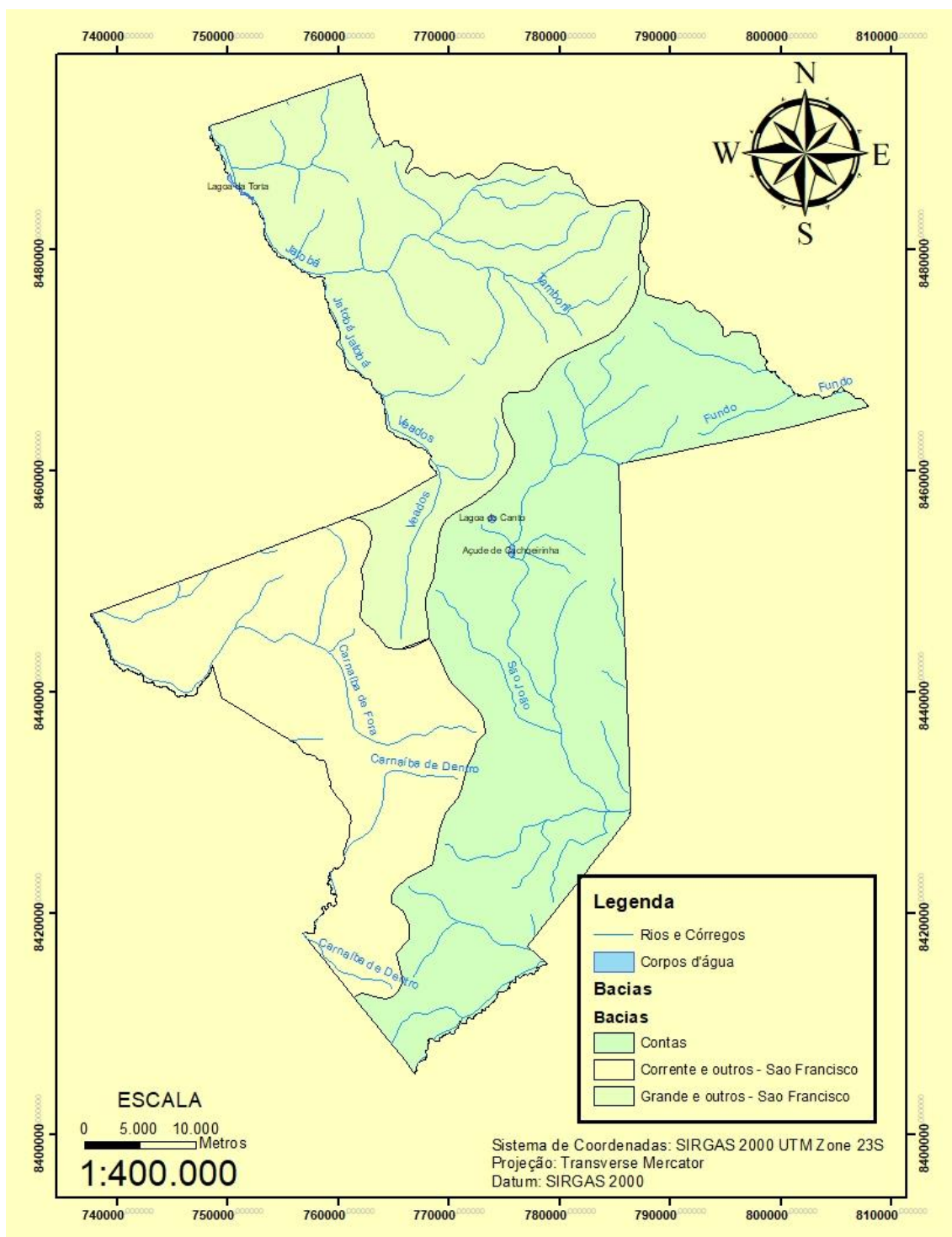


Fonte: Próprio Autor

Pela classificação climática de Kopper-Geiger, o município se classifica em dois tipos climáticos, sendo eles clima tropical chuvoso de floresta subtipo Aw' (que é predominante) e clima tropical de altitude subtipo Cwa (em regiões de pico), que respectivamente são definidos como: “tropical subúmido; chuvas de verão e seca no inverno, vegetação de caatinga e/ou floresta estacional e/ou tensão ecológica” e “Clima tropical de altitude; chuvas de verão e seca de inverno; temperatura do mês mais frio superior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C; altitude maior que 1000 metros e inferior a 1200 metros com relação ao nível médio dos mares” (BAHIA, 1998).

A Figura 4.2 elaborado a partir de dados de (ANA, 2010) em escala de 1:1.000.000, mostra que Caetité está localizado entre os limites topográficos de duas Regiões Hidrográficas, sendo elas a Região Hidrográfica do Rio São Francisco e a Região Hidrográfica Atlântico Leste. Nos limites do município, localizados na Região Hidrográfica do São Francisco, predomina a Bacia do Rio Grande, onde destaca-se o Riacho do Jatobá, o Riacho do Tamboril e o Córrego dos Veados, formando a nascente do Rio Santo Onofre, que integra a bacia do São Francisco. No limite municipal dentro da bacia do Rio Corrente destaca-se o Rio Carnaíba de Fora com maior área de drenagem e o Rio Carnaíba de Dentro, com menor área de drenagem, ambos efluentes do Rio da Rã, integrando a bacia do São Francisco. E já nos limites municipal localizados na Região Hidrográfica do Atlântico Leste, destaca-se o Rio São João, que corta a sede do município e o Riacho Fundo (afluente do Rio São João) que juntos integram a bacia do Rio de Contas (ANA, 2010).

Figura 4. 2: Mapa hidrográfico do Município de Caetité-BA

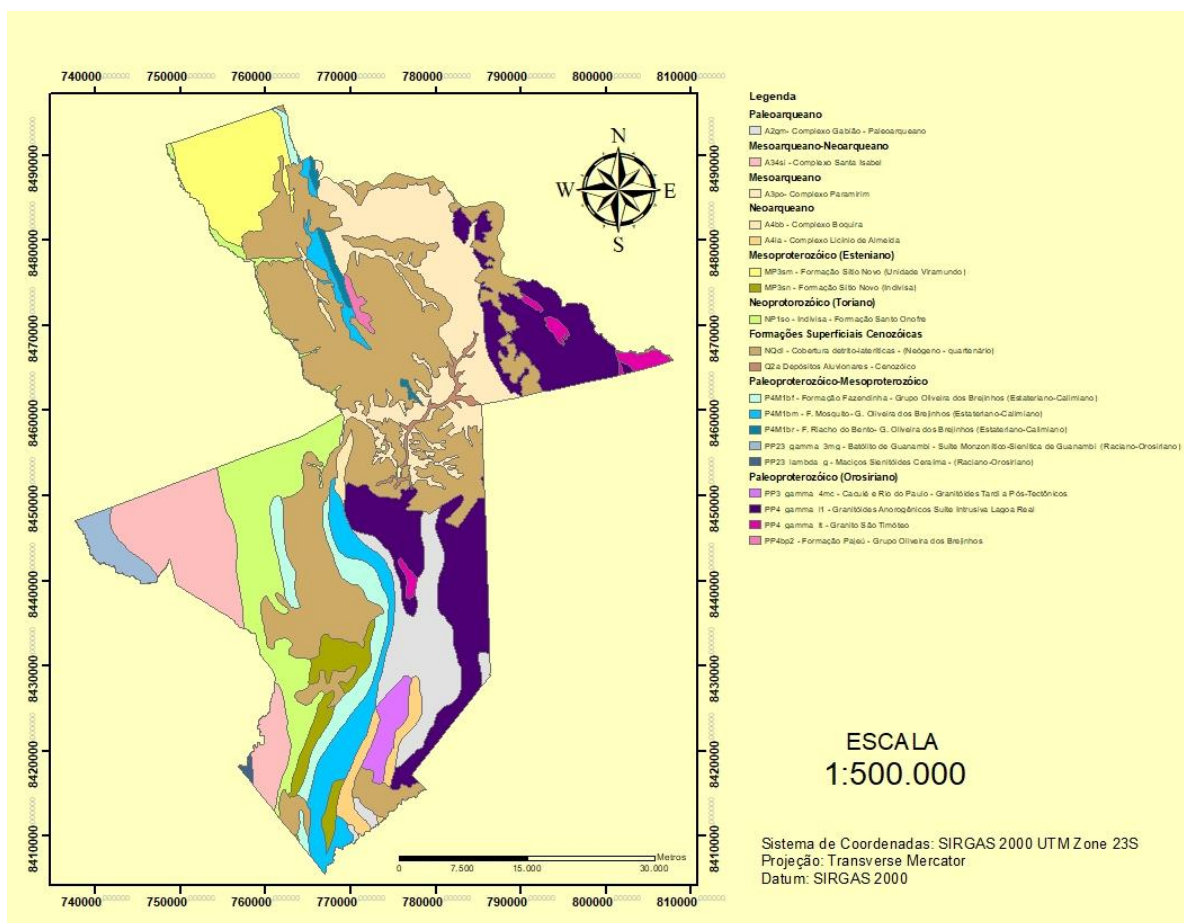


Fonte: Próprio Autor

Conforme mapa geológico do município (Figura 4.3), elaborado a partir de extração do mapa geológico da Bahia (CPRM, 2010), numa escala de 1:1.000.000, as formações e complexos existentes no município são:

- Complexo Gavião: Ortognaissmigmatítico-trondhjemítico-granodiorítico, com enclaves máfico e ultramáficos (período Paleoarqueano 3600-3200 Ma);
- Complexo Santa Isabel: Ortognaissmigmatítico, granodiorítico a trondhjemítico, granulítico, com restos de rochas supracrustais e metaultramáfica (Período Mesoarqueano-Neoarqueano 3200-2500 Ma);
- Complexo Paramirim: Ortognaissetonalítico-trondhjemítico-granodiorítico, com restos de rochas supracrustais (período Mesoarqueano);
- Complexo Boquira: Unidades Boquira e Botuporã com formação ferrífera, quartzito ferruginoso, mármore, grafita xisto, xisto e rocha calcissilicática, metakomatiito e metamafito (período Neoarqueano 2800-2500 Ma);
- Complexo Licínio de Almeida: formações ferríferas e manganésifera, merachert, mármore, xisto e quartzito (período Neoarqueano 2800-2500 Ma);
- Formação Sítio Novo: Unidade Viramundo com formações de quartzito puro e feldspático e filito, indivisa com formações de quartzito, metaconglomerado, filito e raro metadolomito (período Mesoproterozóicoestianino 1200-1000 Ma);
- Formação Santo Onofre (período NeoproterozóicoToriano 1000 – 850 Ma);
- Formação Fazendinha, Formação Mosquito, Formação Riacho do Bento; Suíte Monzonítico-Sienítica de Guanambi do Grupo Oliveira dos Brejinhos (período Paloproterozóico-Mesoproterozóico 2300-1400);
- Granito São Timóteo, Granitóides Anorogênicos Suíte Intrusiva Lagoa Real, GranitóidesTardi a Pós-Tectônicos;
- Formação Pajeú do Grupo Oliveira dos Brejinhos (período Paleoproterozóico);
- Formações Superficiais Cenozóicas: Cobertura detrito-lateríticas: areia com níveis de argila e cascalho e crosta laterítica, que são Neógeno- Quartenário (< 23,5 Ma).

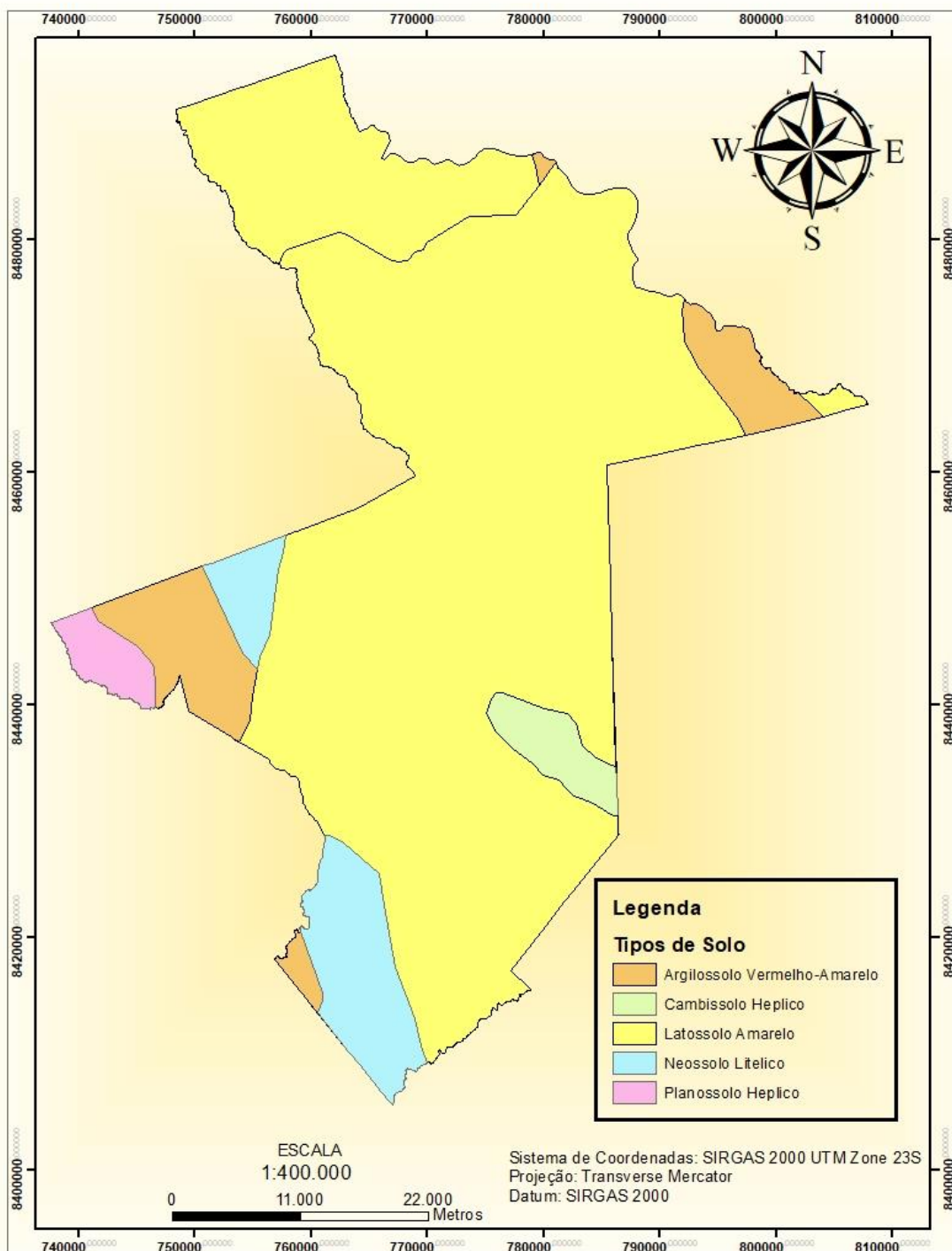
Figura 4. 3: Mapa Geológico de Caetité



Fonte: Próprio Autor

O mapa de solos da Figura 4.4 foi obtido através de extração do mapa de solos do Brasil elaborado a partir de (EMBRAPA, 2001) numa escala de 1:5.000.000. Destaca-se a predominância de Latossolos amarelos, argilossolos vermelho-amarelos, neossoloslíticos, cambissolo e planossolos. Conforme Santos e Oliveira (sd.) esses tipos de solos favorecem uma fitofisionomia estabelecida por Floresta estacional decidual, Cerrado arbóreo aberto, contato Cerrado-Floresta estacional, Contato Caatinga-floresta estacional, Caatinga arbórea aberta com palmeiras, Caatinga arbórea aberta sem palmeiras, Floresta estacional semidecidual e Gramíneo-lenhosa.

Figura 4. 4: Mapa de Solos do município



Fonte: Próprio Autor

Estudos de Simões Filho *et al* (2006), Silva (2011), CPRM () e Simões Filho *et al* (2008), mostram que as águas subterrâneas na região de Caetité são classificadas do tipo bicarbonatadas sódicas, com variação do balanço de íons segundo seu fluxo subterrâneo e com evolução de íons de cloretos para bicarbonatos, e de cálcio para íons sódico. As concentrações de urânio das águas subterrâneas próximas as jazidas de urânio variam conforme três padrões básicos de especiação, sendo elas:

- Exclusividade dos compostos carbonáticos (poços com profundidades maiores que 50 m);
- Dominância da uranila livre e sem carbonato, representado por uma zona de recarga em área de latossolo laterítico;
- Miscelânea de complexos aquosos (fluoretos, carbonatos, silicatos e hidroxilas), ocorrendo nos canais dos córregos formados por aluviões, depositado por redes de drenagem intermitentes, onde predomina os poços rasos (inferior a 30 metros).

Ainda conforme os autores supracitados, os aquíferos estudados no município é um sistema fissural aberto de alta permeabilidade e alimentado por conjunto de fraturas sub-verticais interconectadas por fraturas sub-horizontais, em geral com baixa capacidade de retenção de água, apresentando produção variada (inferior a 3 m³/hora) e recarga ineficiente. E as águas desses aquíferos pode ser entendida de duas formas; quanto a sua localização em formações com presença de gnaisses ou quartzitos, onde as fraturas chegam a profundidades entre 40 e 60 metros associadas a uma recarga recente; e por presença de gnaisses ou granitos juntos às aluviões, abastecidos por fraturas com profundidades entre 10 e 40 metros, onde possivelmente a recarga é mais lenta.

4.2 Procedimento para avaliação da vulnerabilidade

De forma geral, para execução do método GOD de vulnerabilidade, foi utilizado o software ARCGIS versão 10.3.1 da ESRI. A interpolação dos índices de cada parâmetro fez-se através da ferramenta IDW (*Inverse Distance Weighting*), que é o método do Inverso Ponderado da Distância, muito utilizado para espacialização de informações, conforme descreve Tavares *et al* (2008). E para concepção final do mapa de vulnerabilidade, fez-se uso da ferramenta *Raster Calculator* para multiplicação dos mapas.

Romeiro (2012) reúne através de pesquisa, diversas características do método IDW, sendo elas:

- Determinístico e local.
- Interpolador exato (a curva passa em cima dos pontos observados).
- Influência dos pontos mais próximos maior que os pontos mais distantes.
- Cada amostra associa-se um peso com base no inverso da distância do ponto a ser estimado, elevado a uma potência.
- Quanto maior for a potência dos pesos, menor o efeito dos pontos tem na malha ao ser feito a interpolação.
- Tem a tendência de gerar padrões de contornos concêntricos ao redor dos pontos.
- Os padrões de contornos concêntricos ao redor dos pontos podem ser minimizados com parâmetros de suavização, mas perdendo a característica de interpolador exato.
- A influência de cada amostra no valor estimado de um ponto se obtêm através do inverso da distância ao ponto elevado a uma potência arbitrária.
- Quanto maior for a escolha da potência, maior será a influência da amostra mais próxima.
- Em situações de potência nula o ponderador é igual em qualquer amostra solicitada.
- O método mais utilizado é o inverso do quadrado das distâncias, que usa a potência 2.

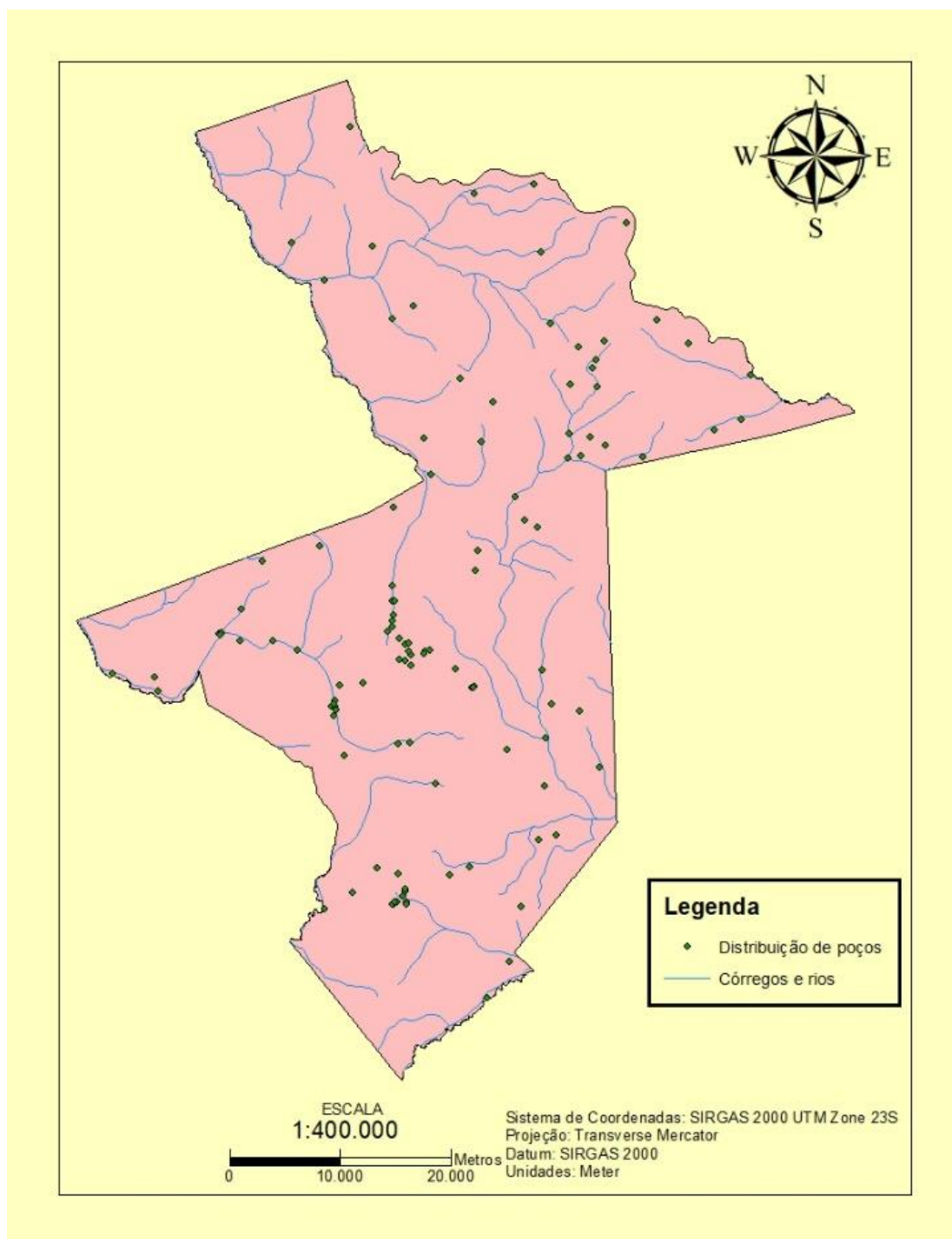
- Os valores interpolados nunca atingem os máximos e nem os mínimos valores da amostra., sendo que nessas situações a interpolação pode mascarar o valor real.
- Para dados aglomerados o método não apresenta boa relação.
- No geral, o método apresenta bons resultados com dados regularmente espaçados.

Os mapas foram confeccionados no sistema de referência SIRGAS 2000 zona 23 S com projeção em UTM do sistema WGS84, em uma escala de referência de 1:400.000, que melhor representa o município.

4.2.1 Obtenção dos dados para aplicação do método

Para aplicação do método GOD foram levantados dados secundários de poços tubulares cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas- SIAGAS da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais- CPRM. Foram analisados individualmente os perfis dos poços através do banco de dados, obtendo-se os índices dos parâmetros G, O e D. Através das análises, obteve-se 113 poços com informações suficientes para aplicação do método. E então, através do *Shapefile* malha do município de Caetité obtida através de dados do IBGE (2010), fez-se os procedimentos que serão discutidos nos itens seguintes para obtenção dos mapas temáticos dos parâmetros G O D e o mapa de vulnerabilidade. A Figura 4.5 mostra a distribuição espacial dos poços localizados nos limites do município.

Figura 4. 5: Distribuição espacial dos poços estudados no município de Caetité



Fonte: Próprio Autor

4.2.2 Procedimento para obtenção do mapa do parâmetro G (grau de confinamento)

Para obtenção do parâmetro G, que corresponde ao grau de confinamento da água subterrânea, fez-se necessário a análise de perfis de cada poço selecionado para o estudo. Foi considerado índice 0,2 para poços com camadas espessas de argila entre as zonas que sobrepõe o aquífero ou abaixo da camada vadosa, que configura como camada confinante. Para as camadas menos espessas de argila abaixo da zona vadosa ou acima do topo do aquífero atribuiu-se índice 0,4 que corresponde a camada semiconfinante. Para poços com camadas de solos espessos, como latossolos amarelo ou argissolos vermelhos que são predominantes no município, e até mesmo associado a pequenas camadas de argilas (em torno de 1 a 2 metros) foi atribuído índice 0,6, que satisfaz a condição de livre coberto. E para as situações em que as camadas de solos foram menos espessas (cerca de 2 metros), onde as camadas abaixo não apresentaram nenhuma característica de confinamento, atribuiu-se índice máximo, ou seja, 1,0 correspondente à aquíferos livres.

Após o preenchimento da tabela de atributos, fez-se a interpolação dos pontos com a ferramenta IDW (*Inverse Distance Weighting*) e obteve-se o mapa do parâmetro G.

4.2.3 Procedimento para obtenção do mapa do parâmetro O (Ocorrência de estratos de cobertura)

Da mesma forma que o parâmetro anterior, a análise dos perfis dos poços subsidiou as atribuições dos índices desse parâmetro. Para atribuição dos índices do parâmetro O, foi levado em consideração a natureza litológica das camadas superiores à zona saturada (CORREIA, 2006). Para isso analisou-se as camadas superiores ao nível estático de cada poço, pois acima do nível estático, situa-se a camada não saturada. E em seguida, atribuiu-se os índices conforme a natureza litológica. Em situações de ocorrência de mais de uma litologia acima do nível estático, considerou-se a com maior espessura.

Para cobertura de solos residuais e argila, atribuiu-se índice 0,4; para cobertura com predominância de silte e xisto atribuiu-se índice 0,5; areia fina, rochas cristalinas, quartzitos, ardósia, granito considerou-se índice 0,6; e para areia conglomeráticas e arenito atribuiu-se índice 0,7 configurando inadequado. Após atribuído os valores à tabela de atributo fez-se a interpolação dos dados, gerando o mapa do parâmetro O.

4.2.4 Procedimento para obtenção do mapa do parâmetro D (Distância do nível estático)

O procedimento para obtenção dos índices desse parâmetro foi executado diretamente na tabela de atributos com os dados já importados para o ambiente SIG. Os poços com níveis estáticos com valores acima de 50 metros de profundidade foram atribuídos índice 0,6; e com valores de profundidade entre 20 a 50 metros foram atribuídos índice 0,7; poços com valores de 5 a 20 metros foram atribuídos índice 0,8; com valores de profundidade abaixo de 5 metros atribuiu-se índice 0,9; e com valores de profundidades igual a zero e que apresentavam informações quanto a surgência foram classificados com índice 1,0. Os poços que apresentaram condições de confinamento, foram considerados a profundidade do nível estático a partir do teto do aquífero.

E, por conseguinte, interpolou-se os resultados com a ferramenta de interpolação IDW do Arcgis, obtendo-se o mapa do parâmetro D.

4.2.5 Procedimento para obtenção do mapa de vulnerabilidade

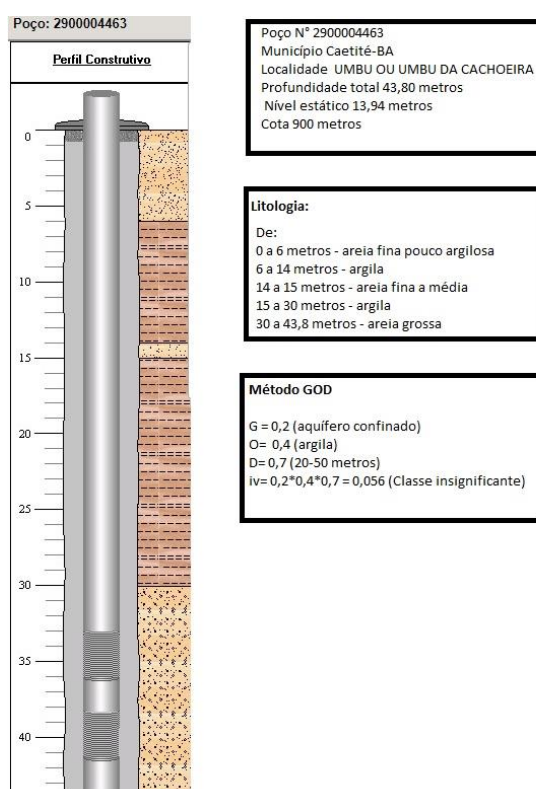
Após a confecção dos mapas de cada parâmetro, utilizou-se a ferramenta *Raster Calculator* para multiplicação dos mapas. Obtendo-se então o mapa de vulnerabilidade para os limites do município de Caetité.

4.2.6 Considerações do método GOD

A Figura 4.6 demonstra a aplicação do método no poço tubular registrado no SIAGAS de nº 2900004463, localizado no município de Caetité. Para atribuição do índice do parâmetro G, considerou-se as camadas de argila como meio confinante por ter a característica de baixa permeabilidade, e uma espessura significativa, uma camada com 8 metros e a outra camada com 15 metros, sendo atribuído o índice 0,2 para o parâmetro G. O método GOD considera a característica litológica e grau de consolidação da camada vadosa ou a camada confinante como perfis a considerar como estratos de cobertura, e para atribuição do índice nesse exemplo, considerou-se a característica litológica apenas da camada confinante, pois a condição de confinamento inibe a passagem da água subterrânea para níveis superiores à argila, o que configura que toda camada acima da zona saturada pode ser considerada estratos de cobertura, atribuindo-se índice 0,4. E para atribuição do índice do parâmetro D, o valor de nível estático de poços confinados necessariamente não configura o verdadeiro nível do aquífero, já que as águas confinadas estão em

pressões diferentes da atmosféricas. Sendo assim, considera-se a profundidade do teto do aquífero confinado como parâmetro D, o que ao invés de considerar o valor do nível estático igual a 13,94 metros, passa-se a considerar o valor de 30 metros, o que corresponde ao índice 0,7. Assim, chega-se ao índice de vulnerabilidade de 0,056 de classe insignificante.

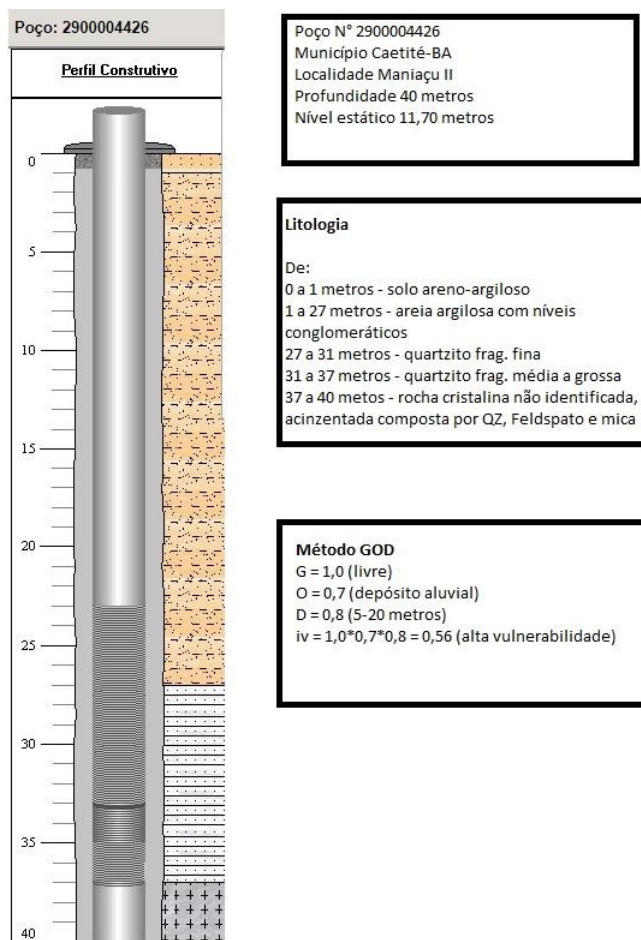
Figura 4. 6: Perfil de poço tubular localizado no município de Caetité, com registro nº 2900004463, apresentando condições de confinamento e índice de vulnerabilidade insignificante



Fonte: SIAGAS (2017)

A Figura 4.7 apresenta uma situação de captação de água em aquífero livre (índice 1,0 ao parâmetro G), pois as camadas superiores ao aquífero não apresentam características de impermeabilização, estando sujeito à pressão atmosféricas. Conforme as informações do SIAGAS, o nível estático do aquífero encontra-se a uma profundidade de 11,70 metros, sendo assim, toda camada acima não se encontra saturada, o que configura os estratos de cobertura com índice 0,7 correspondente à areia com níveis conglomeráticos (depósitos de origem fluvial). Para o nível estático supracitado, considerou-se índice 0,8 ao parâmetro D conforme o método.

Figura 4. 7: Perfil de poço tubular localizado no município de Caetité, com registro n° 2900004426 no SIAGAS, na condição de livre e com índice de vulnerabilidade alta



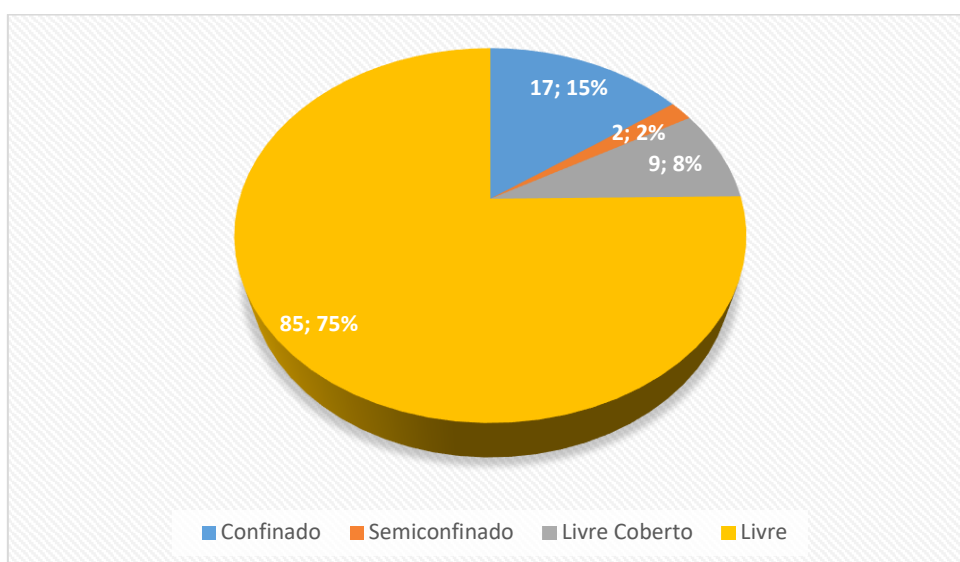
Fonte: SIAGAS (2017)

5. Resultados e Discussões

5.1 Mapeamento do parâmetro G

Conforme os resultados obtidos para o grau de confinamento dos aquíferos, correspondente aos 113 poços estudados, 17 poços (cerca de 15% das amostras) captam água em aquíferos com condições de confinamento, apenas 2 poços (cerca de 2%) apresentaram condições de semiconfinamento, 9 poços (cerca de 8%) em condições de livre coberto e 85 poços (cerca de 75%) apresentaram condições de aquífero livre como mostra o Gráfico 5.1.

Gráfico 5. 1: Quantidade de poços com informações quanto ao grau de confinamento



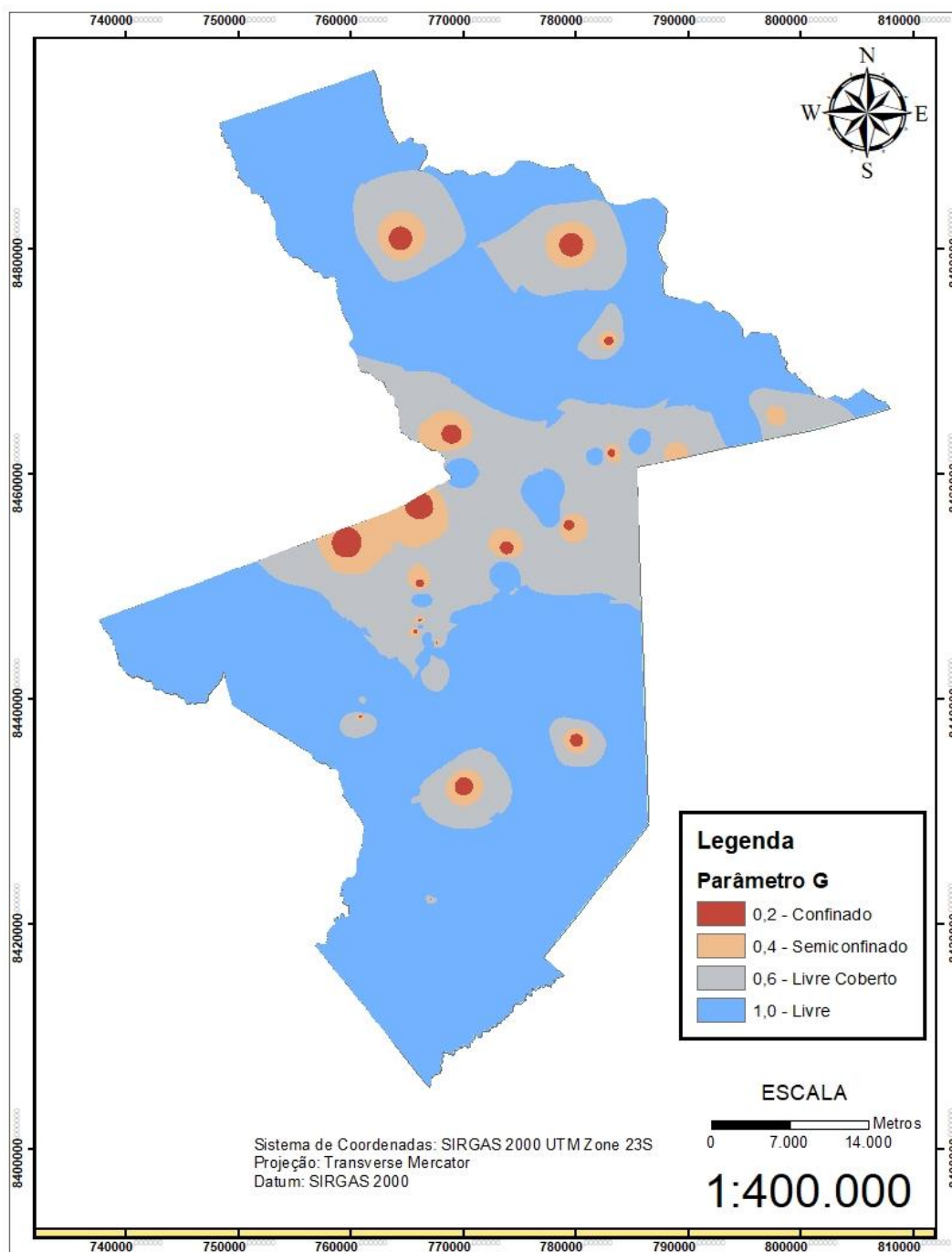
Fonte: Próprio Autor

O fato da existência de aquíferos confinados se deve à presença de camadas espessas de argila, como mostra a Figura 4.6, referente ao poço nº 2900004463, apresentando 8 metros de espessura em uma das camadas e 15 metros em outra.

Os poços que captam água de aquíferos livres corresponde ao maior número em detrimento das características geológicas locais, onde há predominância de aquíferos fissurais, em fraturas ou falhas de rochas ígneas (granito com predominância) e metamórficas (quartzito, xisto, ardósia) com variáveis alterações, cobertas com camadas finas de latossolos amarelos, argilossolos que não oferecem condições de confinamento aos aquíferos (EMBRAPA, 1999; CPRM, sd).

A Figura 5.1 mostra o mapa referente ao grau de confinamento dos aquíferos com base na classificação atribuída pelo método GOD. Conforme a análise geoespacial, a distribuição de aquíferos livres (índice 1,0) dentro da malha do município de Caetité é de aproximadamente 71,5%, seguidos de 19,4 % de aquíferos livres coberto (índice 0,6), 6,7% de aquíferos semiconfinados (índice 0,4) e cerca de 2,4% aquíferos confinados (índice 0,2). As zonas de aquíferos livres não cobertos por ser predominante no município, confere ao método o índice máximo para a avaliação do parâmetro G, o que caracteriza fragilidade em atenuar determinadas cargas de contaminantes (SOARES e MOTA, 2017).

Figura 5. 1: Mapa referente ao grau de confinamento dos aquíferos do município de Caetité



Fonte: Próprio Autor

5.2 Mapeamento do parâmetro O

O município de Caetité apresentou diversidade na composição geológica, assim como mostrado no mapa geológico do município na Figura 4.3, e esse aspecto acontece devido ao acidente geológico que forma a Serra do Espinhaço, cujos limites são adotados como divisões de municípios e bacias. Esta ocorrência de variáveis litologias dá a existência de uma extensa gama de rochas e minerais (BITENCOURT, 2014; BETOLDO, 1993; BORGES 2012, BORGES *et al*, 2015).

O comportamento estratigráfico das camadas litológicas acima da zona de saturação dos aquíferos resultaram-se em índices variando de 0,4 a 0,7, classificadas conforme proposto por Foster *et al* (2002), conforme segue a Tabela 5.1.

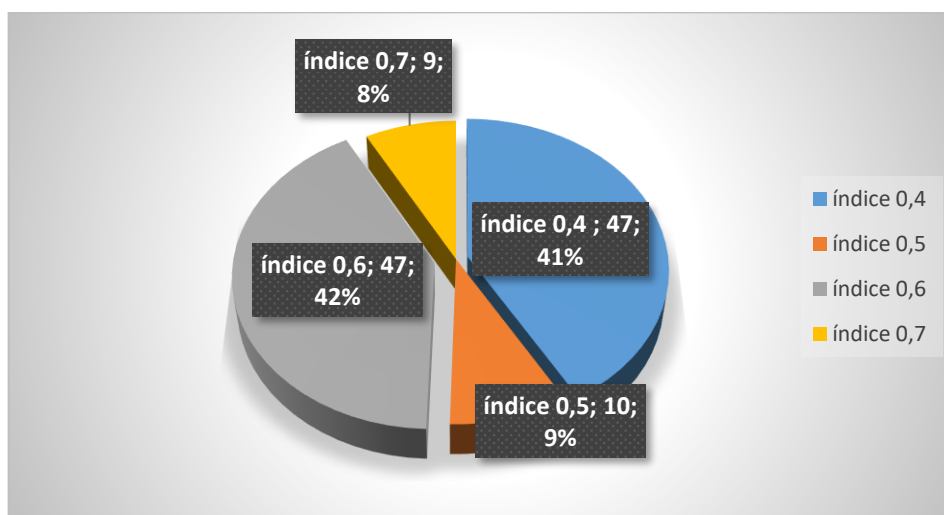
Tabela 5. 1: Classificação das litologias encontradas conforme método GOD de vulnerabilidade

LITOLOGIAS	ÍNDICE ATRIBUÍDO
Argila, solos argilosos, solos resíduas, camadas espessas de solos amarelo a avermelhados	0,4
Silte arenoso, silte preto, Xisto,	0,5
Areia fina, quartzito, granito, siltito, filito, micaxisto, gnaisses, ardósia, rochas cristalinas composta por biotita, quartzo e feldspato	0,6
Areia conglomeráticas, depósitos aluvias, arenito fino, arenito médio, Seixos rolados	0,7

Fonte: Próprio autor

O Gráfico 5.2 apresenta 47 poços com condições de cobertura classificados para uma litologia com índice de 0,4 (cerca de 41,5% do valor amostral); 10 poços com índice 0,5 (correspondente a 9% dos poços); 47 poços com índice 0,6 (cerca de 41,5%) e apenas 9 poços com índice 0,7 (8%).

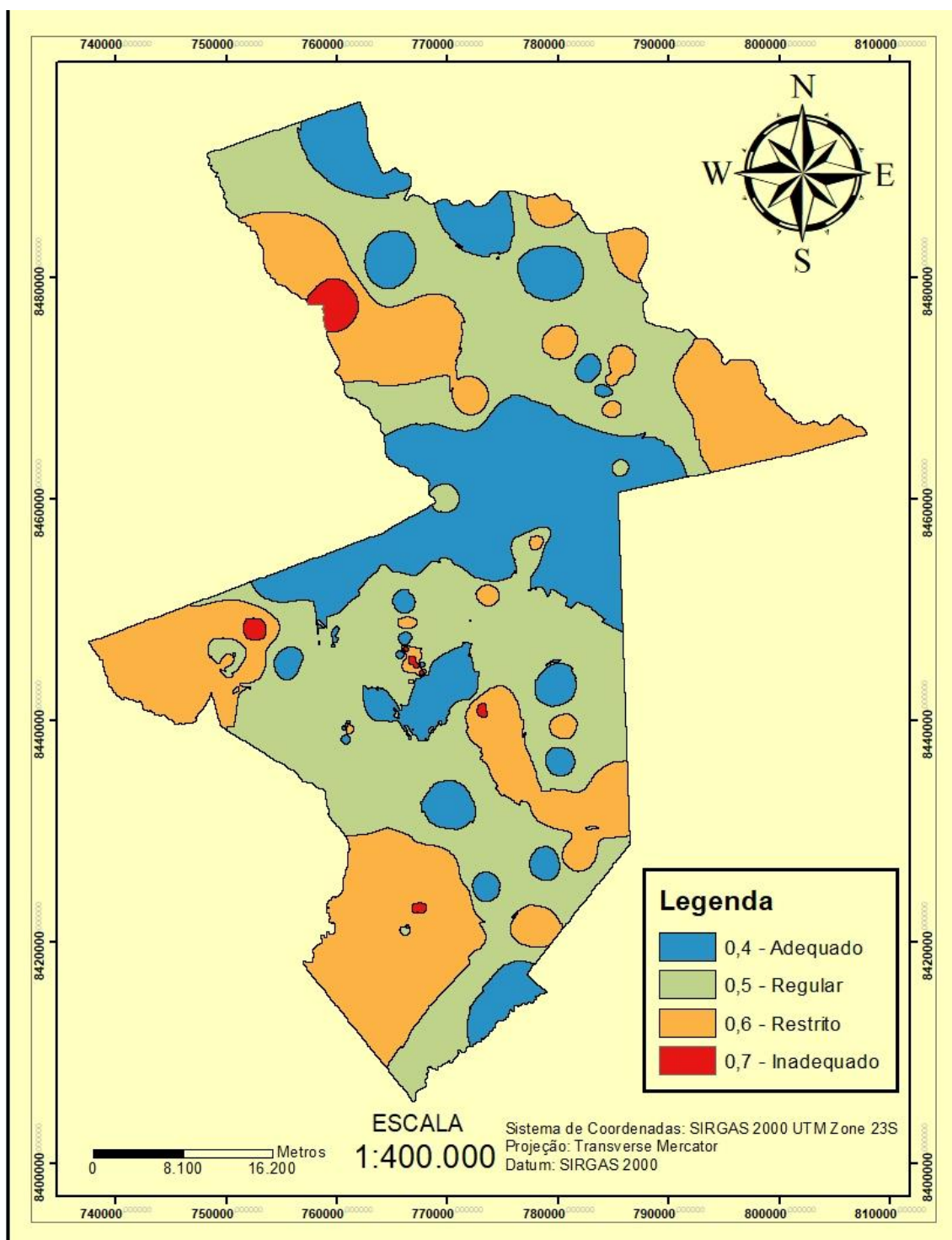
Gráfico 5. 2: Quantidade de poços com informações de índices do parâmetro O



Fonte: Próprio Autor.

Conforme análise geoespacial do mapa obtido do parâmetro O (Figura 5.2), verifica-se a predominância de rochas metamórficas (ardósia, xisto, gnaiss, filito) no município de Caetité, o que conforme a distribuição amostral, o índice 0,5 corresponde a 45,7% do território, e índice 0,6 para de cerca de 29% da área do município, apresentando rochas de origem vulcânicas como granito, quartzito. Em torno de 24,5% da área do município corresponde ao índice 0,4, caracterizado com presença de solos residuais, solos argilosos com espessura significativa, argila. E apenas 0,8% da área de estudo apresenta índice 0,7, correspondente a depósitos aluviais, areia conglomerativas, seixos rolados e arenito.

Figura 5. 2: Mapa referente estratos de cobertura dos aquíferos do município de Caetité

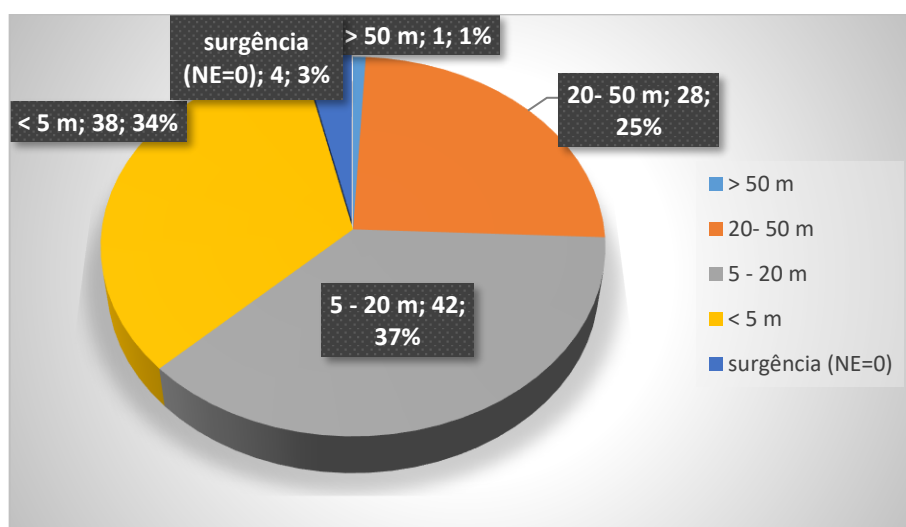


Fonte: Próprio Autor

5.3 Mapeamento do parâmetro D

As análises quantitativas dos pontos de captação estudados no município mostram que 42 poços apresentaram níveis estáticos variando entre 5 e 20 metros, o que confere um índice para o parâmetro D de 0,8 correspondente a 37% do valor amostral; 38 poços com níveis estáticos abaixo de 5 metros, elevando o índice para 0,9 e um percentual de 34% das amostras; 28 poços com níveis estáticos entre 20 e 50 metros, satisfazendo ao índice de 0,7 e percentual de 25%; 4 poços (cerca de 3%) apresentaram níveis estáticos igual a zero e com informações de surgência, o que confere ao método o índice máximo de fragilidade para o parâmetro D (1,0), pois ao considerar presença de contaminante na superfície, tais poços terão maior risco de contaminação; e apenas 1 poço (cerca de 1%) apresentou nível estático com profundidade acima de 50 metros (índice 0,6), conforme pode ser visualizada no Gráfico 5.3.

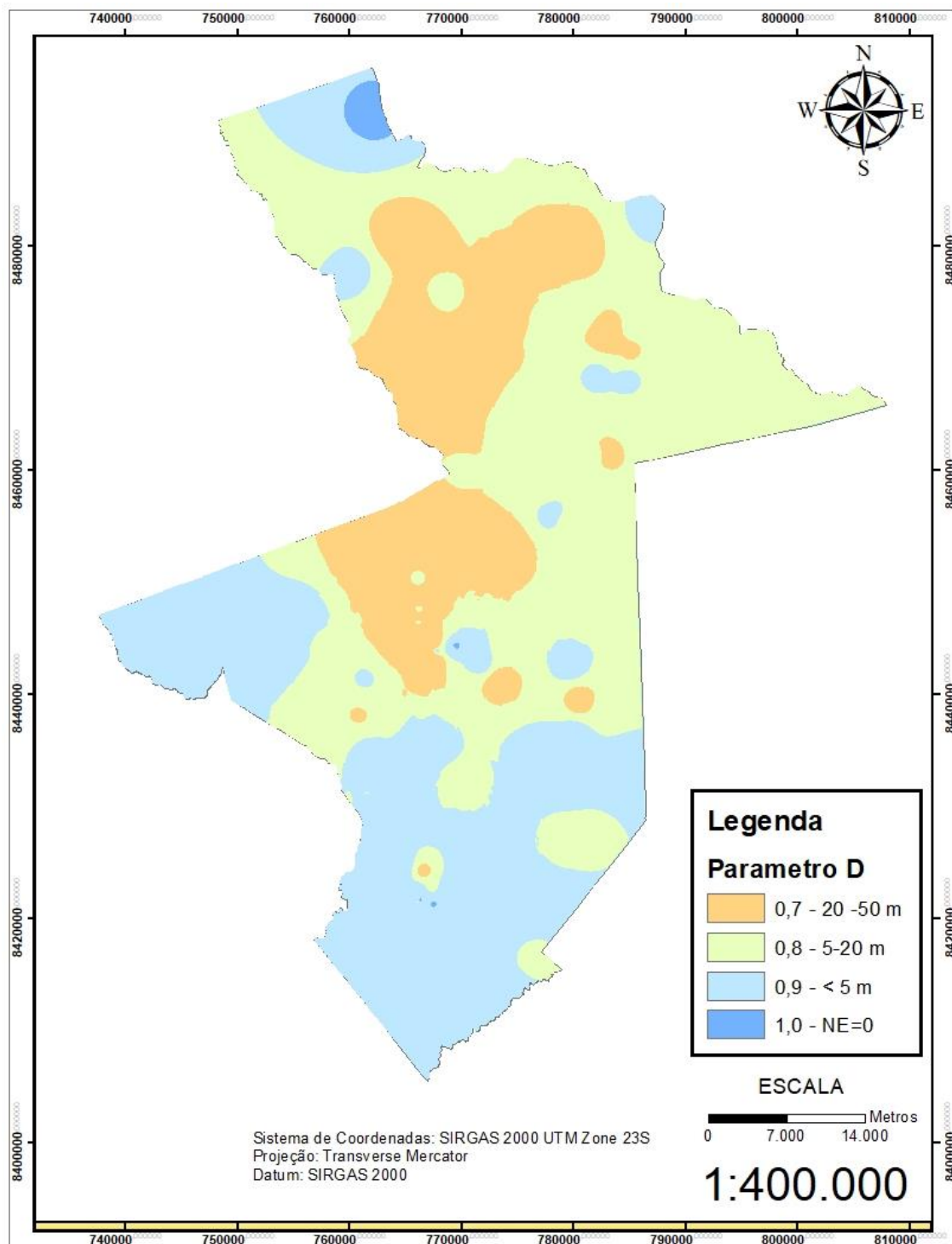
Gráfico 5. 3: Quantidade de poços com informações de índices do parâmetro D



Fonte: Próprio Autor

Conforme análise qualitativa do mapa referente à profundidade do nível estático geoespacializado na área de estudo (Figura 5.3), compreende-se que a maior parte da área apresenta nível estático com profundidade variando entre 5 e 20 metros, seguida de níveis estáticos com profundidade abaixo de 5 metros, representadas de azul claro nas regiões nortes, sul e oeste do município. Os valores de profundidade do nível estático na mesma cota do terreno ou maior que 50 metros correspondem a valores bastantes pequenos.

Figura 5. 3: Mapa referente à profundidade do nível estático dos aquíferos do município de Caetitê

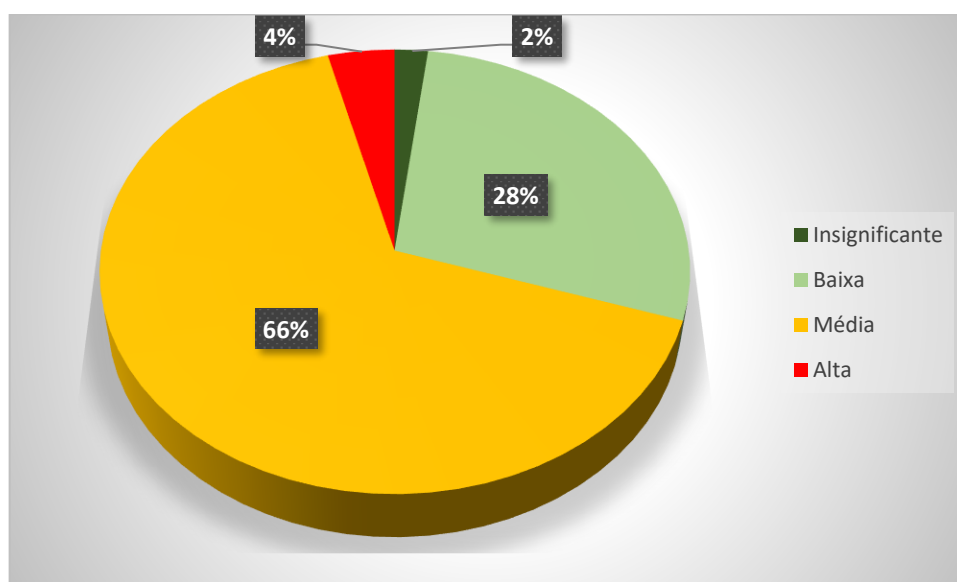


Fonte: Próprio Autor

5.3 Mapeamento da Vulnerabilidade pelo método GOD

Os resultados do estudo de vulnerabilidade obtidos através da multiplicação dos mapas temáticos dos índices G, O e D distribuídos espacialmente na área de estudo, podem ser visualizados na Figura 5.4. Essa combinação de fatores intrínsecos aos aquíferos imprimiram ao município de Caetité uma variação de classes de vulnerabilidade entre níveis insignificante e alto, com aproximadamente 66% da área classificada como vulnerabilidade média, 28% da área com vulnerabilidade baixa, 4% com vulnerabilidade alta e apenas 2% da área com vulnerabilidade insignificante, conforme mostra o Gráfico 5.4.

Gráfico 5. 4: Percentual de áreas com índices de vulnerabilidade



Fonte: Próprio Autor

A vulnerabilidade de classe média (representada de cor amarela na Figura 5.4) apresentou o maior percentual de área no município. O fato se deve a ocorrência de pequenas profundidades dos níveis de águas relacionados aos aquíferos livres dessas regiões, onde apresentou predominância de profundidades entre 5 a 10 metros e valores abaixo de 5 metros respectivamente, o que caracteriza ao parâmetro D índices 0,8 e 0,9, dando às águas subterrâneas uma característica de risco de contaminação quando ocorre presença de cargas contaminantes lançados no solo. A variação da distância até o nível freático dos aquíferos é um fator que tem que ser visto com bastante critério, pois para o método GOD ele é na maioria das vezes determinante da vulnerabilidade dos aquíferos, pois em regiões onde os níveis rasos

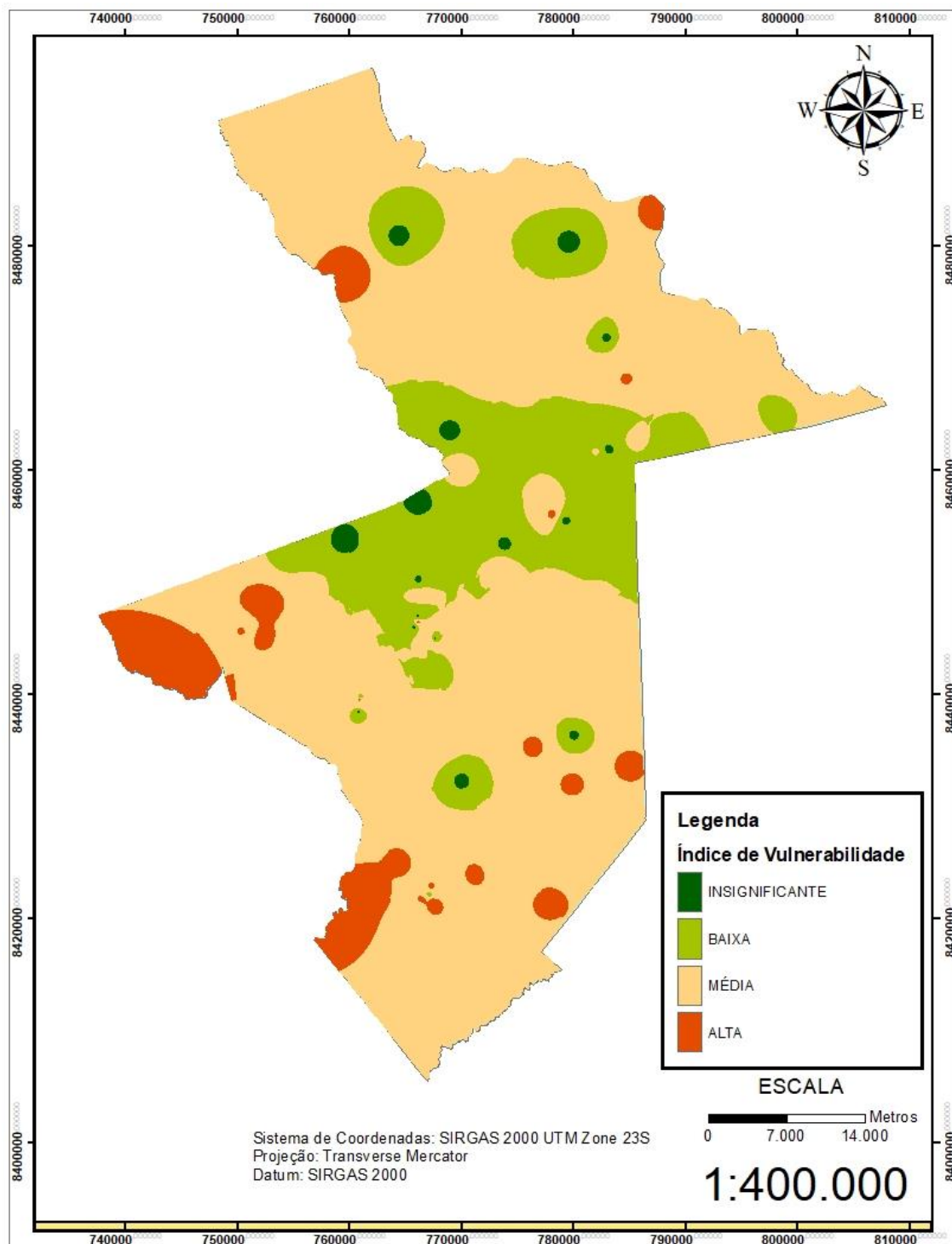
do lençol freático ocorrem, cargas pontuais de contaminantes podem entrar em contato com a água subterrânea com facilidade (FOSTER *et al*, 2006).

As regiões de índice de vulnerabilidade alta (entre 0,5 a 0,63) se deve ao fato de que a água subterrânea se encontra a uma distância inferior a 5 metros (índice D igual a 0,9), combinado com a presença de areia conglomeráticas correspondentes a depósitos fluviais cobertos com neossolos com espessuras inferiores a 0,5 metros (em média), caracterizando ao parâmetro de ocorrência de substratos um índice 0,7.

As regiões centrais do município apresentam em geral, solos com maiores profundidades, correspondentes a latossolos antigos, solos com teores de argila e variáveis camadas de argila, o que justifica a baixa vulnerabilidade, pois além de apresentar níveis de cobertura quanto ao grau de confinamento das águas subterrâneas com índices de vulnerabilidade baixo, oferece aos aquíferos ocorrência de extratos com adequadas características litológicas quanto ao parâmetro O do método aplicado (índice 0,4).

Como o método observa apenas três parâmetros, é preciso considerar que existe algumas limitações, como por exemplo, a variabilidade da altitude no município de Caetité, que pode influenciar na interpolação do parâmetro D; no domínio de aquífero fraturado o comportamento dos níveis estáticos também nem sempre seguem uma relação; excessiva exploração dos aquíferos altera a distância do nível estático (FOSTER *et al*, 2002).

Figura 5. 4: Mapa de índice de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Caetité



Fonte: Próprio Autor

5.4 Análise geral das atividades geradoras de poluição

A Figura 5.5 corresponde a uma análise geral do uso do solo relacionado ao mapa de vulnerabilidade, onde foram associadas informações mineralógicas obtidas do banco de dados da CPRM referente ao estado da Bahia em escala ao milionésimo, juntamente com as informações de rios e córregos das bacias do São Francisco e Atlântico, Trecho Leste obtidas do banco de dados da ANA, além de outras informações coletadas em imagens de satélite, permitiu-se a identificação de atividades com potenciais de contaminação significantes. Vale ressaltar que os aquíferos não confinados ou livres, especialmente onde os níveis de água no solo são de natureza rasas, há uma maior preocupação da contaminação dessas águas (OSORIO, 2004).

5.4.1 Extração de Urânio

A extração de urânio no município de Caetité, situada ao nordeste do município, estão localizadas em uma região de classe de vulnerabilidade média, causando risco de contaminação das águas subterrâneas. Nessa região, muitas comunidades rurais são dependentes das águas subterrâneas para abastecimento das demandas hídricas. Além disso, estudos mostraram concentrações de urânio significativamente superior aos limites estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde – OMS (GREEMPEACE, 2008). E Conforme Lisboa *et al* (2011), após a implantação da mina em abril de 2000, houve extravasamento de uma quantia de 5 milhões de litros de licor de urânio das bacias de sedimentação para o meio ambiente devido à falta de execução da compactação do solo abaixo da manta impermeável. Além desse acidente, outras denúncias foram feitas, tais como:

- Em janeiro e junho de 2004, a bacia de barramento de “finos” transbordou sete vezes, liberando efluentes líquidos de concentração de urânio-238, tório-232 e rádio-226 ao leito do riacho das Vacas;
- Identificação de 236 furos das mandas de impermeabilização
- Em 2006, suspeita de rompimento de manta contendo licor uriníferos;
- Em 2008, denuncia de vazamentos dos tanques de lixiviação;
- Em 2009 denúncia de vazamento de 30 mil litros de licor de urânio, com transbordamento de material radioativo, embora a INB afirma que aconteceu apenas vazamento de solvente orgânico (querosene) e que não atingiu o meio ambiente;

- Em maio de 2010, rompimento de tubulação levando 900 litros de licor de urânio para o solo.

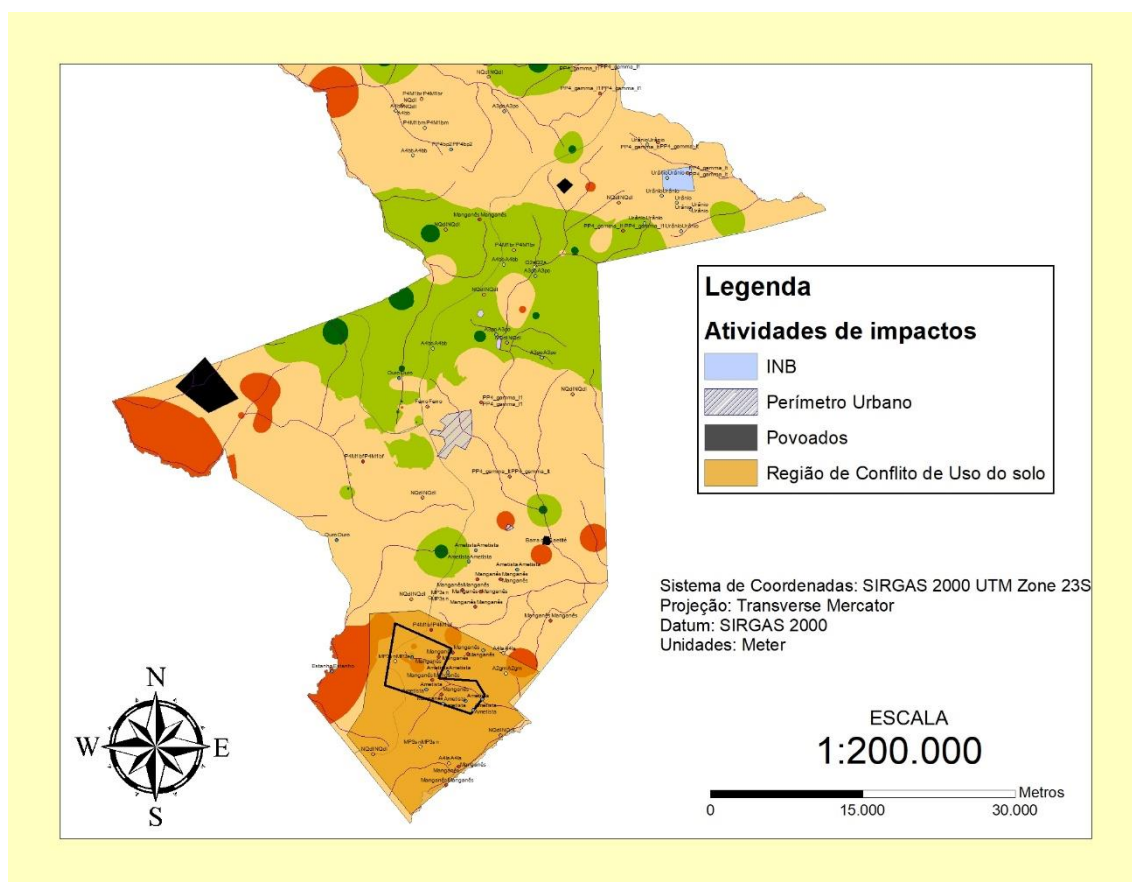
5.4.2 Extração de outros minérios

A região sul do mapa (figura 5.5) evidencia uma localidade de forte influência de minérios. Trata-se do distrito de Brejinho das Ametistas, que é bastante conhecida pela extração da ametista, e que agora, situada na região de interesse do projeto de extração de minério de ferro, o que intensifica os conflitos de uso da água. A área possui um potencial hídrico subterrâneo e muitos poços são construídos para abastecimento das populações rurais, pois o abastecimento público não atende as famílias dessas localidades. E através do mapeamento da vulnerabilidade, é possível identificar que essa região está situada entre classes de vulnerabilidade média e alta, o que na disposição de efluentes de mineração de forma contínua contribui diretamente ou indiretamente para a contaminação das águas subterrâneas dessas comunidades.

5.4.3. Outros tipos de poluições

As atividades agrícolas ocorrem em diversas localidades no município, destacando-se os povoados de Santa Luzia, Barra, Maniaçu e Pajeú do Vento, localizadas em regiões de classe moderada de vulnerabilidade, como mostra a Figura 5.5. Além disso, essas comunidades não dispõem de tratamento dos esgotos de origem doméstica, fazendo uso de fossas negras, o que configura risco a contaminações dos aquíferos. A sede do município também se encontra localizada em área com classe média de vulnerabilidade e os riscos de contaminação das águas subterrâneas pode ocorrer por lançamentos de esgotos industriais.

Figura 5. 5: Mapa referente ao índice de vulnerabilidade e os conflitos e usos da água e solo



Fonte: Próprio Autor

6. Conclusões

De acordo com o que foi proposto neste trabalho, a ampliação do conhecimento das águas subterrâneas do município de Caetité pode ser compreendida considerando as classes de vulnerabilidade, pois a identificação dessas, em especial a classe média que predomina na área estudada, norteia outras pesquisas sobre as águas subterrâneas de Caetité e aponta para a necessidade de tomadas de decisões quanto ao uso de solo, pois foram geradas informações especializadas com sistemas de referências geográficas definidas. O mapa de profundidade do nível estático das águas subterrâneas expressa a necessidade de uma avaliação mais precisa nas condicionantes para liberação de licenciamento ambiental para implantação de empreendimentos com alto grau de impactos das águas subterrâneas do município, como postos de combustíveis, cemitérios, aterro sanitários e indústrias. Vale ressaltar ainda, a importância do trabalho no que se refere à redefinição do plano diretor do município, haja vista que a sede do município está localizada em área de vulnerabilidade média, e que os conflitos de uso da água na região de Brejinho das Ametistas são eminentes, os riscos de contaminação dessas águas são existentes e as classes de vulnerabilidade nessa região variam entre média e alta.

A escala de mapeamento da vulnerabilidade utilizada não se configura a ideal para a caracterização das variações espaciais, o que é sugerido escalas de 1:200.000 e 1:100.000, embora as maiores escalas inviabiliza esse estudo pela relação custo e benefício. Mas as análises gerais com uso das técnicas de geoprocessamento trazem boas respostas quanto ao mapeamento das fontes de poluições relacionados às classes de vulnerabilidade, o que leva a considerar a necessidade de monitoramento contínuo das águas nesses locais.

A existência de avaliação ambiental na área da hidrogeologia no município pode ser utilizada como um forte aliado na obtenção de vantagens financeiras para investimento neste setor, como periodicidade no monitoramento da qualidade das águas das zonas rurais e urbana, implantação de obras de abastecimento de água, saneamento in situ e em obras de captações de águas.

Com o objetivo de aprimorar os estudos, recomenda-se futuras investigações sobre os aspectos hidrogeoquímicos do município para entender as características químicas da água dentro das classes de vulnerabilidade encontradas; estudos físico-

químicos e microbiológicos para inferir a qualidade da água em poços usados para abastecimento de zonas rurais do município; um modelo conceitual do município para entender o comportamento dinâmico dessas águas.

7. Referências bibliográficas

ADAMS, B. e FOSTER, S. S. D. *Land-Surface zoning for Groundwater Protection*. Journal of Institute of Water and Environmental Management 6: 312-320. 1992.

ALBINET. **Les Cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution**. *Bulletin BRGM 2nd series* 3(4): 13–22. Orleans, França, 1970. Disponível em: <<http://infoterre.brgm.fr/rapports/70-SGN-325-HYD.pdf>>. Acesso em: agosto de 2017.

ALLER, L., *et al* **DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings**. U.S Environmental Protection Agency, 622 p., Oklahoma, 1987.

ANA. **Bacias Hidrográficas Brasileiras**. Arquivos Digitais. 2010. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?Tocltem=4100>>. Acesso em agosto de 2017.

ANA. **Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água. Panorama Nacional**. Agência Nacional de Águas. Vol. 1, Brasília, DF. 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%201%20-%20Panorama%20Nacional.pdf>>. Acesso em julho de 2017.

ARCGIS for Desktop, versão 10.3.1. **Programa de Sistema de Informações Geográficas**. ESRI Inc., 2014.

BAHIA, 1998. **Tipologia Climática Köppen**. Disponível em: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Tipos.Clim%C3%A1ticos.do.Estado.da.Bahia.Segundo.a.Escala.K%C3%B6ppen-Geiger.jpg>>. Acesso em setembro de 2017.

BETOLDO. A. L. **Comportamento Estrutural dos Supergrupos São Francisco e Espinhaço e do Embasamento, entre a Serra do Espinhaço Setentrional e as Serras de Monte Alto (BA) e Central (MG)**. Tese de Doutorado Apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 1993.

BÍBLIA SAGRADA. **Livro do Gênesis**. cap. 7 V. 11. Editora Abba Press. São Paulo. Tradução de King James, 2012.

BITTENCOURT, C. N. **Petrologia e análise estrutural multiescalar da Formação Serra da Garapa (Grupo Santo Onofre) na porção sul do cinturão de dobramentos e cavalgamentos espinhaço setentrional. Corredor do Paramirim, Caetité, Bahia**. Trabalho Final de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

BORGES, Jofre de Oliveira et al. **Structural framework of rocks of the Lagoa D'anta mine area, iron-manganese Urandi-Caetité-Licínio de Almeida District, Bahia, Brasil**. Brazilian Journal of Geology, v. 45, n. 2, p. 173-192, 2015.

BORGES J. O. **Geologia e Evolução Metalogética das Formações Manganíferas da Sequência Metavulcanocassedimentar Caetité-Licínio de Almeida: O Exemplo da Mina de Lagoa D'Anta, Caetité, Bahia, Brasil**. 2012, 216p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

BORGES, M. V. **Avaliação da Vulnerabilidade Natural à Contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, Estado do Paraná**. Dissertação de mestrado apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS. 2017.

BORGUETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. da. **Aquífero Guaraní: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004. 214 p.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Comissão de Defesa do Consumidor, Meio Ambiente e Minorias. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21**. p. 282. Brasília: 1995.

BRASIL. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Código das Águas**. Disponível em: < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-24643-10-julho-1934-498122-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em agosto de 2017.

BRASIL, MMA. **Água: Um recurso cada vez mais ameaçado**. p. 3. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/secec_consumo/_arquivos/3%20-%20mcs_agua.pdf>. Acesso em julho de 2017.

BRASIL, MMA. **Águas Subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília, DF, 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf>. Acesso em julho de 2017.

BRASIL. **Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.html>. Acesso em: 11 julho, 2017.

BRASIL, MMA/ MEC/ IDEC. **Consumo Sustentável: Manual de educação**. Brasília: Consumers International, 2005. 160 p.

CARDOSO, L. V. R. Q. **Estudo Comparativo dos Métodos DRASTIC e GOD na Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição da Bacia Hidrográfica do Rio Cabril- Vila Real**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Trás-os Montes e Alto Douro. Vila Real-Portugal, 2010.

CASTRO, D. **Tratamento jurídico internacional da água e desenvolvimento sustentável**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CAVALCANTI, M. A. M. P. **Impacto dos Sistemas de Saneamento in situ nas Águas Subterrâneas no Bairro de Paratinga- Município de Niterói (RJ)**. 1996. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Doi: 10.11606/D.44.1996.tde-05102015-132620. Acesso em setembro de 2017.

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Tampa, FL. Outubro de 2007.

CORREIA, E. R. C. **Caracterização da vulnerabilidade natural do aquífero Boa Viagem no Município do Recife-Método GOD**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Geociências. Recife-PE. 2006.

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. **Sistema de Informações sobre Águas Subterrâneas**. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em setembro de 2017.

CHRISPIM, Z. M. P. **Análise da Vulnerabilidade e Caracterização Hidrogeoquímica dos Aquíferos Livres Rasos da Parte Emersa da Bacia Sedimentar de Campos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2016. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenhariacivil/wpcontent/uploads/sites/3/2016/12/Teses-de-Doutorado-2016-Z%C3%A9lia-Maria-Peixoto-Chrispim.pdf>>. Acesso em setembro de 2017.

CUNHA, L. V. **Perspectivas da Gestão da Água para o Século XXI: Desafios e Oportunidades**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 7(4): 65-73. Porto Alegre: ABRH, 2002.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

MANOEL FILHO, J. “Água Subterrânea: Histórico e Importância”. In: FEITOSA, A. C. F.; MANOEL FILHO, J. (Org.). **Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações**. Serviço Geológico do Brasil, Editora Gráfica LCR, 2ª edição. Fortaleza: 1997.

MANOEL FILHO, J. “Ocorrência das Águas Subterrâneas”. In: FEITOSA, A. C. F.; MANOEL FILHO, J. (Org.). **Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações**. Serviço Geológico do Brasil, Editora Gráfica LCR, 2ª edição. Fortaleza: 1997.

FERNANDES, L. F. S.; CARDOSO, L. V. R. Q.; PACHECO, F. A. L.; LEITÃO, S. Moura. J. P. **DRASTIC and GOD Vulnerability Maps of the Cabril River Basin, Portugal**. 2014. REM: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 67, n. 2, p.133-142, junho de 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S037044672014000200002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em setembro de 2017.

FOSTER, S. S. D. ***Fundamental concepts in aquifer vulnerability Pollution Risk and Protection Strategy***. Proceedings of International Conference: Vulnerability of soil and Groundwater to pollutants. Noordwijk, Países Baixos. 1987.

FOSTER, S. S. D; 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***. Groundwater Management Advisory Team em parceria com a Global Water Partnership. Edição Brasileira Sevmar – Serviços Técnicos Ambientais LTDA, 2002.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H.. ***The Guarani Aquifer Initiative – Towards Realistic Groundwater Management in a Transboundary Context***. Case Profile number 9. In. Sustainable Groundwater Management: Lessons from Practice. GW-MATE, The World Bank, Water Partnership Program. 2009.

FUNASA. ***Manual de Projeto e Construção de Poços Tubulares Profundos***. 2015.

GHAZAVI, R.; EBRAHIMI, Z. ***Assessing Groundwater vulnerability to contamination in an Arid Environment Using DRASTIC and GOD Models***. Int. J. Environ. Sci. Technol. (2015). 12:2909-2918. Doi 10.1007/s13762-015-0813-2. Kashan, Iran. 2015.

GREEMPEACE. ***Ciclo do Perigo***. Impactos da Produção de Combustível Nuclear do Brasil. 2008.

HAGER, F.P.E; D'ALMEIDA, M.L. ***Legislação Aplicada às Águas Subterrâneas***. In: Anais... XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS. Natal – RN, 2008.

IBGE - EMBRAPA – ***Mapa de Solos do Brasil***. Rio de Janeiro: IBGE, 2001 – Escala 1:5.000.000.

IBGE. ***Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: síntese de indicadores 2015***. Coordenação de Trabalho e Rendimento. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

INMET – **INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: setembro de 2017.

KHEMIRI, S.; KHNISSI, A.; ALAYA, M. B.; SAIDI, S. ZARGOUNI, F. **Using GIS for the Comparison of Intrinsic Parametric Methods Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in Scenarios of Semi Arid Climate. The Case of Foussana Groundwater in the Central of Tunisia**. Journal of Water Resource and protection, 2013, 5, 835-845. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.58084>>. Acesso em: setembro de 2017.

LISBOA, M. V.; ZAGALLO, J. G. C.; MELLO, C. C. A. **Relatório da Missão Caetité: Violações de Direitos Humanos no Ciclo Nuclear. Curitiba, Paraná. 2011.**

MEERKHAN, H.; TEIXEIRA, J.; MARQUES, J. E.; AFONSO, M. J. CHAMINÉ, H. I. **Delineating Groundwater Vulnerability and Protection Zone Mapping in Fractured Rock Masses: Focus on the DISCO Index**. Basileia, Suíça. 2016. Water – Open Access Journal (ISSN 2073-4441). DOI: 10.3390/w8100462. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/86666>>. Acesso em setembro de 2017.

MENESES, L. F. **Avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município de João Pessoa- PB, através do modelo DRASTIC**. Dissertação de mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana pela Universidade Federal da Paraíba.

MENESES, L. F.; SILVA, T. C.; GADÊLHA, C. L. M.; FIGUEIREDO, E. C. **Elaboração de Mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos Superiores no Município de João Pessoa – PB, Através de Técnicas de Geoprocessamento**. Revista Tecnológica, Fortaleza, v.30, n.1, p. 123-132, jun. 2009.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Sistema de Informações sobre Saneamento**, 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br>>. Acesso em setembro de 2017.

MOURA, P. ***Vulnerabilidade de Aquíferos: Uso dos métodos DRASTIC e GOD na Porção Norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará.*** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências, Departamento de Geologia. Fortaleza, Ceará. 2014.

NASCIMENTO, S. A. M.; BARBOSA, J. S. F.; CRUZ, M. G. M. ***A Vulnerabilidade do Aquífero Freático do Alto Cristalino de Salvador, Bahia.*** Revista de Geologia, Vol. 22, nº 1, 75-85. Ceará. 2009

NRC – National Research Council. ***Goundwater Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potencial Under Conditions of Uncertainty.*** Washington: National Academy Press. 1993.

OSÓRIO, Q. S. ***Vulnerabilidade Natural de Aquíferos e Potencial de Poluição das Águas Subterrâneas.*** Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geomática, Área de Concentração em Tecnologia da Geoinformação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria – RS, 2004. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9491/QUELEN%20OSORIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em setembro de 2017.

OTÁLVARO, M. V. V.; ***Hidráulica de Aguas Subterrâneas.*** 2ª edición. Universidad Nacional de Colômbia. Sede Medellín, 1999.

REBOUÇAS, A.C. ***Desenvolvimento das águas subterrâneas no Brasil.*** In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS. São Paulo, 1998.

RIBEIRO, M. L.; LOURECETTI, C.; PEREIRA, S. Y.; DE MARCHI, M. R. R. ***Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar.*** Química Nova, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 688-694, junho de 2007. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000300031&lng=en&nrm=iso>. Acessado em agosto de 2017.

ROMEIRO, C. I. R. ***A Tecnologia SIG Aplicada ao Estudo da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Oeste.***

Trabalho de Projecto apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica. Disponível em: <<https://run.unl.pt/bitstream/10362/10537/1/TSIG0090.pdf>>. Acesso em setembro de 2017.

SANTANA, E. N. S., ***A água como bem ambiental dotado de valor econômico: análise a luz da Lei 9.433/97.*** 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Direito) - Universidade Federal de Rondônia, Cacoal, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/1517>>. Acesso em 11 de julho de 2017.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. ***As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo.*** Secretaria de Estado do Meio Ambiente- SMA. 104p. 2ª edição. ISBN 978.85.86824.56.8. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/cart_AG_SB.pdf>. Acesso em setembro de 2017.

SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, M. R. ***Diagnóstico Socioambiental Participativo do Município de Caetité-BA.*** Sd. Disponível em: <<http://www2.uefs.br/geotropicos/DIAGNOSTICO%20SOCIOAMBIENTAL%20PARTICIPATIVO.pdf>>. Acesso em setembro de 2017.

SILVA, L. S. ***Avaliação da Radioatividade Natural em Águas Potáveis, de Superfície e Subterrânea da Região de Caetité, BA.*** Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Autarquia Associada à Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 2011.

SILVA, M. O. ***Água subterrânea: Reservatório para um planeta com sede?*** Departamento de Geologia da FCUL, CeGUL, CREMINER LA/ISR. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Cidade Universitária. p. 1-2, 2008. Portugal.

SILVA, W. F. ***Análise da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Contaminação na Região Metropolitana de Maceió.*** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, 2013.

SIMÕES FILHO, F. L.; FERNANDES, H. M.; SANTOS, R. R.; SILVA, L. F.; ARAVENA, R.; GODOY, M. L.; PEREIRA FILHO, H. A. “**Caracterização Hidrogeoquímica, Avaliação da Qualidade e da Recarga em Aquíferos do Semi-Arido Associado à Mineração de Urânio (Caetité, BA)**” In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS. Curitiba, PR. 2006.

SIMÕES FILHO, F. L.; SILVA, L. F.; SANTOS, R. R.; MARQUES JR, A. “**Avaliação da Contaminação da Aquíferos Fissurais através de Modelagem Geoquímica e Levantamento Estrutural em Área de Mineração de Urânio no Semi-Árido da Bahia**” In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS. NATAL, RS. 2008.

SOARES, M. U. G.; MOTA, A. A. **Mapeamento do Risco à Contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no Município de Chapecó (SC)**. Chapecó. SC, Brasil. 2017. Revista Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28864>>. Acesso em setembro de 2017.

SOUZA, L. C.; **A Efetividade da Proteção das Águas Subterrâneas no Brasil**. 8º Congresso Brasileiro do Magistério Superior dos Professores de Direito Ambiental do Brasil- APRODAB. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.nima.pucRio.br/aprodab/artigos/a_efetividade_da_protecao_das_aguas_subterraneas_luciana_cordeiro.pdf>. Acesso em julho de 2017.

TEIXEIRA, P.; GONÇALVES, E. **As Águas Subterrâneas**. Edição Escritos|Ed. Autor. 2014. ISBN: 9789892049892.

TAVARES, P. R. L.; SILVEIRA, J. G. P.; DA COSTA, C. T. F.; DE CASTRO, M. A. H. **Mapeamento da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero Rio da Batateira, Utilizando o Método GOD, Crato-CE**. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal-RN. 2008. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/23758/15825>>. Acesso em setembro de 2017.

TODD, D. K; MAYS, L. W. **Groundwater Hydrology**. 3ª edição. Editora John Wiley & Sons, California – EUA, 2005.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas Sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016- Água e Emprego- Fatos e números**. Perugia/Itália: Unesco no Brasil (em Brasília) / Agência Nacional das Águas (ANA) do Brasil. P. 2, 3, 4. 2016a.

VAN STEMPVROOT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. AVI: **a Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada**. PPWD pilot project. National Hydrology Research Institute, 1992.

VILLAR, P. C. **Gestão das Águas Subterrâneas e o Aquífero Guarani: Desafios e Avanços**. V Encontro Nacional da Anppas. Florianópolis-SC-Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.anppas.org.br/encontro5/cd/artigos/GT9-461-411-20100902155823.pdf>. Acesso em agosto de 2017.

VRBA, J. e ZAPAROZEC, A. **Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability**. International Association of Hydrogeologists-International Contributions to Hydrogeology 16. 1994.

ZOBY, J. L. G. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Revista Águas Subterrâneas, Natal, Supl. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

8. Anexos

8.1 Dados dos poços obtidos no SIAGAS

Tabela 8. 1: Informações dos poços cadastrados

Ponto	Latitude Decimal	Longitude Decimal	Bacia	Subbacia	Nível Estático
2900000430	-14,06	-42,508611	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	2,2
2900000449	-14,062777	-42,52	Rio São Francisco	Carinhanha	0,96
2900000458	-14,1675	-42,498611	Rio São Francisco	Carinhanha	0,36
2900000555	-14,073333	-42,482777	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	0,5
2900001010	-14,058888	-42,504444	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	0
2900001151	-14,061388	-42,508888	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	0,87
2900001648	-13,840277	-42,389166	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	4,35
2900004426	-13,826944	-42,370833	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	11,7
2900004430	-13,887777	-42,463055	Rio São Francisco	Grande e outros	7,2
2900004433	-13,7775	-42,520833	Rio São Francisco	Grande e outros	11,3
2900004436	-14,152777	-42,361388	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	1,34
2900004440	-13,788888	-42,538888	Rio São Francisco	Grande e outros	20,48
2900004445	-13,867777	-42,246388	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	5,5
2900004454	-13,855833	-42,453888	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	7,54
2900004455	-13,729444	-42,555277	Rio São Francisco	Grande e outros	21,8
2900004456	-14,006111	-42,536111	Rio São Francisco	Grande e outros	19,4
2900004458	-14,0525	-42,635	Rio São Francisco	Carinhanha	3,4
2900004462	-14,236388	-42,546666	Rio São Francisco	Carinhanha	1,04
2900004463	-13,977222	-42,465277	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	13,94
2900004464	-13,899167	-42,380278	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	11,5
2900004467	-14,168611	-42,407222	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	4,35
2900004469	-14,311666	-42,435	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	5,27
2900004470	-14,212222	-42,411944	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	11
2900004471	-13,886111	-42,510833	Rio São Francisco	Grande e outros	8,7
2900004472	-13,820555	-42,3675	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	29,1
2900006885	-14,266666	-42,532222	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	3,8
2900013075	-14,106944	-42,378611	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	7,2

Fonte: SIAGAS (2017)

Tabela 8. 2: informações dos poços cadastrados

Ponto	Latitude Decimal	Longitude Decimal	Bacia	Subbacia	Nível Estático
2900013077	-13,631944	-42,575555	Rio São Francisco	Grande e outros	0
2900013078	-13,786944	-42,317778	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	6,18
2900013079	-14,087777	-42,579444	Rio São Francisco	Carinhanha	2,77
2900013080	-13,952222	-42,426111	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	3,76
2900013081	-14,026666	-42,662222	Rio São Francisco	Carinhanha	2,3
2900013082	-13,686111	-42,471388	Rio São Francisco	Grande e outros	9,6
2900013083	-14,094722	-42,731111	Rio São Francisco	Carinhanha	4,39
2900014461	-14,208611	-42,396666	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	14,72
2900014474	-14,266944	-42,425555	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	0,4
2900014475	-14,073888	-42,410277	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	2,83
2900014476	-13,974722	-42,5975	Rio São Francisco	Carinhanha	15,5
2900014484	-13,987222	-42,645	Rio São Francisco	Carinhanha	9,6
2900014485	-13,956944	-42,415278	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	19,1
2900014486	-13,7325	-42,414722	Rio São Francisco	Grande e outros	13,7
2900014490	-14,259166	-42,524166	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	2,9
2900014491	-13,915	-42,505	Rio São Francisco	Grande e outros	14,52
2900022076	-13,7275	-42,623611	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	11,73
2900022077	-13,901111	-42,390278	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	13,35
2900022078	-13,804722	-42,361111	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	10,6
2900022079	-13,806111	-42,290833	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	5,41

Fonte: SIAGAS (2017)

8. 3: Informações dos poços cadastrados

Ponto	Latitude Decimal	Longitude Decimal	Bacia	Subbacia	Nível Estático
2900022080	-13,757222	-42,595556	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	4,03
2900022081	-14,235278	-42,469444	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	1,94
2900022082	-14,080556	-42,769444	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	4,08
2900022083	-13,890278	-42,359444	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	9,82
2900022084	-14,0675	-42,524444	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	34,67
2900022085	-14,035	-42,536111	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	14,36
2900022086	-13,883611	-42,372222	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	5,66
2900022335	-14,264167	-42,531389	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	0
2900022337	-13,836667	-42,480833	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	22
2900022339	-14,053611	-42,525278	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	25,85
2900022340	-14,04	-42,535833	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	8,04
2900022341	-14,105	-42,585833	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	9
2900022342	-14,0825	-42,734167	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	1,48
2900022343	-14,059444	-42,521667	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	31,74
2900022344	-14,048889	-42,53	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	20,19
2900022345	-14,043889	-42,539167	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	9,96
2900023369	-14,047222	-42,680278	Rio São Francisco	Rios São Francisco e Carinhanha	1,45
2900023371	-14,03	-42,535278	Rio São Francisco	Rios São Francisco e Carinhanha	14,19
2900023373	-14,255556	-42,522778	Rio São Francisco	Rios São Francisco e Carinhanha	15,78
2900023375	-14,341667	-42,453333	Rio São Francisco	Rios São Francisco e Carinhanha	1,56
2900023378	-14,046389	-42,678889	Rio São Francisco	Rios São Francisco e Carinhanha	3,1
2900023379	-14,0475	-42,68	Rio São Francisco	Rios São Francisco e Carinhanha	2,41
2900023394	-14,053056	-42,522222	Atlântico Sul-Leste	Rios Vaza-Barris, Itapicuru e outros	43,91
2900024305	-14,067222	-42,524444	Rio São Francisco	Rios São Francisco, Grande e outros	41,19
2900024408	-14,241111	-42,528889	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	43,84

Fonte: SIAGAS (2017)

Tabela 8. 4: Informações dos poços cadastrados

Ponto	Latitude Decimal	Longitude Decimal	Bacia	Subbacia	Nível Estático
2900024409	- 14,253333	-42,522778	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	15,04
2900024410	- 14,066667	-42,529444	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	57,1
2900024413	- 14,264722	-42,529444	Rio São Francisco	Grande e outros	1,55
2900024418	- 14,088056	-42,467222	Rio São Francisco	Grande e outros	20,19
2900024420	- 14,088611	-42,469167	Rio São Francisco	Grande e outros	35,45
2900024432	- 14,139167	-42,439167	Rio São Francisco	Carinhanha	2,31
2900024505	-13,9425	-42,536111	Rio São Francisco	Grande e outros	0,73
2900024683	- 13,809444	-42,382778	Rio São Francisco	Carinhanha	14,18
2900024691	- 14,129722	-42,406111	Rio São Francisco	Carinhanha	2,03
2900024830	- 13,880556	-42,390278	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	12,78
2900024946	- 14,135556	-42,529444	Rio São Francisco	Carinhanha	2,47
2900024955	- 14,070833	-42,519722	Rio São Francisco	Carinhanha	20,57
2900024978	- 14,265833	-42,533333	Rio São Francisco	Carinhanha	12,9
2900025060	- 14,133889	-42,519722	Rio São Francisco	Grande e outros	1,5
2900025912	- 13,937222	-42,473333	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	2,21
2900026232	- 14,266389	-42,521111	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	2,1

Fonte: SIAGAS (2017)

Tabela 8. 5: Informações dos poços cadastrados

Ponto	Latitude Decimal	Longitude Decimal	Bacia	Subbacia	Nível Estático
2900026234	-14,052222	-42,6625	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	2,92
2900027036	-14,145	-42,574444	Rio São Francisco	Carinhanha	3,06
2900027038	-14,256944	-42,566944	Rio São Francisco	Grande e outros	4,39
2900027039	-14,271111	-42,590556	Rio São Francisco	Carinhanha	0,47
2900027041	-13,708056	-42,344167	Rio São Francisco	Carinhanha	18,08
2900027042	-14,088611	-42,467222	Rio São Francisco	Carinhanha	12,63
2900027043	-14,06	-42,615278	Rio São Francisco	Rios São Francisco e Carinhanha	9,29
2900027044	-13,791111	-42,406389	Rio São Francisco	Carinhanha	18,67
2900027775	-13,6775	-42,421111			9,35
2900027778	-13,9325	-42,434167	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	24,38
2900027781	-13,993056	-42,466944			12,27
2900027784	-13,898889	-42,328056	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	6,9
2900027785	-13,876667	-42,268333	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	7,6
2900027786	-14,085833	-42,559444	Rio São Francisco	Carinhanha	10,05
2900027787	-14,100833	-42,582778	Rio São Francisco	Carinhanha	10,9
2900027788	-14,105278	-42,582778	Rio São Francisco	Carinhanha	17,6
2900027789	-14,108056	-42,5825	Rio São Francisco	Carinhanha	10,56
2900027790	-14,103056	-42,583611	Rio São Francisco	Carinhanha	9,4
2900027791	-14,1125	-42,583889			1
2900028977	-14,242222	-42,485278	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	3,63
2900029030	-13,841944	-42,366389	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	38,21
2900029342	-14,101667	-42,401944	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	26,45
2900029343	-14,019167	-42,535556	Rio São Francisco	Grande e outros	8,21
2900029344	-13,831389	-42,238889	Atlântico Sul-Leste	Rio de Contas	26,99

Fonte: SIAGAS (2017)

8.2 Resultados do método GOD para os poços estudados

Tabela 8. 6: Resultados dos parâmetros e índices de vulnerabilidade (iv)

Ponto	G	O	D	IV
2900000430	1	0,4	0,9	0,36
2900000449	1	0,4	0,9	0,36
2900000458	0,2	0,4	0,8	0,064
2900000555	1	0,4	0,9	0,36
2900001151	1	0,4	0,9	0,36
2900001648	1	0,5	0,9	0,45
2900004426	1	0,4	0,8	0,32
2900004430	0,6	0,4	0,8	0,192
2900004433	1	0,6	0,8	0,48
2900004436	1	0,6	0,9	0,54
2900004440	1	0,6	0,7	0,42
2900004445	0,4	0,6	0,8	0,192
2900004454	1	0,4	0,8	0,32
2900004455	0,2	0,4	0,7	0,056
2900004456	0,2	0,4	0,8	0,064
2900004458	1	0,4	0,9	0,36
2900004462	1	0,6	0,9	0,54
2900004463	0,2	0,4	0,7	0,056
2900004464	0,2	0,4	0,7	0,056
2900004467	1	0,6	0,9	0,54
2900004469	1	0,4	0,8	0,32
2900004470	1	0,4	0,8	0,32
2900004471	0,2	0,4	0,7	0,056
2900004472	1	0,6	0,7	0,42
2900006885	1	0,4	0,9	0,36
2900013075	1	0,5	0,8	0,4
2900013078	1	0,5	0,8	0,4
2900013079	1	0,5	0,9	0,45
2900013080	1	0,6	0,9	0,54
2900013081	1	0,7	0,9	0,63
2900013082	1	0,4	0,8	0,32
2900013083	1	0,6	0,9	0,54
2900014461	1	0,6	0,8	0,48
2900014474	1	0,6	0,9	0,54
2900014475	1	0,4	0,9	0,36
2900014476	0,2	0,4	0,7	0,056
2900014484	0,6	0,4	0,8	0,192
2900014485	0,2	0,4	0,8	0,064

Fonte: Próprio Autor

Tabela 8. 7: Resultados dos parâmetros e índices de vulnerabilidade (iv)

Ponto	G	O	D	IV
2900014486	0,2	0,4	0,7	0,056
2900014490	0,2	0,6	0,9	0,108
2900014491	1	0,5	0,8	0,4
2900022076	1	0,6	0,8	0,48
2900022077	1	0,4	0,8	0,32
2900022078	1	0,6	0,8	0,48
2900022079	1	0,6	0,8	0,48
2900022080	1	0,7	0,9	0,63
2900022081	1	0,4	0,9	0,36
2900022082	1	0,6	0,9	0,54
2900022083	1	0,5	0,8	0,4
2900022084	0,6	0,4	0,7	0,168
2900022085	0,2	0,4	0,7	0,056
2900022086	0,6	0,4	0,8	0,192
2900022337	1	0,6	0,7	0,42
2900022339	1	0,7	0,7	0,49
2900022340	1	0,7	0,8	0,56
2900022341	1	0,4	0,8	0,32
2900022342	1	0,6	0,9	0,54
2900022343	1	0,7	0,7	0,49
2900022344	1	0,7	0,7	0,49
2900022345	0,2	0,4	0,7	0,056
2900023369	1	0,6	0,9	0,54
2900023371	0,6	0,4	0,8	0,192
2900023373	1	0,6	0,8	0,48
2900023375	1	0,4	0,9	0,36
2900023378	1	0,4	0,9	0,36
2900023379	1	0,6	0,9	0,54
2900023394	0,2	0,4	0,7	0,056
2900024305	0,6	0,4	0,7	0,168
2900024408	1	0,6	0,7	0,42
2900024409	1	0,7	0,8	0,56
2900024410	1	0,6	0,6	0,36
2900024413	1	0,6	0,9	0,54
2900024418	1	0,6	0,7	0,42
2900024420	1	0,7	0,7	0,49
2900024432	1	0,6	0,9	0,54
2900024505	0,2	0,4	0,7	0,056
2900024683	0,2	0,4	0,7	0,056
2900024691	0,2	0,4	0,9	0,072
2900024830	0,6	0,4	0,8	0,192
2900024946	1	0,5	0,9	0,45
2900024955	0,6	0,4	0,7	0,168
2900024978	1	0,6	0,8	0,48
2900025060	1	0,5	0,9	0,45
2900025912	1	0,6	0,9	0,54

Fonte: Próprio Autor

Tabela 8. 8: Resultados dos parâmetros e índices de vulnerabilidade (iv)

Ponto	G	O	D	IV
2900026232	1	0,6	0,9	0,54
2900026234	1	0,5	0,9	0,45
2900027036	1	0,6	0,9	0,54
2900027038	1	0,6	0,9	0,54
2900027039	1	0,6	0,9	0,54
2900027041	1	0,6	0,8	0,48
2900027042	1	0,5	0,8	0,4
2900027043	1	0,6	0,8	0,48
2900027044	1	0,6	0,8	0,48
2900027775	1	0,4	0,8	0,32
2900027778	1	0,6	0,7	0,42
2900027781	0,4	0,4	0,8	0,128
2900027784	1	0,6	0,8	0,48
2900027785	1	0,4	0,8	0,32
2900027786	0,6	0,4	0,8	0,192
2900027787	1	0,6	0,8	0,48
2900027788	1	0,6	0,8	0,48
2900027789	1	0,7	0,8	0,56
2900027790	0,2	0,4	0,7	0,056
2900027791	1	0,6	0,9	0,54
2900028977	1	0,6	0,9	0,54
2900029030	1	0,6	0,7	0,42
2900029342	1	0,6	0,7	0,42
2900029343	1	0,6	0,8	0,48
2900029344	1	0,6	0,7	0,42
2900001010	1	0,4	1	0,4
2900013077	1	0,4	1	0,4
2900022335	1	0,6	1	0,6
2900026231	1	0,6	1	0,6

Fonte: Próprio Autor