



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Tecnologia e Ciências**

**Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de  
Recursos Hídricos**

**Diogo Ferreira Vaz**

**Identificação Preliminar de Áreas Suscetíveis à Vulnerabilidade Natural à  
Contaminação de Águas Subterrâneas: um Estudo de Caso na região dos  
bairros da Grande Tijuca localizado no município do Rio de Janeiro**

Rio de Janeiro

2022

Diogo Ferreira Vaz

**Identificação Preliminar de Áreas Suscetíveis à Vulnerabilidade Natural à  
Contaminação de Águas Subterrâneas: um Estudo de Caso na região dos bairros da  
Grande Tijuca localizado no município do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos.

Orientador (a) (es): Prof. Dr. Júlio Cesar da Silva

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ/REDE SIRIUS/CTCC

V393 Vaz, Diogo Ferreira.  
Identificação Preliminar de Áreas Suscetíveis à Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Águas Subterrâneas: um Estudo de Caso na região dos bairros da Grande Tijuca localizado no município do Rio de Janeiro/ Diogo Ferreira Vaz. – 2021.  
80 f.: il.

Orientador: Júlio César da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências.

1. Águas subterrâneas – Tese. 2. Recursos hídricos – Gestão – Teses. 3. Águas subterrâneas – Vulnerabilidade social Teses – Tese. 4. Água – Poluição – Controle – Teses. I. Silva, Júlio César da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências. IV. Título.

CDU 556.32(815.3)

Bibliotecária responsável: Ingrid Pinheiro / CRB-7: 7048

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Diogo Ferreira Vaz

**Identificação Preliminar de Áreas Suscetíveis à Vulnerabilidade Natural à  
Contaminação de Águas Subterrâneas: um Estudo de Caso na região dos bairros da  
Grande Tijuca localizado no município do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROF-ÁGUA), na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2022

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Julio Cesar da Silva (Orientador)  
Prof. Água – UERJ

---

Prof. Dr. Friedrich Wilhelm Herms  
Prof. Água – UERJ

---

Prof. Dr. Felipe da Costa Brasil  
UVA – Universidade Veiga de Almeida

Rio de Janeiro

2022

## **DEDICATÓRIA**

À minha família, amigos e a todos que fizeram dessa jornada a melhor possível.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus pois sem ele me guiando e iluminando nessa longa jornada não conseguiria chegar até aqui.

Agradeço à minha mãe, Regina, que sempre foi minha mentora, me apoiando, me guiando, me dando garra e força ao longo de toda minha vida. Ela que sempre acreditou no meu potencial e me apoiou quando tudo parecia perdido.

Agradeço ao meu Pai, Sergio, que sempre se demonstrou preocupado com meus estudos e minha saúde ao longo dessa jornada, me apoiando quando tudo parecia perdido.

*In memoriam* à minha vó, Maria de Lourdes, que por meio de seus conhecimentos e ensinamentos fizestes o melhor possível enquanto presente no plano de Terra.

Agradeço a todos os Mestres e Doutores do Prof<sup>o</sup>Água dos quais tive o privilégio de ser aluno e que contribuíram ao longo desse ano não só com ensinamentos de excelência. Em especial ao Prof. Dr. Julio Cesar da Silva por ter me apoiado durante os estudos acadêmicos para a conclusão desta presente dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas (ANA) através do Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - Prof<sup>o</sup>Água da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo apoio técnico científico oferecido, e a ANA e a CAPES pelo apoio ao Prof<sup>o</sup>Água aportado até o momento.

Todas as vitórias ocultam uma abdicação

*(Simone de Beauvoir)*

## RESUMO

VAZ, Diogo Ferreira. *Identificação Preliminar de Áreas Suscetíveis à Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Águas Subterrâneas*: um Estudo de Caso na região dos bairros da Grande Tijuca localizado no município do Rio de Janeiro. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

O presente trabalho aborda a perspectiva do contexto de identificação de pontos de vulnerabilidade de água subterrânea frente à gestão de recursos hídricos subterrâneos e à gestão de áreas contaminadas. Defendendo como base a presença de um sistema normativo presente no estado do Rio de Janeiro referente às situações que envolvem o consumo de água subterrânea, gerenciamento de áreas contaminadas e, também, a questão de segurança de qualidade hídrica envolvendo o consumo diretamente de recursos hídricos subterrâneos pela sociedade. Ainda, assim, consta uma abordagem metodológica para fins de identificação de vulnerabilidade natural da água subterrânea e uma aplicação de baixo custo e, a partir de dados originários secundários e públicos, como forma de identificação preliminar de áreas suscetíveis à contaminação de água subterrânea. A região de estudo contemplou a área estabelecida pelas regiões administrativas dos bairros da Grande Tijuca, localizadas parcialmente na região da sub-bacia do Rio do Mangue, e apresentou como resultado preliminar que tal área encontra-se sobre uma região de vulnerabilidade com índices variando entre média e alta. Desta forma, a partir da metodologia e aplicação do IDW (*Inverse Distance Weighted*) foi possível elaborar um mapa preliminar de distribuição dos resultados pontuais resultantes da vulnerabilidade natural à água subterrânea da área de interesse. Como resultado preliminar, pode-se observar que tal estudo poderá servir como base e subsídio para tomada de decisão para futuros estudos hidrogeológicos mais específicos de regiões de interesse com maior índice de vulnerabilidade.

**Palavras-chave:** vulnerabilidade; água subterrânea; áreas contaminadas; método GOD.



## ABSTRACT

VAZ, Diogo Ferreira. *Preliminary Identification of Areas Susceptible to Natural Vulnerability to Groundwater Contamination: a Case Study located at administrative regions of Great Tijuca at Rio de Janeiro city*. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROF-ÁGUA), Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The present work approaches the perspective of the context of identification of points of vulnerability of groundwater in the face of the management of groundwater resources and the management of contaminated areas. Defending as a basis the presence of a normative system present in the state of Rio de Janeiro regarding situations involving the consumption of underground water, management of contaminated areas and, also, the issue of water quality security involving the consumption of groundwater resources and society. Still, there is a methodological approach to the GOD method and a low-cost application and, based on secondary and public data, as a way of preliminary identification of areas susceptible to vulnerability to groundwater contamination. The study region covered the area established by the administrative regions of Great Tijuca, partially located in the Rio do Mangue sub-basin region, and presented as a preliminary result that this area is located in a region of vulnerability with indexes ranging from medium to high. Thus, based on the methodology and application of the IDW (Inverse Distance Weighted), it was possible to elaborate a preliminary map of the distribution of the punctual results resulting from the natural vulnerability to groundwater in the area of interest. As a preliminary result, it can be seen that such a study may serve as a basis and subsidy for decision making for future more specific hydrogeological studies of regions of interest with a higher vulnerability index.

**Keywords:** vulnerability; groundwater; contaminated sites; GOD method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Relação do limite quantitativo do uso de recursos hídricos subterrâneos que limita os diferentes tipos de uso para o consumo humano (outorgável/insignificante).....	25
Figura 2	Relação de criterização entre os usos de recursos hídricos subterrâneos considerados insignificantes e uso outorgável.....	27
Figura 3	Número estimado de áreas contaminadas nos EUA e o custo de remediação previsto para o período de 2004 a 2033.....	30
Figura 4	Sistema multi formas de óleo presente em água subterrânea.....	42
Figura 5	Sistema multi formas de óleo presente em água subterrânea.....	43
Figura 6	Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.....	46
Figura 7	Localização da área de estudo.....	50
Figura 8	Identificação dos poços de captação de água subterrânea cadastrados no CNARH40 categorizados pelos seus respectivos tipos de uso – Março/2019.....	51
Figura 9	Distribuição geoespacial dos poços de captação de água subterrânea disponíveis pelo SIAGAS e identificação das características da descrição da litologia primária fornecida pela base de dados do CPRM.....	53
Figura 10	Distribuição geoespacial das áreas consideradas contaminadas e/ou reabilitadas pelo cadastro estabelecido pelo INEA (2015).....	57
Figura 11	Distribuição geoespacial não rasterizadas dos resultados pontuais da aplicação da metodologia GOD na área de estudo.....	66
Figura 12	Distribuição rasterizada com os resultados da interpolação da aplicação da metodologia GOD em escala de 1:20 na área de estudo.	67
Figura 13	Distribuição geoespacial do resultado do índice GOD interpolado em comparação com o regime de uso de recursos hídricos subterrâneos, cadastro de áreas contaminadas e hidrografia da área de interesse – Norte e Noroeste.....	69
Figura 14	Distribuição geoespacial do resultado do índice GOD interpolado em comparação com o regime de uso de recursos hídricos subterrâneos, cadastro de áreas contaminadas e hidrografia da área de interesse – Sul e Sudeste.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Etapas do processo de descontaminação das áreas consideradas contaminadas sob ótica do cenário pertencente ao Superfund.....	31
Tabela 2	Etapas do gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil.....	33
Tabela 3	Tipos de classificação de uma área sob aspecto do gerenciamento de áreas contaminadas.....	36
Tabela 4	Listamento de leis, normas, decretos e resoluções que se aplicam no cenário de gerenciamento de áreas contaminadas nacionalmente.....	37
Tabela 5	Identificação das fontes poluidoras registradas no cadastro de áreas contaminadas e reabilitadas do INEA (2015).....	56
Tabela 6	Identificação das fontes de dados para determinação dos parâmetros utilizados para à aplicação do método GOD.....	59
Tabela 7	Localização dos poços de captação de água subterrânea e seu respectivo uso declarado utilizados para aplicação do método GOD..	63
Tabela 8	Localização dos poços de captação de água subterrânea, unidade geológica, descrição geológica, litologia primária e nível estático.....	64
Tabela 9	Resultados da aplicação da metodologia GOD na área de interesse...	65
Tabela 10	Relação entre litoestratigrafia observada na área de estudo e resultado do índice de vulnerabilidade natural à água subterrânea.....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Distribuição do deferimento do tipo de uso de recursos hídricos subterrâneos do município do Rio de Janeiro – CNARH40 – Março/2019.....	52
Gráfico 2	Distribuição do deferimento do tipo de uso de recursos hídricos subterrâneos das regiões administrativas dos bairros da Tijuca, Vila Isabel e Rio Comprido – CNARH40 – Março/2019.....	53
Gráfico 3	Distribuição municipal do cadastro de áreas contaminadas registradas no INEA do estado do Rio de Janeiro.....	55
Gráfico 4	Relação entre as fontes das áreas contaminadas registradas no município do Rio de Janeiro.....	56

## LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1	Fluxograma Simplificado das Etapas de Gerenciamento de Áreas Contaminadas.....	35
Fluxograma 2	Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro do grau de confinamento da água subterrânea.....	60
Fluxograma 3	Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro da ocorrência de estrato de cobertura da zona não vadosa do solo com acesso ao perfil construtivo do poço de monitoramento a ser considerado.....	61
Fluxograma 4	Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro da ocorrência de estrato de cobertura da zona não vadosa do solo na ausência de dados primários do perfil construtivo dos poços de monitoramento avaliado.....	62
Fluxograma 5	Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro do distanciamento ao lençol freático (profundidade do nível estático de água subterrânea).....	63

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
AI	Área Contaminada sob Investigação
ACI	Área Contaminada sob Intervenção
AMR	Área em Processo de Monitoramento e Remediação
AR	Área Reabilitada para o Uso Declarado
CERHI	Conselho Estadual dos Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNARH	Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
ETA	Estação de Tratamento de Água
GELRAC	Gerência de Licenciamento de Risco Ambiental e Áreas Contaminadas
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
NOP	Norma Operacional
PPP	Perímetro de Proteção dos Poços
RAH	Relatório de Avaliação Hidrogeológica
REGLA	Sistema Federal de Regulação de Uso
SIAGAS	Sistema de Informação de Águas Subterrâneas

### **LISTA DE SÍMBOLOS**

G	Grau de confinamento da água subterrânea
O	Ocorrência de estrato de cobertura
D	Distância até o lençol freático ou teto do aquífero confinado

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
1.1	<b>Objetivos Gerais</b> .....	19
1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	19
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
2.1	<b>Recursos Hídricos Subterrâneos e a Sociedade Brasileira</b> .....	20
2.2	<b>Aspectos de Gestão e Legislação dos Recursos Hídricos Subterrâneos</b> .....	22
2.3	<b>Panorama do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) sob Aspectos Internacionais e Nacionais</b> .....	28
2.3.1	<u>Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) nos Estados Unidos da América</u> .....	29
2.3.2	<u>Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) no Brasil</u> .....	33
2.4	<b>Contaminantes em Água Subterrânea</b> .....	40
2.5	<b>Vulnerabilidade à contaminação de água subterrânea</b> .....	44
3	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	49
3.1	<b>Caracterização da área de estudo</b> .....	49
3.1.1	<u>Localização, descrição e caracterização do uso de recursos hídricos subterrâneos da área de interesse</u> .....	59
3.1.2	<u>Caracterização geológica e hidrogeológica da área de interesse</u> .....	53
3.1.3	<u>Caracterização da área de estudo com relação a presença de áreas contaminadas e reabilitadas</u> .....	55
4	<b>RESULTADOS</b> .....	59
5	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	70
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	74
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	77



## INTRODUÇÃO

A partir do entendimento da avaliação do contexto técnico que envolve as atividades da gestão de recursos hídricos subterrâneos e os processos vinculados ao gerenciamento de áreas contaminadas, o presente trabalho propõe identificar áreas suscetíveis à contaminação, isto é, verificando a vulnerabilidade da água subterrânea frente às características geológicas e hidrogeológicas da área de interesse, bem como outras características a serem utilizadas. Segundo Carvalho e Hirata (2012) a água subterrânea apresenta uma vulnerabilidade associada que depende das características dos estratos de cobertura do solo e, segundo Foster et al. (2006), do grau de confinamento do aquífero e do nível do lençol freático da região, de forma geral, segundo Carvalho e Hirata (2012) essa vulnerabilidade associada a atividades antrópicas com potenciais de contaminação podem afetar as características da qualidade da água subterrânea de uma região de interesse.

O arcabouço legal da legislação de recursos hídricos associada à gestão de água subterrânea encontra-se bem definido e com uma estrutura já consolidada. Desta forma, procurou-se identificar padrões legislativos e normas operacionais associadas à gestão e regulação de recursos hídricos subterrâneos para fins de embasamento da estrutura do trabalho, e justificar o potencial legislativo do cenário da gestão de recursos hídricos do meio subterrâneo. Além disso, objetivou-se rever os conceitos associados aos aspectos legislativos da gestão de áreas contaminadas e, assim, confrontar de maneira observatório e contundente, não praticável, o que se entende entre a gestão de áreas contaminadas e o processo de licenciamento de usos associados ao recurso hídrico subterrâneo. E, assim, entender da melhor forma o aspecto legislativo do recurso hídrico e a importância do entendimento da vulnerabilidade à água subterrânea como ferramenta ao processo de gerenciamento de áreas contaminadas e emissão de outorga de recursos hídricos.

A fim de se avaliar a questão da vulnerabilidade natural, o presente estudo apresentou, a partir de dados não-primários, isto é, dados fornecidos e já tratados pela esfera pública e por diversas fontes, os resultados preliminares associados à simulação hipotética da vulnerabilidade da água subterrânea na área de estudo das regiões administrativas do bairro da Tijuca, Vila Isabel e Rio Comprido. Não obstante, tal interesse da região da área de estudo encontra-se associado ao fato de a região contemplar, historicamente, o serviço de abastecimento de água para a população no entrono do século XVIII. Também associado ao contexto histórico, apesar do cenário de consumo de recursos hídricos subterrâneos, entende-se que é uma região onde, a partir do contexto de áreas contaminadas, encontra-se estudada e

enquadrada, permitindo, assim, que estudos associados a vulnerabilidade sirvam como subsídios à necessidade de estudos mais específicos hidrogeológicos facilitadores da gestão hídrica subterrânea.

Ainda, correlacionando a sociedade e a fonte de consumo de água superficial, de mananciais e de água subterrânea, entende-se que estão vinculadas diretamente ao desenvolvimento social evolutivo ao longo dos anos. No geral, entende-se que no Brasil, segundo Hirata et al. (2019), o abastecimento público é o principal usuário de quase toda água extraída por poços tubulares apresentando níveis favoráveis de potabilidade. Aliado a esse fator, ainda segundo Hirata et al. (2019), o recurso hídrico subterrâneo, é uma única opção de água potável no campo e nas periferias da cidade sendo assim uma alternativa de respostas às falhas no abastecimento público ou até mesmo ao seu menor custo de operação. Desta forma, aprecia-se que a relação entre sociedade e consumo de água subterrânea encontra-se sob aspecto primário em termos de necessidade, logo, qualquer eventual problemático associado ao consumo de água subterrânea deve ser tratada como propriedade, à depender da região onde se encontra o consumo.

Com relação à essa dinâmica entre a sociedade, o uso da água subterrânea e o desenvolvimento urbano a evolução dessas três esferas, eventualmente, não é acompanhada em mesma intensidade, gerando desbalanço entre esses três fatores. A urbanização e o saneamento básico são termos que apresentam uma relação perigosa com a qualidade de água subterrânea. Segundo Hirata et al. (2019), a intensificação do desenvolvimento antrópico, industrialização pode prover um maior risco à contaminação da água subterrânea das quais podem ser oriundas das atividades pontuais como por exemplo estocagem de produtos perigosos, disposição de resíduos sólidos e lançamento de efluentes industriais.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivos Gerais**

Identificação preliminar de áreas sob vulnerabilidade natural à água subterrânea nas regiões administrativas dos bairros da Grande Tijuca via metodologia pré-definida como forma de subsídio para a gestão de áreas contaminadas e reabilitadas na cidade do Rio de Janeiro.

### **1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do presente trabalho encontram-se descritos a seguir:

- a) Aplicar metodologia simplificada e a partir de dados públicos e secundários como forma de geração de mapas de áreas suscetíveis a vulnerabilidade à contaminação de água subterrânea.
- b) Utilizar do índice de vulnerabilidade de aquífero para fins de gestão territorial e de uso e ocupação do solo, comparando seu respectivo aspecto geoespacial e o consumo registrado de água subterrânea.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

As referências bibliográficas baseiam-se em legislações, normas, guias técnicos, artigos, dissertações e outros documentos que possam sustentar o embasamento teórico da elaboração do pressuposto objetivo do presente trabalho.

### 2.1 Recursos Hídricos Subterrâneos e a Sociedade Brasileira

As águas subterrâneas, sob ótica do INEA (2019) e mediante a contextualização regional do presente trabalho, são consideradas aquelas que estão disponíveis para extração antrópica sob ocorrência natural em subsolo. Ainda, o corpo hidrogeológico armazenador da água subterrânea é dito como aquífero, formado por rochas, solos ou sedimentos permeáveis com uma capacidade de conduzir água através dos espaços vazios que se interconectam no meio físico subterrâneo (fissura, poros e outros). As unidades armazenadoras de água e condutoras são classificadas de diferentes formas, sejam elas o aquífero cárstico, confinado, fissural, poroso dentre outros. Cada qual com suas características armazenadoras e condutoras de água subterrânea (INEA, 2019)

Além disso, sob aspectos de sociedade, a água subterrânea apresenta um papel importante na formação e desenvolvimento socioeconômico de uma região, cidade e/ou estado. Hirata (2019), aponta uma problemática recorrente em relação ao registro e uso da água subterrânea, onde cerca de 1% dos poços tubulares utilizados para abastecimento são de uso registrado e regular, isto é, estão identificados e existentes em números para a gestão governamental do recurso hídrico subterrâneo. Desta forma, com essa diferenciação entre uso regular e uso não registrado, observa-se uma defasagem de números em relação à atual realidade do consumo de água subterrânea, colocando em situação de comprometimento aqueles que a utilizam para fins produtivos ou até mesmo de consumo insignificante e usos domiciliares.

No Brasil, o panorama geral de consumo de água subterrânea divide-se em diversas esferas e contextos socioeconômicos diferentes, onde o abastecimento doméstico, seguido da agricultura e pecuária, correspondem a cerca de 54% do consumo de água subterrânea registrado no país de acordo com CPRM (2018 *apud* Hirata *et al.*, 2019), onde 30% encontra-se associado ao abastecimento doméstico enquanto que 24% encontra-se vinculado ao uso destinado para agricultura e pecuária. Mais adiante, destacam-se os estados de São Paulo,

Paraná, Rio Grande do Sul, Bahia, Piauí e Ceará como os mais dependentes de consumo de água subterrânea para abastecimento doméstico, já o Rio de Janeiro encontra-se com baixa dependência de distribuição da ocorrência de poços tubulares, cerca de 0,02% até 0,32% da distribuição de poços tubulares. Ainda, a concentração de consumo de água subterrânea em perímetros urbanos, principalmente em periferia, está associada à falta de acessibilidade ao abastecimento público, sendo assim, surgindo como alternativa para captação de água potável.

Em relação à população brasileira, acessibilidade ao saneamento, e à importância entre o abastecimento público e o consumo de água subterrânea, segundo Hirata *et al.* (2019) e ANA (2010), 36% dos municípios no Brasil abastecem publicamente utilizando o sistema de captação de água subterrânea. Apesar deste cenário, as cidades menos favorecidas com infraestrutura de saneamento básico por concessionária são mais afetadas, isto é, as cidades de menor porte e extensão territorial dependem do abastecimento da matriz de água subterrânea. Além disso, trazendo para o panorama representativo do estado do Rio de Janeiro, de acordo com ANA (2010), apenas 2 municípios do estado do Rio de Janeiro (Petrópolis e São Francisco de Itabapoana) apresentam como sistema de abastecimento existente exclusivamente a captação a partir de manancial de água subterrânea. Os demais municípios do estado apresentam regime de captação a partir de manancial superficial e misto, isto é, conforme Hirata (2019), para abastecimento misto o recurso hídrico subterrâneo, em 56% dos municípios do Brasil, é normalmente utilizado em áreas de periferia e de falta de acessibilidade de saneamento básico pela concessionária responsável.

Sabe-se que a população menos favorecida pelo abastecimento público é também a população mais vulnerável socioeconomicamente. Desta forma, procuram alternativas na captação de água subterrânea para fins de abastecimento público. Associado a isso há uma perigosa relação entre consumo de água subterrânea e sua respectiva qualidade e a falta de saneamento básico à população (HIRATA *et al.*, 2019). Além disso, associado à ausência de abastecimento público, o sistema de coleta também é precário em todo país, na ausência de redes coletoras de esgoto, a maioria do mesmo é lançado no solo em fossas negras e sumidouros (HIRATA *et al.*, 2019). Nestes casos, mesmo quando construídas corretamente, o lançamento de esgoto não tratado em solos pode levar a formação de contaminação da água subterrânea por nutrientes como nitrato e outros contaminantes.

Em específico, mediante ao uso de recursos hídricos subterrâneos do estado do Rio de Janeiro entende-se que, segundo Hirata (2019), o estado apresenta um consumo médio de água por ano de 7 Mm<sup>3</sup>/ano, estado no 4º lugar como o estado menos dependente de consumo de água subterrânea pela população. Entretanto, tal menor dependência reflete na elevada

dependência do consumo de água superficial, estando em 1º lugar como total dependente quando comparado aos demais estados. Dessa forma, a diversificação entre consumo de água subterrânea e consumo de água superficial faz-se necessário para reduzir a dependência de uma única fonte de água para abastecimento público do estado do rio de janeiro.

## **2.2 Aspectos de Gestão e Legislação dos Recursos Hídricos Subterrâneos**

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os vínculos associativos entre o aspecto legal da política estadual de recursos hídricos subterrâneos do estado do Rio de Janeiro associado ao direito de uso de recursos hídricos.

De maneira geral, em relação à legislação dos recursos hídricos, em específico, as leis associadas ao uso de água subterrânea, segundo o INEA (2017), a partir do documento de conjuntura legal dos recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro que se baseia em lei federais e estaduais, decretos estaduais, resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), resoluções do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos (CNRH), resoluções do Conselho Estadual dos Recursos Hídricos (CERHI) e resoluções do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) destacam-se as seguintes legislações:

a) Leis Federais:

- nº 9.433/97 – Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Regulamenta O inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

b) Leis Estaduais:

- nº 3.239/99 - Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos cria o sistema estadual de gerenciamento de recursos hídricos regulamenta a constituição estadual, em seu artigo 261, parágrafo 1º, inciso VII e dá outras providências;

- nº 4.247/03 - Dispõe sobre a cobrança pela utilização dos recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro e dá outras providências;

- nº 5.234/08 - Altera a Lei nº 4.247, de 16 de dezembro de 2003, que dispõe sobre a cobrança pela utilização dos recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro e dá outras providências.

c) Decretos Estaduais:

- nº 35.724/04 - Dispõe sobre a regulamentação do art. 47 da Lei nº 3.239, de 02 de agosto de 1999, que autoriza o Poder Executivo a instituir o Fundo Estadual de Recursos Hídricos - FUNDRHI, e dá outras providências;

- nº 40.156/06 - Estabelece os procedimentos técnicos e administrativos para a regularização dos usos de água superficial e subterrânea, bem como para ação integrada de fiscalização com os prestadores de serviço de saneamento básico, e dá outras providências.

d) Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA):

- nº 396/08 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências;

- nº 430/11 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

e) Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos:

- nº 15/01 – Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas;

- nº 16/01 – Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos;

- nº 17/01 – Dispõe sobre planos de recursos hídricos;

- nº 22/02 – Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos;

- nº 29/02 – Define diretrizes para a outorga de direito de uso de recursos hídricos quanto ao aproveitamento dos recursos minerais;

- nº 91/08 – Dispões sobre procedimento gerais para enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneas;

- nº 92/08 – Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro;

- nº 126/11 - Aprova diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos;

- nº 141/12 - Estabelece critérios e diretrizes para implementação dos instrumentos de outorga de direito de uso de recursos hídricos e de enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes, em rios intermitentes e efêmeros, e dá outras providências;

- nº 145/12 - Estabelece diretrizes para a elaboração de planos de recursos hídricos de bacias hidrográficas e dá outras providências;

- nº 153/13 - Estabelece critérios e diretrizes para implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no território Brasileiro.

f) Resoluções do Conselho Estadual de Recursos Hídricos:

- nº 09/03 - Estabelece critérios gerais sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro;

- nº 17/06 - Aprova a modificação na estrutura de câmaras técnicas do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Rio de Janeiro.

g) Resoluções do Instituto Estadual do Ambiente (INEA):

- nº 10/09 - Define mecanismos e critérios para regularização de débitos consolidados referentes à cobrança amigável pelo uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro;

- nº 15/10 - Estabelece os procedimentos a serem adotados pelos agricultores familiares e empreendimentos familiares rurais para regularização do uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro;

- nº 44/11 - Estabelece procedimentos para a celebração e execução dos contratos de gestão entre o INEA e as entidades delegatárias com funções de competência das agências de águas;

- nº 63/12 - Aprova a normatização e os procedimentos para abertura de processos, análise e emissão de certidão ambiental de uso insignificante de recursos hídricos;

- nº 120/15 - Prorroga o prazo estabelecido na Resolução Inea nº 73/2013 e mantém os procedimentos definidos na Resolução Inea nº 15/2010 para regularização do uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro pelos agricultores familiares e empreendimentos familiares rurais.

h) Normas Operacionais (NOP) estabelecidas pelo INEA:



- NOP-INEA-38 - Critérios, definições e condições para outorga de direito de uso de recursos hídricos subterrâneos;
- NOP-INEA-39 - Critérios, orientações e procedimentos para elaboração do relatório de avaliação hidrogeológica – RAH;
- NOP-INEA-40 - Critérios, definições e condições gerais para concessão de certidão ambiental de uso insignificante de recursos hídricos.

Pode-se observar, a partir das relações apresentadas anteriormente, que o uso de recurso hídrico subterrâneo se encontra bem embasado sob aspectos legislativos. Em âmbito estadual e referente à abordagem de interesse sobre uso de recurso hídrico subterrâneo frente às exigências do órgão gestor estadual, o INEA (2019), publicou uma Norma Operacional (NOP-INEA-38) que relaciona o direito de uso de recurso hídrico subterrâneo em relação à sua respectiva outorga. Prioritariamente, a aplicação do uso de recurso hídrico subterrâneo define que a partir de um consumo diário de 28.000 litros (produtor rural e/ou agropecuário) e 5.000 litros para outros usos é necessária a obtenção de direito de uso de recurso hídrico a partir da solicitação/emissão da outorga, consumos inferiores a tais valores são considerados insignificantes e ausentes dos critérios de outorga e são objetos de requerimento de Certidão Ambiental de uso insignificante de recursos hídricos, conforme apresentado na Figura 1 e a seguir:

- a) Se o consumo for menor que 5 mil litros/dia para poços, o uso é considerado insignificante para consumo urbano. Entende-se que para poços o insignificante pode ser considerado como 34.560 litros/dia quando associado a agricultura.
- b) Se o consumo for maior que 5 mil litros/dia para poços, o uso é considerado à necessidade de outorga.

Figura 1- Relação do limite quantitativo do uso de recursos hídricos subterrâneos que limita os diferentes tipos de uso para o consumo humano (outorgável/insignificante)



Fonte: INEA (2019)

Segundo o INEA (2019) para a obtenção do direito de uso de recurso hídrico subterrâneo a partir da emissão de outorga, é necessário cadastrar o poço tubular instalado no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH) e Sistema Federal de Regulação de Uso (REGLA) disponível da Agência Nacional de Águas (ANA). Após o cadastramento no registro dos órgãos ambientais, é necessária a apresentação de diversos tipos de documentos, listados pela NOP-INEA-38, dos quais, dentre eles, é preciso a elaboração de um documento específico que relaciona as características hidrogeológicas a partir do Relatório de Avaliação Hidrogeológica (NOP-INEA-39) do ponto de interferência a ser outorgado. Como critério e orientação para a elaboração das características hidrogeológicas do ponto de interferência a ser outorgado é necessário caracterizar o ponto a partir dos seus esclarecimentos relacionados a litologia, como também a unidade geológica, de interesse a partir do perfil construtivo-litológico apresentando cópias originais dos mesmos, para os poços antigos, é necessário fazer uma simulação hipotética do perfil construtivo do poço de interesse (INEA, 2019). Os aspectos litológicos no que se referem à sua aplicabilidade, tangenciam a importância a ser utilizada na confecção de mapas de usos do

solo que se referenciam à vulnerabilidade do contexto de água subterrânea de uma área de interesse.

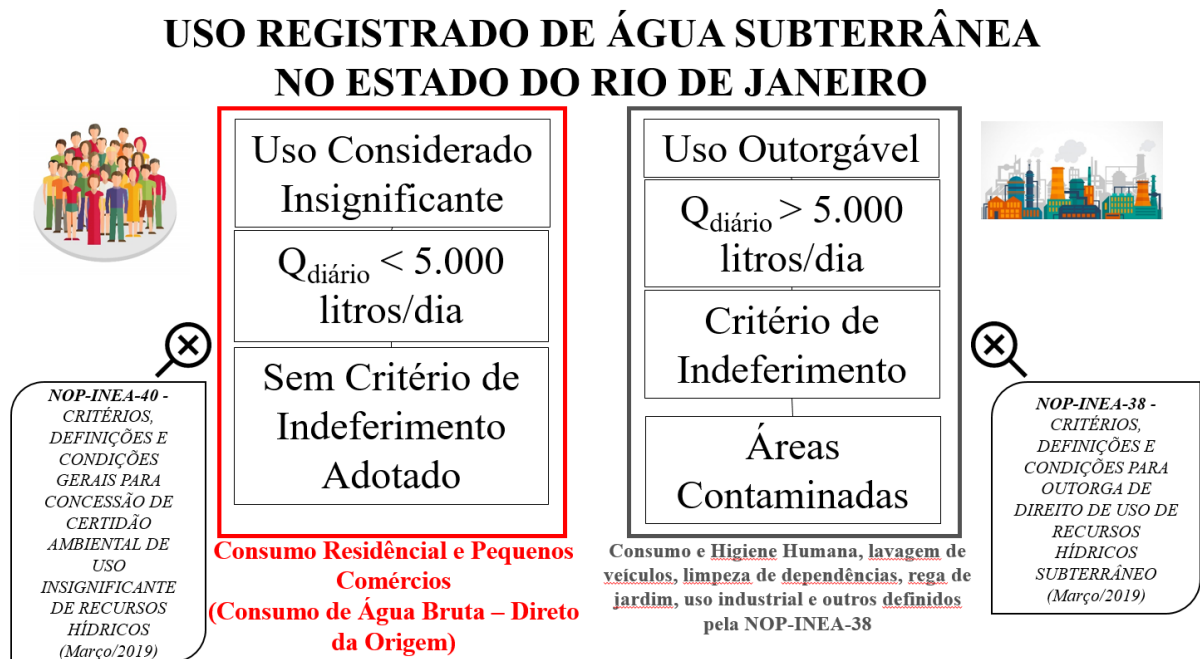
Dentre os principais levantamentos a serem executados durante o relatório de avaliação hidrogeológica, segundo o INEA (2019), destacam-se aqueles que estão associados à descrição da atividade exercida e forma de ocupação da área estudada, incluindo o histórico anterior ao uso e ocupação do solo. Tal aplicação é de suma importância para identificar potenciais fontes de contaminação ao uso do recurso hídrico subterrâneo que serão utilizadas como informação para deferimento do processo de outorga de recursos hídricos subterrâneos, salientando, assim, a importância da consideração dos usos do solo como aspecto primordial ao gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. Este procedimento é de suma importância para poder ser realizado um registro na forma de banco de dados a ser utilizado pelo órgão gestor. Uma de suas aplicações é a necessidade de mapeamento desses usos para fins tanto outorgáveis quanto aos usos insignificantes, tendo em vista, que o enquadramento em uso insignificante esteja mais associado ao consumo pela população no geral.

Outro aspecto importante relacionado à gestão de recursos hídricos subterrâneos é a questão que se encontra associada à localização de áreas contaminadas. Segundo a NOP-INEA-39, associada ao processo de outorga, define-se sob aspectos quantitativos e qualitativos que são critérios de indeferimento de outorga aqueles usos associados às áreas consideradas contaminadas. Não só para tal, para emissão de certidão ambiental de uso insignificante, fica a critério, do órgão gestor, sob a atual gerência de licenciamento de risco ambiental e áreas contaminadas (GELRAC), emitir parecer sobre o potencial de contaminação de recursos hídricos subterrâneos nos processos de uso insignificante em empreendimentos licenciados pelo INEA. Tais iniciativas tendem a evitar que processos referenciados ao consumo de água subterrânea, tanto associado ao uso outorgável ou insignificante, sejam averbados e, assim, oferecendo um controle potencial de risco de contaminação à água subterrânea.

Contudo, segundo a NOP-INEA-40, do que se refere aos critérios, definições e condições gerais sobre a concessão de certidão ambiental de uso insignificante de recursos hídricos, é possível destacar que apesar da iniciativa de emissão de parecer sobre potencial de contaminação pela GELRAC, a norma operacional direta relacionada a uso insignificante não apresenta como critério de indeferimento definido a consideração de áreas contaminadas em seu escopo. Entretanto, a partir do formulário de preenchimento de uns dos seus respectivos documentos a serem entregues para o requerimento da certidão ambiental para uso insignificante é necessário a apresentação da descrição de potenciais fontes de contaminação

para o raio de 200 metros (INEA, 2019). Tal atividade, é de suma importância para identificação de fontes potenciais como postos de combustíveis, cemitérios, aterro de resíduos, áreas sujeitas a presença de fossas sépticas, dentre outras fontes. Desta forma, relacionando as duas NOPs que se referenciam ao uso de recurso hídrico subterrâneo pode-se elaborar a relação apresentada na Figura 2.

Figura 2- Relação de criterização entre os usos de recursos hídricos subterrâneos considerados insignificantes e uso outorgável.



Fonte: o Autor (2019)

Esta correlação legislativa entre os critérios de indeferimento e o contexto de áreas contaminadas e que tratam sob o âmbito de normas operacionais do uso insignificante de recursos hídricos e do uso mediante a outorga de água subterrânea é de suma importância para a gestão sustentável do recurso hídrico subterrâneo. Tendo em vista o cenário entre o uso de recursos hídrico e áreas contaminadas, o capítulo a seguir apresenta os aspectos legislativos do contexto de identificação de potenciais fontes e também de áreas contaminadas, bem como, aspectos de licenciamento ambiental vinculados aos contextos de áreas contaminadas do estado do Rio de Janeiro.

### 2.3 Panorama do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) sob Aspectos Internacionais e Nacionais

Entende-se atualmente que a qualidade da água subterrânea deve ser atendida mediante padrões de qualidade ambiental e valores orientadores estabelecidos sob âmbitos

legislativos. No entanto, no passado o entendimento era diferente, segundo a EPA (1990), na década de 70, era dito que a água subterrânea era naturalmente purificada devido às constituições litológicas do solo, as partículas de solo das diferentes camadas e serviam como barreiras hidrogeológicas, isto é, retinham o contaminante antes do mesmo atingir a água subterrânea. Contudo, entre 1971 e 1985, passou-se a observar a relação entre consumo de água subterrânea e aparecimento de doenças relacionadas a problemas curtos digestivos.

A água subterrânea está passível a contaminação por diversos potenciais fontes que contaminam o solo ou a água subterrânea sob diferentes processos de dispersão de poluentes. Uma das principais fontes de contaminantes conhecidas são os postos de combustíveis e seus sistemas de armazenamento subterrâneo de combustíveis que são utilizados para armazenagem de diferentes tipos de combustíveis, como gasolina, óleo lubrificantes e outros. Ainda, de acordo com a EPA (1990), as substâncias que podem contaminar a água subterrânea estão divididas em 2 (duas) categorias básicas: substâncias que acontecem naturalmente e substâncias que são introduzidas ou produzidas por atividades humanas. São exemplos de contaminação oriunda da atividade humana, principalmente, os vazamentos oriundos de sistemas de abastecimento subterrâneo de combustíveis.

As substâncias que referenciam a partir do cenário de impacto oriundo de atividades humanas estão principalmente vinculadas a lixiviados, químicos orgânicos sintéticos e hidrocarbonetos (ex.: pesticida, solventes e produtos de petróleo), já em relação a ocorrência natural de contaminação pode-se associar a alguns compostos mineralógico como ferro, manganês e selênio (EPA, 1990). Não obstante, cita-se também a ocorrência de contaminação do lençol freático oriunda a partir de metais pesados, processo de salinização, bactéria e vírus (EPA, 1990). Para tal, sabendo da ocorrência de potencial de contaminação destas substâncias e também atento aos potenciais riscos de contaminação do meio ambiente e, em consequência, a sociedade como um todo, alguns países desenvolveram um pioneirismo no aspecto que se trata de gerenciamento de áreas contaminadas, a exemplo, os Estados Unidos da América.

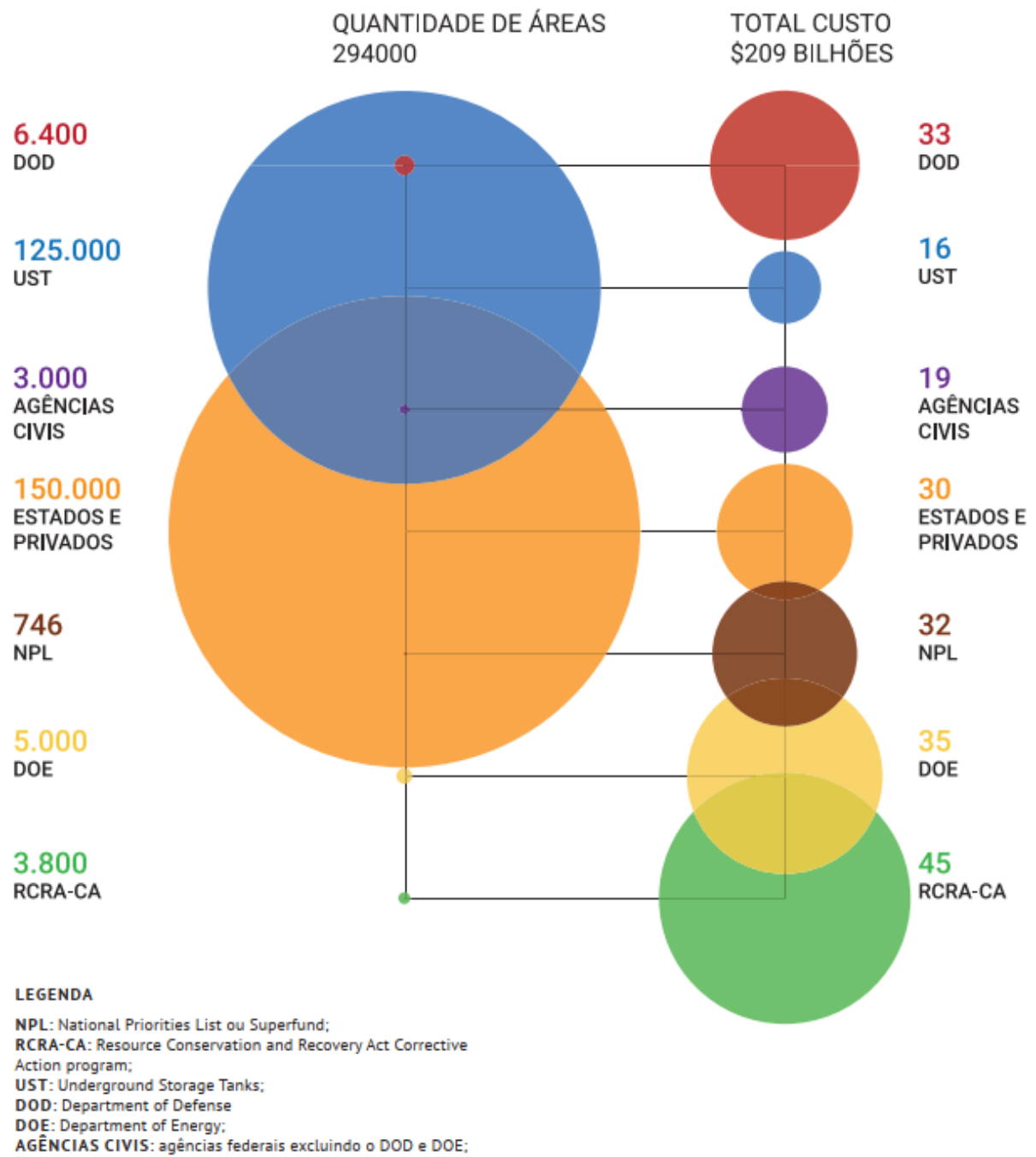
### 2.3.1 Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) nos Estados Unidos da América

O processo de gerenciamento de áreas contaminadas nos Estados Unidos deu-se início a partir da década de 80 do século XX. Em particular, estima-se que o processo de controle e entendimento das preocupações vinculadas a áreas contaminadas no território nacional dos Estados Unidos apresentou o começo a partir do programa conhecido como *Superfound*. Onde, tornou-se conhecida a existência de milhares de áreas contaminadas em todo o país

devido a diversas atividades como despejo de resíduos perigosos deixados ao ar livre ou manejados de forma inadequada. Esses locais incluem fábrica, plantas industriais de processamento, aterros e áreas de atividade de mineração (EPA, 2020).

Segundo o IPT (2019), o cenário de cadastro de áreas contaminadas nacionalmente nos Estados Unidos da América encontra-se distribuído sob diferentes óticas e gestão pública, podendo estar associado a órgãos ambientais e departamentos nacionais. Estima-se que, até 2019, os Estados Unidos apresentavam cerca de 290.000 áreas que apresentavam necessidade de processo de remediação nos EUA que incluíam áreas de indústrias abandonadas, terrenos costeiros e imóveis comerciais, totalizando um custo de aproximadamente \$200 bilhões para execução do processo de remediação. A Figura 3, apresenta o número estimado de áreas contaminadas nos EUA e o custo de remediação previsto para o período de 2004 a 2033.

Figura 3 – Número estimado de áreas contaminadas nos EUA e o custo de remediação previsto para o período de 2004 a 2033.



Fonte: IPT (2019)

Devido aos acidentes ocorridos (despejo de resíduos tóxicos) no *Love Canal* despertou-se o alerta e a necessidade de atenção às questões ambientais e relacionadas à contaminação oriunda de atividades antrópicas. Desta forma, em 1980, o Congresso americano estabeleceu o *Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act (CERCLA)* o qual permitiu que o órgão ambiental nacional dos estados unidos, a EPA (*Environmental Protection Agency*), Agência de Proteção Ambiental realizasse o

processo de descontaminação e despoluição das áreas contaminadas a qual obriga ainda que as partes interessadas causadoras dos danos e impactos ambientais também sejam responsáveis pela contaminação e realizem processos de remediação ou reembolsem as partes interessadas pelo governo público em realizar o processo de atividade de despoluição. Os principais objetivos do CERCLA, segundo a EPA (2020), estão associados à proteção da saúde humana e meio ambiente a partir do processo de despoluição de áreas contaminadas, fazer que as partes responsáveis paguem pelas atividades de despoluição, envolver as comunidades no processo de execução das atividades dos *superfounds* e retornar as atividades produtivas das áreas pertencentes ao *superfound*. A **Tabela 1** apresenta as etapas do processo de descontaminação das áreas consideradas contaminadas sob ótica do cenário pertencente ao *Superfound*.

Tabela 1 – Etapas do processo de descontaminação das áreas consideradas contaminadas sob ótica do cenário pertencente ao *Superfound*.

Processo	Atividade
Avaliação Preliminar / Inspeção da Área	Essa etapa contempla na revisão documental e de informações históricas incluindo a visita à área de estudo para avaliação de potenciais áreas de liberação/lançamento de substâncias perigosas.
Lista de Prioridade Nacional ( <i>National Priorities List – NPL</i> )	O NPL é principalmente um recurso de informações que identifica áreas que necessitam processo de despoluição. É uma lista das áreas em piores estados quando considerado o cenário de resíduos perigosos identificados pelo <i>Superfound</i> . A lista é amplamente baseada na pontuação que uma área recebe no Sistema de Ranking de Atividades Perigosas.
Investigação para Remediação/Estudo de Viabilidade (Caracterização da Área de Estudo)	Esta etapa avalia a natureza e extensão da contaminação em uma área de estudo e também uma avaliação de risco à saúde humana e ao meio ambiente. Esta etapa também inclui a avaliação do desempenho e do custo das opções de tratamento identificadas na área de estudo.
Decisões para Remediação ( <i>ROD – Records of Decision</i> )	Esta etapa avalia e explica qual alternativa de remediação será utilizada para o processo de despoluição da área de estudo pertencente à lista de áreas contaminadas no NPL. A EPA recomenda algumas alternativas para remediação e apresenta o plano de despoluição chamado de <i>Proposed Plan</i> (Plano Proposto) para acesso ao público. Posteriormente a disponibilidade e apresentação ao público/comunidade a EPA emite um Relatório Final de Decisão ( <i>Final Record of Decision</i> ).
Projeto de Remediação/Ação de Remediação	Plano de despoluição detalhado é desenvolvido e implementado durante a etapa de projeto de remediação ( <i>RD/RA</i> ). O projeto de remediação requer o desenvolvimento de projetos de engenharia específicos para cada área a ser remediada. A etapa de ação corretiva segue o projeto e acompanha o estágio da área de estudo bem como sua fase de despoluição onde consiste na etapa de remediação da área de estudo.
Conclusão das Etapas de Remediação	Este marco representa que todas as atividades físicas de execução requeridas para despoluição da área de estudo foram realizadas.
Pós Conclusão das Etapas de Remediação	Esta etapa indica que o processo de remediação em longo prazo fornece uma proteção à saúde humana e ao meio ambiente. Durante este período a EPA será encarregada de manter as condições pós-remediação e de despoluição para minimizar uma potencial exposição humana à contaminação.



Remoção da Lista de Prioridade Nacional	Quando todas as atividades de remediação forem concluídas e todos objetivos de despoluição finalizados. A EPA publica uma nota de intenção de remoção da área de estudo da NPL e notifica a comunidade sobre a nota e abrindo-a para comentários públicos. Posteriormente se todos os comentários forem explicados a EPA notifica a remoção da área dentro da NPL.
Reuso/Redesenvolvimento	Depois que as áreas são despoluídas, a EPA trabalha com as comunidades por meio de uma série de ferramentas, parcerias e atividades para ajudar a retornar essas áreas para usos produtivos. Esses usos podem ser industriais ou comerciais, como fábricas e shopping centers. Alguns locais podem ser usados para habitação, instalações de obras públicas, transporte e outra infraestrutura comunitária. Alguns sites podem ser para instalações recreativas, como campos de golfe, parques e campos recreativos; ou para recursos ecológicos, como reservas permanentes ou áreas úmidas. Qualquer que seja o uso apropriado para um local, a comunidade se beneficia com a restauração da produtividade do local, porque a propriedade pode mais uma vez agregar ao valor econômico, social e ecológico da comunidade.

Fonte: EPA (2020)

Ao longo de 40 anos de projeto vinculados ao *Superfund*, destacam-se algumas atividades realizadas que contribuíram para um melhor desenvolvimento e engajamento no processo de gerenciamento de áreas contaminadas nos Estados Unidos da América, segundo a EPA (2020), atividades essas que passaram desde da criação do CERCLA em 1981, que consistiu o início governamental das atividades de despoluição de áreas contaminadas, em 1983, criação da Lista de Prioridades Nacional (NPL), consistindo na catalogação das áreas contaminadas ao longo do território nacional, seguindo, em 1990, pela aprovação do congresso nacional do Ato de Prevenção à Poluição. Em 1992, houve a criação do Modelo Acelerado de Remediação das Áreas Contaminadas do *Superfund*. E em, 2002, o congresso aprova a expansão do CERCLA, abrangendo ainda mais o escopo previsto anteriormente.

Desta forma, é possível verificar que ao longo de todo período de preocupação dos Estados Unidos da América como pioneiro no gerenciamento de áreas contaminadas, foi possível observar uma maior restrição e preocupação a este cenário tendo em vista a garantia da saúde humana da comunidade próxima às áreas afetadas, bem como, a necessidade de proteção ao meio ambiente.

### 2.3.2 Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) no Brasil

Em relação ao contexto de áreas contaminadas no Brasil, entende-se que as federações, estados e municípios contemplam ações significativas para controle efetivo de poluição de áreas para evitar novas contaminações. No Brasil, sabe-se por área contaminada, segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2013), é definida como:

Uma área contaminada pode ser definida como uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural.

Desta forma, em se tratando da definição de áreas contaminadas, faz-se necessário a condução de atividades que englobam o detalhamento dessa área contaminada para fins de gerenciamento ambiental. Então, cria-se o termo designado de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, onde-se entende, segundo CETESB (2013), como para fins de conhecimento da área de estudo uma série de atividades adequadas a serem executadas na área em questão para fins de proteção à população e ao meio ambiente. Dentre as atividades que envolvem o processo de gerenciamento de áreas contaminadas, pode-se lista-las da seguinte forma: investigação ambiental para caracterizar uma área contaminada, medidas de engenharia e medidas emergências para fins de conter a propagação e migração de um determinado contaminante, seguido por medidas de remediação, elaboração de um plano de intervenção e um processo de remediação de fato, onde são processos executados para fins de despoluição de um determinado contaminante. A **Tabela 2** apresenta o conceito de cada etapa que contempla as atividades de gerenciamento de áreas contaminadas.

Tabela 2 – Etapas do gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil.

Processo	Atividade
Investigação Ambiental	Caracterizar e detalhar uma área contaminada.
Medidas de Engenharia	Interromper a exposição dos receptores atuando nos caminhos de migração dos contaminantes.
Medidas Emergenciais	Ações para eliminação de perigo que podem ser executadas em qualquer das etapas de gerenciamento de áreas contaminadas
Medidas de Remediação	Técnicas aplicadas para tratamento, remoção, redução de massa de contaminantes, contenção, isolamento e prevenção de migração de contaminantes.
Plano de Intervenção	Elaboração de documento que apresenta um conjunto de medidas a serem adotadas para eliminar o risco. Para tomar a decisão das técnicas adotadas, é realizado estudo que aponta a viabilidade técnica, econômica e ambiental das alternativas.
Remediação	Aplicação das ações de intervenção detalhadas no plano de intervenção para reabilitação das técnicas escolhidas.

Fonte: IPT (2019)

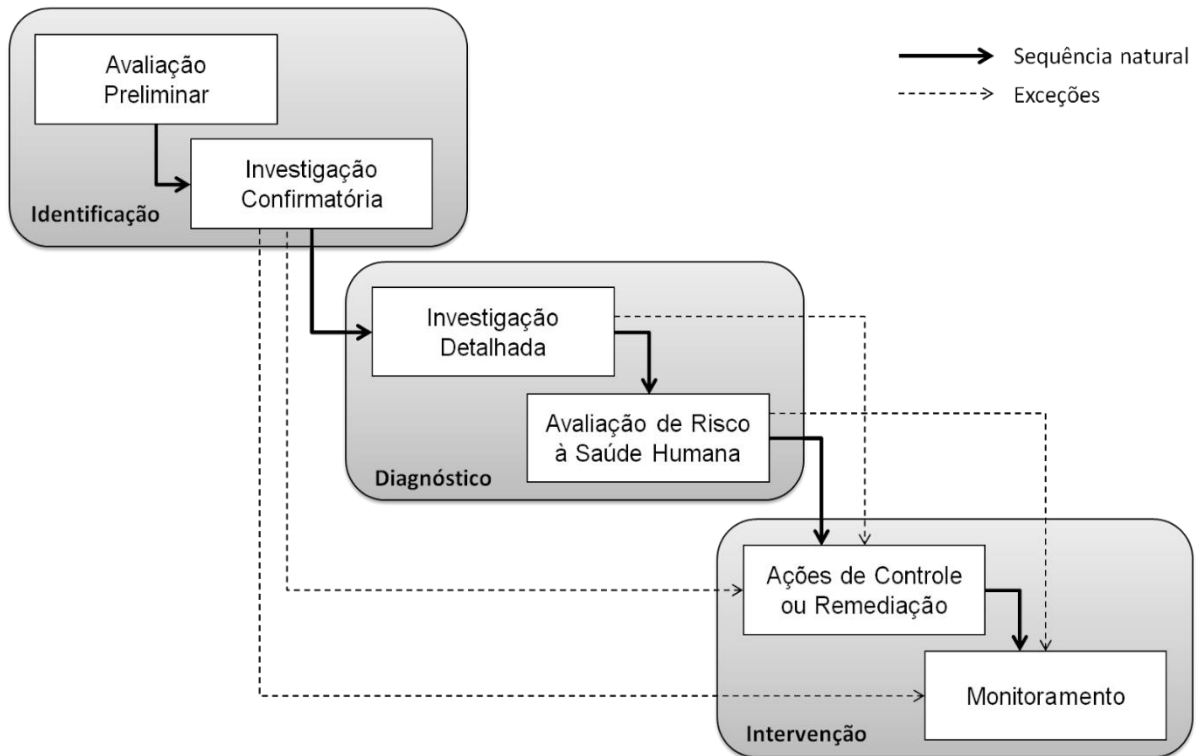
Em relação às etapas de investigação ambiental de uma área de estudo para delimitação da ocorrência de contaminação, destacam-se as principais atividades:

Investigação Ambiental Preliminar, Confirmatória e Detalhada. A Investigação Ambiental Preliminar, segundo a ABNT NBR 15515-1 (2007), consiste em uma avaliação preliminar a qual identifica uma possível evidência de contaminação de uma determinada área de estudo. Segundo São Paulo (2017), a etapa preliminar caracteriza as atividades desenvolvidas e em desenvolvimento na área sob investigação, observando potenciais fontes de contaminação ou áreas suspeitas de contaminação constatando evidências, indícios ou fatos que permitam identificar a existência de contaminação identificando uma área como possível Área Suspeita de Contaminação (AS). Desta forma, esta etapa apresenta como principal objetivo identificar a capacidade de uma área de estudo em apresentar contaminação na mesma tendo em vista o cenário de atividades executadas pela mesma.

Posteriormente ao processo de identificação de áreas potenciais e suspeitas de contaminação em uma área de estudo sob ótica dos estudos ambientais da investigação ambiental preliminar, faz-se necessário a investigação ambiental do solo e da água subterrânea para confirmação da suspeita de contaminação. Tal etapa contempla a Investigação Ambiental Confirmatória, segundo a ABNT NBR 15515-2 (2007), consiste em uma avaliação que apresenta por objetivo executar uma investigação do solo e da água subterrânea em áreas suspeitas de contaminação previamente descrita no estudo preliminar para fins de avaliação analítica de substâncias químicas de interesse comparando seus resultados de concentrações com valores orientadores estabelecidos pela legislação vigente e aplicável à área de interesse. Desta forma, segundo São Paulo (2017), tal processo investigatório apresenta como objetivo direto de verificar a existência de contaminação ou a ausência de contaminação na área objeto de estudo.

Constatada e confirmada a ocorrência de contaminação na área de estudo nas matrizes ambientais avaliadas é preciso a elaboração de um estudo ambiental detalhado. Tal etapa contempla a Investigação Ambiental Detalhada, que segundo a ABNT NBR 15515-3 (2007), consiste, como objetivo, o mapeamento horizontal e vertical da contaminação por meio da comparação entre as concentrações dos contaminantes e os valores orientadores vigentes definindo, dentre outras atividades, a dinâmica de transporte e simulação de prognósticos da evolução da pluma de contaminação de uma determinada área de estudo. Desta forma, entendendo o contaminante a dinâmica do mesmo no meio físico, determina-se a partir do plano de intervenção as ações de remediações a serem executadas na área de estudo para fins de despoluição. O Fluxograma 1 apresenta um fluxograma simplificado aplicado às etapas de gerenciamento de áreas contaminadas de uma determinada área de estudo.

Fluxograma 1 – Fluxograma Simplificado das Etapas de Gerenciamento de Áreas Contaminadas.



Fonte: CONAMA 420/2009 (adaptado).

É válido ressaltar que tais etapas de gerenciamento de áreas contaminadas servem como uma forma de organização e identificação do processo do gerenciamento do passivo ambiental de cada área contaminada em questão. Tendo em vista tal organização, faz-se necessária a identificação em forma de classificação das áreas de interesse avaliadas. Desta forma, Brasil (2009), apresenta a partir da Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009, as formas de se classificar uma determinada área de estudo sob âmbito de avaliação dentro do sistema de gerenciamento de áreas contaminadas. A Tabela 3 apresenta a classificação de uma determinada área de estudo, frente ao cenário identificado ao aspecto do gerenciamento de áreas contaminadas.

Tabela 3 – Tipos de classificação de uma área sob aspecto do gerenciamento de áreas contaminadas.

Sigla	Identificação	Descrição
AS	Área Suspeita de Contaminação	Após a investigação ambiental preliminar, área que apresenta indícios da presença de contaminação ou identificadas condições que possam representar perigo.

AI	Área Contaminada sob Investigação	Área a qual foi constatada a contaminação com concentrações de substância no solo ou água subterrânea acima dos valores orientadores estabelecidos.
ACI	Área Contaminada sob Intervenção	Área a qual for constatada a presença de fase livre <sup>1</sup> ou for comprovada, após a investigação detalhada e avaliação de risco, a existência de risco à saúde humana.
AMR	Área em Processo de Monitoramento para Reabilitação	Área pela qual, definida pelo órgão competente, aquela em que o risco for considerado tolerável após a execução de avaliação de risco.

<sup>1</sup> Fase livre: Entende-se por fase livre a ocorrência de substância ou produto imiscível, em fase separada a água.

Fonte: Brasil (2009)

Entendendo do sistema de gerenciamento de áreas contaminadas vigente no cenário nacional também é plausível o desencadeamento do processo legislativo que embasa o sistema de gerenciamento de áreas contaminadas. Segundo IPT (2019), historicamente sob ótica nacional, as legislações que culminaram em questões vinculadas a áreas contaminadas seja em forma de decreto no texto da lei ou propriamente a lei em si, iniciou-se em 1934 a partir do decreto nº 23.793/1934 a partir do código florestal vigente em época. Entretanto, a partir de 1975, segundo IPT (2019), iniciou-se de fato uma série de legislações vinculadas à área ambiental e de cunho representativo aos aspectos vinculados e que influenciam a ocorrência de atividade industrial potencial geradora de contaminação. Desta forma, destacam-se os aspectos legislativos na **Tabela 4** a fim de apontar nacionalmente as leis, normas, decretos e resoluções que se aplicam no cenário de gerenciamento de áreas contaminadas.

Tabela 4 - Listamento de leis, normas, decretos e resoluções que se aplicam no cenário de gerenciamento de áreas contaminadas nacionalmente.

Ano	Legislação	Escopo
2020	ABNT NBR 16901:2020	GAC – Plano de Desativação de Empreendimentos com Potencial de Contaminação - Procedimento
	ABNT NBR 16784-1:2020	Reabilitação de Áreas Contaminadas – Plano de Intervenção – Parte 1
2015	ABNT NBR 16434:2015	Amostragem de Resíduos Sólidos, Solos e Sedimentos

	ABNT NBR 16435:2015	Controle de Qualidade na Amostragem para Fins de Investigação de Áreas Contaminadas
2014	Instrução Normativa nº 6/2014 do IBAMA	Atividade de Recuperação de Áreas Contaminadas ou Degradadas Devem ser Registradas no Cadastro CTF/APP
2013	ABNT NBR 16208:2013	Avaliação de Risco à Saúde Humana para fins de Gerenciamento de Áreas Contaminadas
	ABNT NBR 15515-3:2013	Passivo Ambiental em Solo e Água Subterrânea – Parte 3: Investigação Detalhada
2011	ABNT NBR 15515-2:2011.	Passivo Ambiental em Solo e Água Subterrânea – Parte 2: Investigação Confirmatória
	Instrução Normativa IBAMA nº 5/2010	Estabelece Procedimentos e Exigências para Utilização de Produtos Remediadores
2010	ABNT NBR 15471:2010	Amostragem de Água Subterrânea em Poços de Monitoramento: Métodos de Purga
	Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	Os Planos Estaduais de Resíduos Sólidos deverão identificar os passivos ambientais relacionados com os resíduos sólidos a serem objetos de recuperação ambiental
2009	Resolução CONAMA nº 420/2009 <sup>1</sup>	Estabelece critérios e valores orientadores de qualidade de solo quanto a presença de substâncias químicas e as diretrizes para gerenciamento ambiental dessas áreas contaminadas
	ABNT NBR 15495-2:2009	Poço de monitoramento de água subterrânea em aquíferos granulares – Parte 2: Desenvolvimento
2007	ABNT NBR 15495-1:2007	Poço de monitoramento de água subterrânea em aquíferos granulares – Parte 1: Projeto e Construção
	ABNT NBR 15492/2007	Sondagem de reconhecimento do solo para fins de qualidade ambiental - Procedimento
2005	ABNT NBR ISO/TEC 17025:2005	Requisitos Gerais para competências de laboratório e ensaios e calibração
2002	Lei nº 10406/2002	Teoria da responsabilidade civil objetiva por danos ambientais
2001	Lei nº 10257/2001 – Estatuto da Cidade	O Planejamento urbano de estabelecer o controle do uso do solo que prevê a obrigação de evitar a utilização inadequada de solo dos imóveis urbanos, a deterioração das áreas urbanizadas, bem como a poluição e degradação ambiental
2000	Lei nº 9.985/2000	Institui o sistema nacional de unidades de conservação da natureza, define recuperação e restauração de um ecossistema degradado.
	Resolução CONAMA nº 273/2000	Estabelece procedimentos para licenciamento ambiental e reparação de passivos ambientais ou de dano ambiental decorrente de acidentes ou vazamentos.
1998	Lei nº 9.605/1998	Lei de Crimes Ambientais – Crime de poluição aplicado a áreas contaminadas conforme art. 54 da mesma.

1989	Decreto nº 97.632/1989	Regulamenta o art. 2 da lei 6931/81, primeira lei que exige um plano de recuperação de áreas degradadas e de encerramento.
1988	Constituição Federal de 1988	Capítulo específico em relação a proteção ao meio ambiente e a necessidade de recuperação do dano causado
1985	Lei nº 7.347/1985	Cria-se o TAC (Termo de Ajustamento de Conduta) como instrumento para adequar suas condutas e as exigências legais com relação ao impacto ambiental causado.
1981	Política Nacional do Meio Ambiente	Lei Federal nº 6.938/81: Tem por objetivo geral a recuperação da qualidade ambiental, racionalização do uso do solo e recuperação de áreas degradadas, imposição do poluidor e ao predador a obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos ambientais causados sob ótica de responsabilidade civil em matéria ambiental.
1980	Lei nº 6.803/1980	Zoneamento Industrial nas Áreas Críticas de Poluição
1979	Lei nº 6.766/79	Vedação do parcelamento dos solos em terrenos onde tenha sido aterrado material nocivo a saúde pública sem saneamento prévio.
1975	Decreto-Lei nº 1413/75	Dispõe sobre o controle de poluição de meio ambiente provocada por atividades industriais
1934	Decreto nº 23.793/34	Código Florestal, assegura as condições de insalubridade pública em áreas públicas.

<sup>1</sup> Primeira Norma Federal sob Âmbito específico atuante no cenário de gestão de áreas contaminadas.

Fonte: adaptado de IPT (2019)

De forma geral, entendendo a ocorrência de legislações vigentes no cenário nacional, entende-se que as legislações, decretos e leis entre a década de 1970 e anos 2000 trata de aspectos gerais vinculados ao meio ambiente, não determinando e especificando ao termo de áreas contaminadas. Com o passar dos anos, a partir de 2005, especificamente, inicia-se uma série de normas regulamentadoras que vinculam seus objetivos com os aspectos de áreas contaminadas, sendo assim, encorpando à terminologia áreas contaminadas com o contexto normativo nacional. Onde, em 2009, observa-se a criação da primeira resolução nacional estabelecida pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) sob âmbito tratativo direto ao escopo do gerenciamento de áreas contaminadas, que por sua vez, se dispõe a partir da criação de valores orientadores normativos que devem ser comparados a fim de determinar a condição de uma área de estudo sob ótica de diferentes unidades avaliadas, seja ela para uso residencial, industrial ou agrícola.

Além do exemplo da federação, a partir da criação da Resolução CONAMA 420 de 2009, alguns estados como o estado de São Paulo e do Rio de Janeiro apresentaram também suas resoluções estaduais a fim de avaliar o cenário ambiental sob ótica do gerenciamento de

áreas contaminadas. O Rio de Janeiro, a partir da Resolução nº 44 de 14 de dezembro de 2012, estabelece e dispõe “*sobre a obrigatoriedade da identificação de eventual contaminação ambiental do solo e das águas subterrâneas pro agentes químicos, no processo de licenciamento ambiental estadual*”, tal resolução tem por um dos seus objetivos o controle da qualidade do solo e água subterrânea de forma sustentável tendo em vista a recuperação e reabilitação dessas áreas para garantia de uso social, econômico e ambiental das mesmas. Não obstante ao cenário estadual do Rio de Janeiro, também se apresenta, uma outra resolução a Resolução nº 46 de 10 de maio de 2013 que aprova a NOP-INEA-05 sob tratativa ao licenciamento ambiental e encerramento de poços revendedores de combustíveis líquidos e gás natural. Esta é uma legislação específica, mas tendo em vista o cenário de potencial poluidor que é a atividade de postos de combustíveis em detrimento ao aspecto evolutivo da ocorrência de áreas de contaminação, faz-se necessário situa-la sob âmbito agregador ao sistema de gerenciamento de áreas contaminadas.

#### **2.4 Contaminantes em Água Subterrânea**

A água subterrânea tende a apresentar um aspecto límpido pois, naturalmente, o solo filtra os materiais particulados, mas não obstante, fontes naturais e produzidas antropicamente podem ser achadas em água subterrânea. À medida em que a água subterrânea flui através do solo, metais como ferro e manganês são dissolvidos e podem mais tarde ser encontrados em altas concentrações na água. Descargas industriais, atividades urbanas, agricultura, bombeamento de águas subterrâneas e eliminação de resíduos podem afetar a qualidade das águas subterrâneas. Os contaminantes podem ser induzidos pelo homem, como vazamentos em tanques de combustível ou derramamentos de produtos químicos tóxicos (USGS, 2020). Um dos compostos mais presentes em água subterrânea como contaminação são os compostos orgânicos voláteis, a exemplo do benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, bem como hidrocarbonetos totais de petróleo e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.

Esses hidrocarbonetos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) são hidrocarbonetos monoaromáticos e por características são os constituintes mais solúveis e mais móveis da fração da gasolina (SILVA et al., 2002). O benzeno é um hidrocarboneto aromático líquido, límpido, incolor, altamente inflamável e volátil, com um odor semelhante ao da gasolina. O benzeno é encontrado em óleos crus e como subproduto dos processos de refino de petróleo. Na indústria, o benzeno é usado como solvente, como intermediário químico e na síntese de vários produtos químicos. A exposição a esta substância causa



sintomas neurológicos e afeta a medula óssea causando anemia aplástica, sangramento excessivo e danos ao sistema imunológico (NIH, 2021). Os demais compostos correspondentes, como o tolueno, etilbenzeno e xilenos são compostos que apresentam em sua estrutura molecular o anel aromático do benzeno, seguido de radicais metil, etil e dimetil, respectivamente.

Em água subterrânea a contaminação por esses compostos hidrocarbonetos de cadeia leve como os BTEX dar-se-ão comumente a partir de vazamentos originários dos sistemas de abastecimento subterrâneo de combustíveis (SASC). Um SASC, segundo EPA (2020), é um tanque de armazenamento e/ou qualquer linha de tubulação subterrânea conectada ao tanque que tenha pelo menos 10% de volume combinado no subsolo. E um sistema de abastecimento de combustíveis pode apresentar valores a serem considerados quando comparado ao seu impacto ao meio ambiente. Até a década de 80, a maioria dos tanques de armazenamento de combustíveis subterrâneos eram formados por aço puro que são facilmente corrosíveis que permite os combustíveis armazenados percolar através da corrosão e impactar o meio ambiente.

Além disso, conforme a EPA (2020), a instalação defeituosa ou os procedimentos de operação e manutenção inadequados também podem fazer com que os SASCs liberem seu conteúdo ao meio ambiente. O maior perigo potencial de um vazamento de SASC é que o petróleo ou outra substância perigosa pode infiltrar-se no solo e contaminar as águas subterrâneas, a fonte de água potável para quase metade de todos os norte-americanos. Um vazamento de SASC pode apresentar outros riscos à saúde e ao meio ambiente, incluindo o potencial de incêndio e explosão.

Em relação à contaminação, as formas de medições em concentrações de substâncias químicas de interesse em água subterrânea para avaliação de contaminantes vinculados ao petróleo estão os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e os hidrocarbonetos totais de petróleo, representados pelas siglas PAHs e TPHs. As áreas contaminadas por hidrocarbonetos, segundo ITRC (2015), de petróleo são áreas cujas formas nas quais estes hidrocarbonetos estão presentes são variadas, pois são misturas complexas de compostos com propriedades físicas e químicas distintas entre si, bem como abrangentes. Desta forma, a mistura complexa do hidrocarboneto em meio subterrâneo tende a mudar devido a diversos processos de intemperismo (volatilização, dissolução, biodegradação, oxidação, dentre outros).

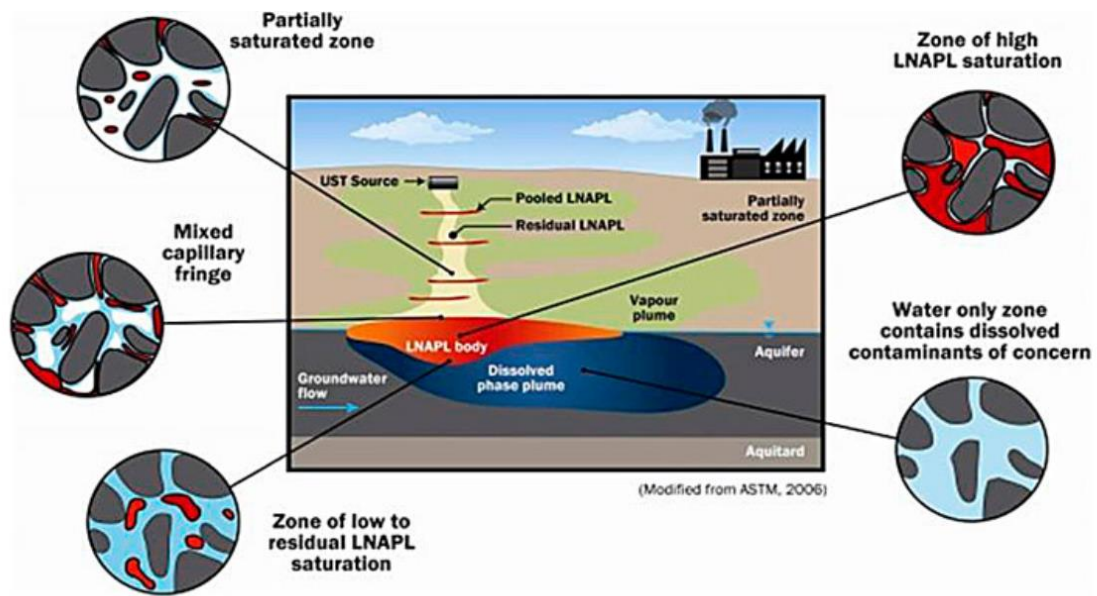
Devido a esses fatores de mudanças de formas de estado físico e químico dessas substâncias em água subterrânea, a forma de quantificação dessas misturas complexas é

determinada a partir da obtenção da concentração de TPH (hidrocarbonetos totais de petróleo) em água subterrânea. Segundo o ITRC (2015), essa métrica permite a quantificação dos hidrocarbonetos totais de petróleo em água subterrânea sem a identificação das substâncias químicas de interesse de forma individual, sendo definida como a porção de hidrocarbonetos derivados de petróleo no meio de avaliação pré-determinado. Outro aspecto importante apontado pelo ITRC (2015) é que esta mistura ao longo do tempo vai mudando a sua forma intemperizada, isto é, ela tende a degradar por diversos fatores ao longo do tempo.

Como apresentado anteriormente, os SASCs instalados em postos de gasolinas são responsáveis por grandes números de contaminação de água subterrânea, sendo assim, as principais fontes de contaminação por petróleo são tanques corroídos instalados em meio subterrâneo (FOSTER, 2002). Um pouco além do conhecimento da fonte de contaminação, pode-se entender que após o vazamento ocorrido do óleo derivado de petróleo, o mesmo pode ficar adsorvido em solo e atingir os níveis de lençóis freáticos no local da área interesse, isto é, atingir a água subterrânea (área não-vadosa). O óleo que atinge o lençol freático, normalmente, é não-miscível a água subterrânea e ele tende a ficar em diferentes formas devido a oscilação natural/sazonal do lençol freático. Isto é, o óleo pode estar presente em diferentes níveis de saturação no solo, competindo com a ocorrência de água e ar nos vazios que se interconectam entre as partículas do solo.

A Figura 4 apresenta as múltiplas formas nas quais o óleo sobrenadante à água subterrânea pós vazamento pode estar presente no meio subterrâneo avaliado. Atenta-se que a medição de hidrocarbonetos derivados de petróleo, em água subterrânea, é feita a partir da medição unicamente da porção dissolvida dos contaminantes no meio avaliado.

Figura 4 - Sistema multi formas de óleo presente em água subterrânea.



Fonte: ITRC (2018)

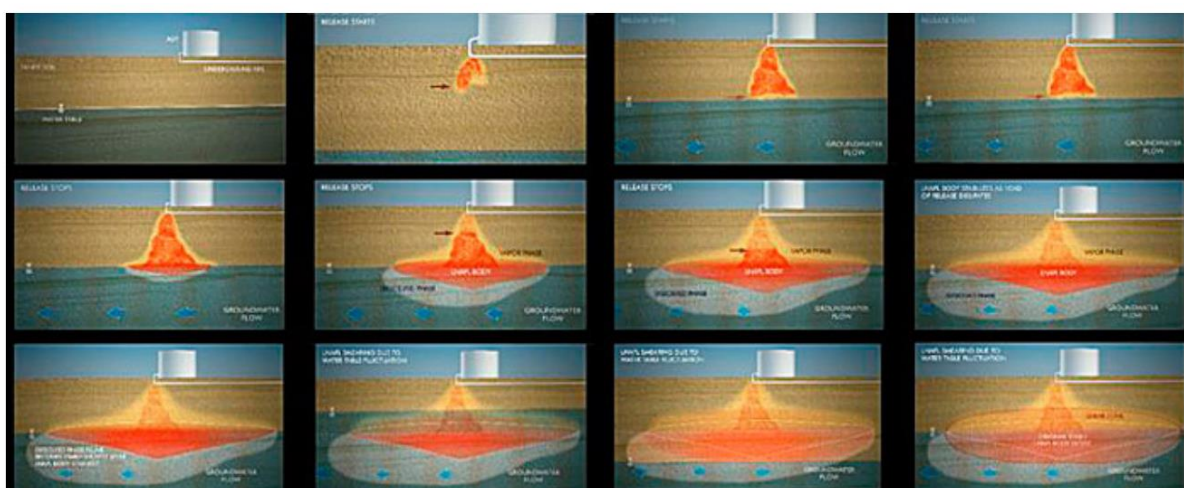
Como se pode observar e avaliar, a ocorrência de óleo em meio subterrâneo, é um sistema multifásico onde os espaços vazios que se interconectam no solo contêm quantidades variáveis de óleo, água subterrânea e gases com relação ao nível de lençol freático da área de interesse, seja abaixo ou acima desta carga hidráulica referenciada. Segundo o ITRC (2018), a extensão espacial do óleo no meio subterrâneo é predominantemente ocupada pela água subterrânea, seguido por níveis de saturação de óleo no meio, e por uma fração menor de gás ocupando os poros de solo.

Não obstante, de acordo com ITRC (2018), quando ocorre uma liberação de óleo no meio ambiente (meio subterrâneo), o óleo se moverá verticalmente para baixo sob a influência da gravidade através das vias permeáveis (por exemplo, solo não consolidado, fraturas e macroporos) e, se volume e carga de óleo no meio gerado pelo vazamento for considerável, a borra de óleo tende a atingir o lençol freático local. Durante o movimento descendente através do solo, a presença de camadas confinantes, heterogeneidades subsuperficiais ou outras vias preferenciais podem resultar em espalhamento lateral irregular e complexo e/ou retenção do óleo antes que o lençol freático seja encontrado.

Uma vez no lençol freático, o óleo sobrenadante à água subterrânea (fase livre) se espalhará lateralmente de forma radial, bem como penetrará verticalmente para baixo na zona saturada, deslocando a água a alguma profundidade proporcional à força motriz da coluna de óleo presente na vertical. A infiltração vertical do corpo de óleo na zona saturada continuará a

ocorrer enquanto a força descendente produzida pelo óleo ou a pressão da liberação do óleo exceder as forças contrárias produzidas pela resistência da matriz do solo e a fluatibilidade resultante da diferença de densidade entre o óleo e a água subterrânea. Conceitualmente, as representações conceituais de um vazamento de óleo e a estabilização inicial de um corpo de LNAPL são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Sistema multi formas de óleo presente em água subterrânea.



Fonte: ITRC (2018)

Após o óleo, segundo ITRC (2018), atingir a zona saturada do solo, a fase livre pode ocorrer em diferentes formas na zona não-vadosa, quando a fase livre encontra-se trapeada e comumente não móvel, o primeiro processo de atenuação descontínua da fase livre é a dissolução da mesma em fase aquosa, isto é, a mesma dilui em água subterrânea, ou seja os constituintes como hidrocarbonetos tendem a aumentar em suas respectivas concentrações em água subterrânea. Desta forma, justifica-se a métrica de que as medições das substâncias químicas de interesse tendem a serem feitas a partir da análise de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e hidrocarbonetos totais de petróleo.

## 2.5 Vulnerabilidade à contaminação de água subterrânea

Considerando a abordagem do presente trabalho, é evidente que a gestão de recursos hídricos subterrâneos e a gestão de áreas contaminadas de uma região são tópicos a serem abordados para a promoção e benefício da qualidade da água subterrânea e verificação de potenciais perigos e riscos à contaminação do lençol freático local. Segundo Foster et al.

(2006), na abordagem do perigo à contaminação de água subterrânea é importante considerar dois principais conceitos, são eles: a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação e a presença da carga de contaminante no meio como resultado da atividade humana. A combinação de ambos os fatores pode levar a conclusão a diferentes tipos de cenários relacionando perigo envolvente com a vulnerabilidade e à presença de contaminante no meio subterrâneo.

Entende-se como vulnerabilidade em água subterrânea, segundo a ASTM (2008), “a relativa facilidade com o qual um contaminante pode migrar para as águas subterrâneas ou aquífero de interesse de acordo com uso do solo, características do contaminante e condições de sensibilidade da matriz”. Em outras palavras, conforme Foster et al. (2006) a vulnerabilidade do aquífero está associada à condição da percolação da carga de contaminante no sentido hidráulico ao nível de água subterrânea e, também, à capacidade de atenuação natural de um contaminante tendo em vista as características físico químicas da zona saturada do local da área de estudo. Sua aplicabilidade está relacionada a esferas municipais e estaduais, no entanto, a tratativa individual para área de interesse (quer seja um empreendimento) apresenta dificuldades administrativas e recursos financeiros consideráveis para a pesquisa de campo.

O mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminante é de importância mútua para a gestão territorial de um local. Tendo em vista que o mesmo fornece uma estrutura para planejamento e controle das atividades na superfície do terreno selecionado para estudo. Segundo a ASTM (2008), os métodos para acessibilidade da vulnerabilidade de um aquífero permitem que os usuários de água subterrânea tenham acesso a informações para tomada de decisão do uso e ocupação do solo e gerenciamento da água subterrânea baseado nos valores de vulnerabilidade levando em consideração a água subterrânea e o aquífero local. Ainda, ASTM (2008) aponta que a maioria dos métodos de avaliação de vulnerabilidade à água subterrânea são desenvolvidos para avaliação de áreas regionais amplas para auxiliar a esfera pública local, estadual e federal para identificar e priorizar áreas onde as avaliações mais detalhadas se fazem necessárias ajudando, assim, no desenvolvimento da gestão de água subterrânea da área de interesse.

Neste cenário, considerando perigo à contaminação, a aplicação de métodos referentes ao mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero de uma determinada região faz-se necessária no contexto de gestão de recursos hídricos subterrâneos. Os métodos associados ao conceito apresentado anteriormente e constantemente utilizado pela bibliografia são: GOD, DRASTIC e POSH (do inglês *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*). Os dois primeiros

métodos listados anteriormente, GOD e DRASTIC, são métodos focados para o cálculo da vulnerabilidade natural do aquífero, enquanto que o POSH é um outro método responsável pelo levantamento das fontes potenciais de carga contaminante de subsolo. Concomitantemente, a união entre ambos os métodos POSH e GOD ou DRASTIC determina o perigo de contaminação do aquífero.

O método GOD é um método, segundo Foster *et al* (2006), amplamente utilizado na América Latina e apresenta um grau simplificado conceitualmente, bem como, de aplicação. O método determina o grau de vulnerabilidade do aquífero local à contaminação a partir de um índice cujo cálculo leva em consideração o produto de 3 (três) diferentes tipos de parâmetros, sendo eles: Grau de confinamento da água subterrânea (G) – refere-se ao confinamento hidráulico da água subterrânea no aquífero em questão; Ocorrência de estrato de cobertura na zona vadosa (O) – característica litológica e grau de consolidação da zona vadosa ou camada confinante; distância até o lençol freático ou teto do aquífero confinado (D).

$$\text{Vulnerabilidade Natural} = G \times O \times D \quad (1)$$

Onde:

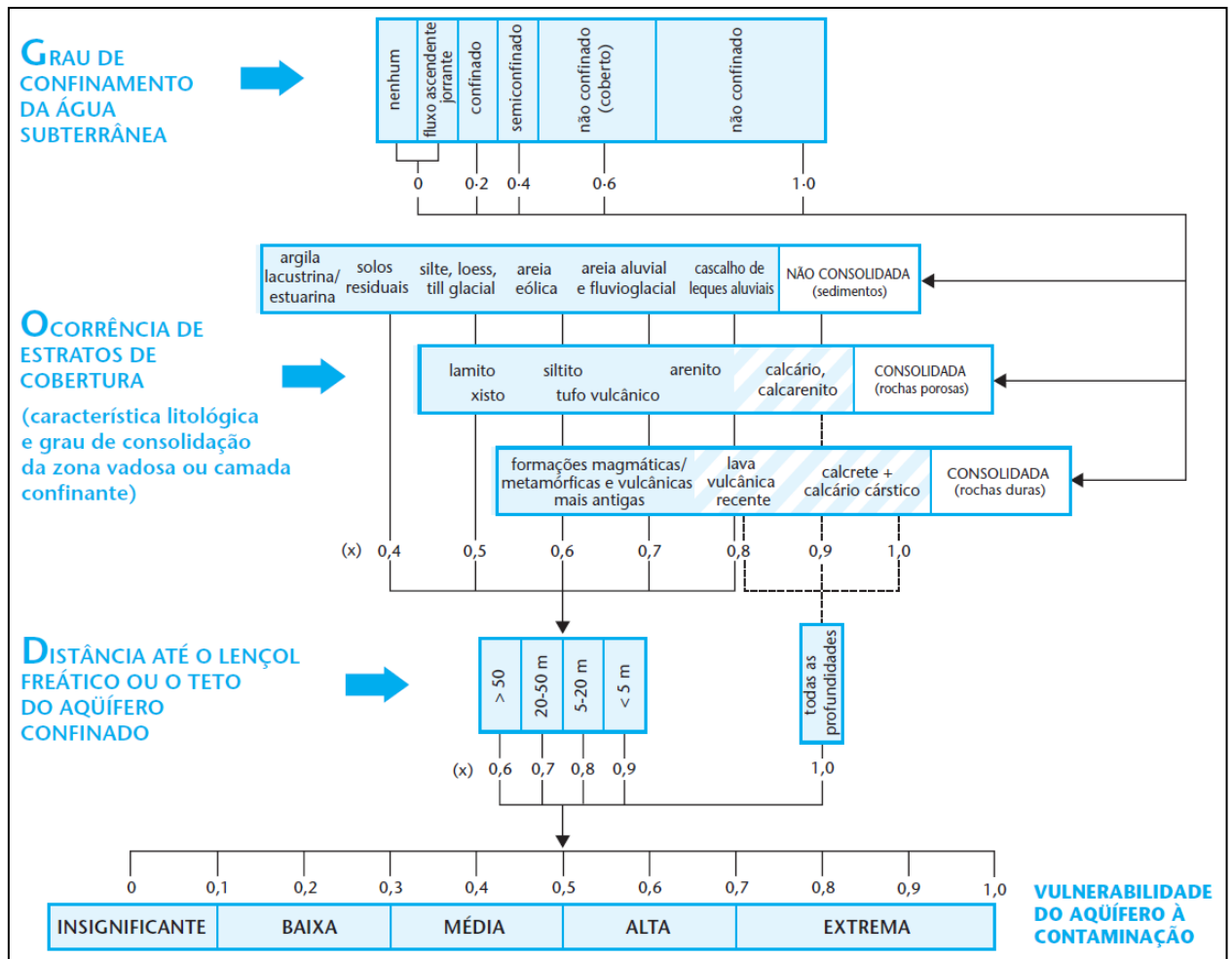
(G) – Grau de confinamento da água subterrânea (0 – 1,0)

(O) – Ocorrência de estrato de cobertura (0,4 – 1,0)

(D) – Distância até o lençol freático ou teto do aquífero confinado (0,6 - 1,0)

A Figura 6 apresenta o esquema simplificado do método do sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

Figura 6 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação



Fonte: Foster et al. (2006)

Pode-se verificar que a vulnerabilidade do aquífero à contaminação é resultante do fator dentre estes parâmetros citados anteriormente. Como resultado, a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação pode-se se tornar insignificante em caso de o índice variar entre 0-0,1, baixa (0,1-0,3), média (0,3-0,5), alta (0,5-0,7) e extrema (0,7 até 1,0). Representativamente, os resultados de vulnerabilidade pontuais e individuais calculados por poços avaliados, são interpolados entre si gerando mapas de vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

Segundo Junior et al. (2015) e Meira (2014), o método IDW (*Inverse Distance Weighted*), são os métodos mais utilizados para interpolação dos dados pontuais de cada unidade avaliada, desta forma há a ponderação entre os valores de resultados de GOD calculados pelo inverso da distância entre eles. Ainda segundo Junior et al (2015), tal método trabalha com a média ponderada euclidiana entre os pontos, onde sua utilização transforma valores pontuais em uma imagem representando os pesos aproximados para a área em questão

avaliada. Ainda, de acordo com Karyab (2017), é um método aplicado para determinar a interpolação multivariada com um conjunto de conhecidos pontos espalhados. Os valores atribuídos a pontos desconhecidos são calculados com uma média ponderada dos valores disponíveis nos pontos conhecidos. Tal método, segundo Karyab (2017), é aplicado para identificação de variabilidades vinculadas a água subterrânea em áreas formadas por planícies.

Sob a ótica da bibliografia atual, determina-se, outros métodos para o cálculo da vulnerabilidade de aquífero à contaminação. Segundo Foster *et al.* (2002) um dos mais usados é o DRASTIC que é um método que usa sistemas paramétricos como indicadores de vulnerabilidade que aplicam seus valores para determinar o índice através de valores absolutos ou relativos. A forma de quantificação para obtenção do índice de vulnerabilidade é de forma relativa através da soma dos índices ponderados obtidos através das variáveis hidrogeológicas.

As variáveis hidrogeológicas referentes ao método são: Distância até a água subterrânea, taxas de recarga natural, meio aquífero, solo, aspecto topográfico, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica da zona saturada. Segundo Puerari, Costa e Castro (2003), o índice de vulnerabilidade é calculado a partir do somatório do produto dos diferentes parâmetros por índice de ponderação (1 a 5), a ponderação é determinada a partir do tipo de contaminante presente na água subterrânea, a fórmula regente do método DRASTIC é calculada conforme a seguir:

$$\text{Índice de Vulnerabilidade} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

Onde:

(D) – Profundidade do Lençol Freático;

(R) – Recarga do Aquífero;

(A) – Litologia do Aquífero;

(S) – Tipo de Solo;

(T) – Topografia da área;

(I) – Impacto da Zona Não Saturada;

(C) – Permeabilidade do Aquífero.

(r) – valor obtido para cada parâmetro

(w) – é o índice de ponderação



Segundo EPA (1987), os índices vinculados a litologia do aquífero, tipo de solo e impacto da zona não saturada são determinados a partir do tipo de litologia de cada parâmetro, isto é, sob uma ótica que se referencia a uma mesma base de dados a ser utilizado, isto é, a litologia. Foster *et al.* (2002), indica que, os valores resultantes do método aplicado podem ter importância de vulnerabilidade muito vaga, tendo em vista, que pode haver um excesso de interação entre parâmetros ponderados os quais apresentam forte correlação e sobreposição entre si podendo ter resultados similares de vulnerabilidade. Dessa forma, atenta-se que tal metodologia sob carência de dados concretos podem gerar dubialidade da produção e cálculo do índice final de vulnerabilidade. Entretanto, é um método que contrapõe outras metodologias mais utilizadas e pode ser utilizado para fins comparativos, sendo limitado para fins de tomada de decisão.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

A metodologia do presente trabalho baseou-se na pesquisa bibliográfica através dos documentos, artigos, periódicos, livros, legislações e outras fontes de informações a fim de agregar e contribuir com o tema proposto.

#### **3.1 Caracterização da área de estudo**

##### 3.1.1 Localização, descrição e caracterização do uso de recursos hídricos subterrâneos da área de interesse

Tendo em vista à aplicabilidade do método referente a identificação de áreas de vulnerabilidade ao aquífero local, objetiva-se estudar a área compreendida entre as regiões administrativas do bairro da Tijuca, Vila Isabel e Rio Comprido, bairros situados na zona norte da cidade do Rio de Janeiro. Este capítulo visa entender o funcionamento do sistema de abastecimento de água nestes bairros e suas dependências frente ao consumo de água subterrânea local, bem como, características geológicas e hidrogeológicas da área de estudo.

A área de estudo encontra-se localizada sob a região hidrográfica da baía de Guanabara (RH V), contudo, segundo INEA (2018), entende-se que a região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, incluída, assim, a região do bairro da Tijuca, é abastecida, em

relação aos seus recursos hídricos, pelo sistema de abastecimento de água do rio Guandu localizado na região hidrográfica do rio Guandu (RH II). Em específico, a área de estudo, segundo INEA (2019), encontra-se localizada parcialmente na sub-bacia do Rio do Mangue. Entretanto, historicamente, as águas dos mananciais do bairro da Tijuca, no final do século XVIII, foram utilizadas para abastecer a população tendo em vista o cenário deficiente no serviço de abastecimento público, muito por conta das condições políticas apresentadas em época (CEDAE, 2019). Dentre os principais mananciais explorados no século XIX e princípio do século XX destaca-se o da Tijuca (Maracanã, São João, Trapicheiro, Andaraí, Gávea Pequena e Cascatinha). Contudo, no atual quadro de abastecimento de água, estes mananciais representam cerca de 1% do consumo de água do Rio de Janeiro e da Baixada Fluminense.

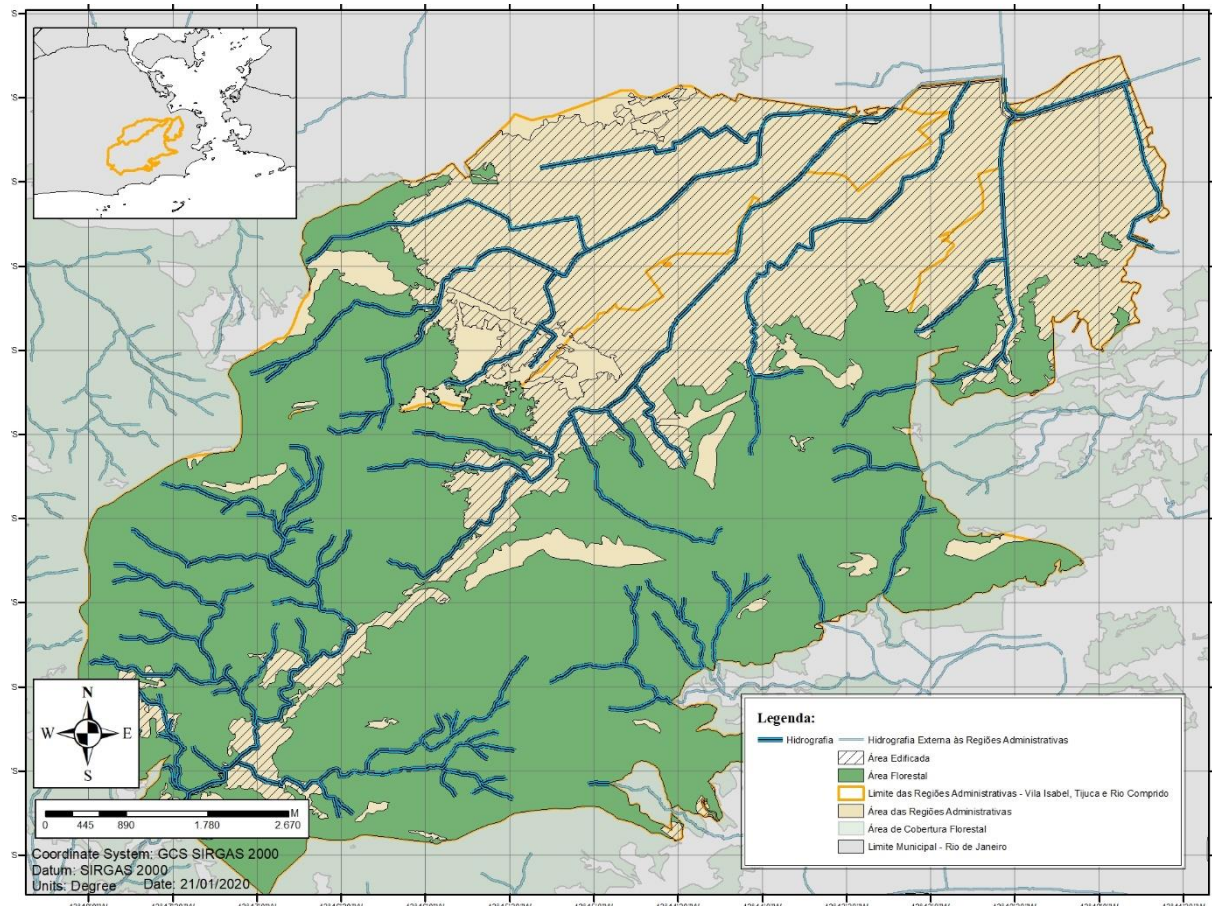
Segundo o atlas de mananciais de abastecimento público do estado do Rio de Janeiro, a região administrativa da área do bairro da Tijuca e suas redondezas contempla o Parque Nacional da Tijuca, uma unidade de conservação federal, que apresenta como característica o grupamento para fins de proteção integral, onde, segundo BRASIL (2000), as áreas de proteção integral se destinam para a “a manutenção dos ecossistemas livres de alterações causadas por interferência humana, admitido apenas o uso indireto dos seus atributos naturais”. Desta forma, faz-se necessário identificar tal região como uma área prioritária para restauração florestal tendo em vista a recuperação hídrica destes mananciais em questão.

Tendo em vista o cenário restrito de captação de água superficial da região administrativa do bairro da Tijuca devido ao parque nacional da Tijuca, mananciais de proteção integral, bem como, a limitação ao abastecimento de água frente ao sistema de abastecimento urbano oriundo da distribuição de água a partir da ETA do Guandu, alternativas de captação de recursos hídricos fazem-se necessárias, uma das formas de captação de recurso hídrico associada é a água subterrânea. Na Figura 7 encontra-se localizada a região de interesse de estudo do presente trabalho.

Além disso, a região do bairro caracteriza-se por ser uma região com desenvolvimento urbano sem regular segmentação. Segundo dados da prefeitura do rio de janeiro (2019), a Tijuca classifica-se como o 18º bairro com maior renda per capita da cidade do rio de janeiro com nível de IDH de 0,926. Desta forma, a inacessibilidade de conhecimento e a falta de renda pode ser um fato limitante ao acesso de informação ou interesse sobre a qualidade de recurso hídrico consumida na região. Seu elevado grau de sanitização também leva o uso de água subterrânea como uma fonte alternativa ao sistema de abastecimento urbano, levando assim a um desinteresse oportuno da continuidade da desinformação por parte da população,

tendo em vista o receio em atribuir taxações mediante ao consumo de água subterrânea declarado.

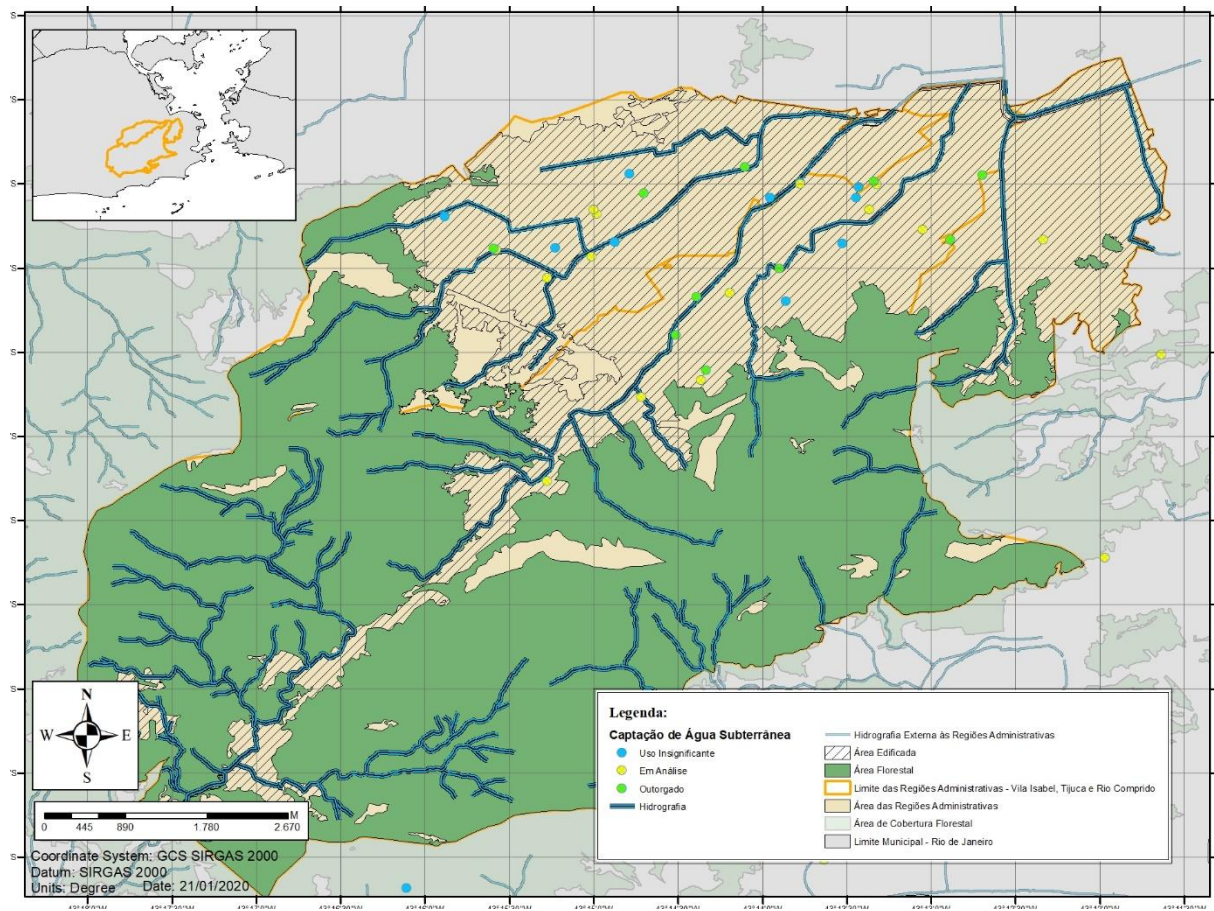
Figura 7 - Localização da área de estudo.



Fonte: O autor (2020)

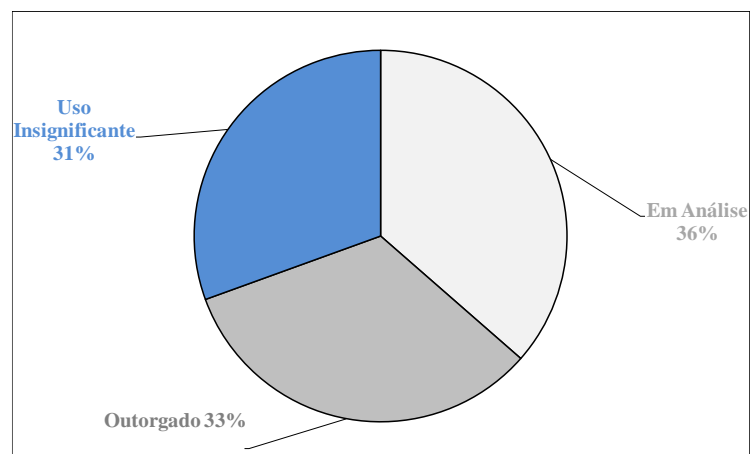
Em relação ao aspecto de captação de água subterrânea da área de estudo pode-se destacar que a partir dos dados oriundos do cadastro nacional de usuários de recursos hídricos para o estado do Rio de Janeiro, cerca 21% do cadastro encontra-se localizado na cidade do Rio de Janeiro. Dentre os usuários cadastrados da cidade do Rio de Janeiro as regiões administrativas do bairro da Tijuca, Vila Isabel e Rio Comprido apresentaram em março/2019, 41 captações de água subterrânea cadastradas, sendo que cerca de 29% das captações se destinam ao uso insignificante, 27% se destinam ao uso outorgado e 44% apresentam sob status de análise. Os Gráfico 1 e 2 apresentam tais relações entre o consumo de água subterrânea e suas classes de utilização na cidade do Rio de Janeiro e na área de interesse em questão. A Figura 8 identifica geoespacialmente os pontos de captação de água subterrânea cadastrados no CNARH40 até março/2019 onde encontram-se categorizados sob os seus respectivos tipos de uso (em análise, uso insignificante ou uso outorgável).

Figura 8 - Identificação dos poços de captação de água subterrânea cadastrados no CNARH40 categorizados pelos seus respectivos tipos de uso – Março/2019.



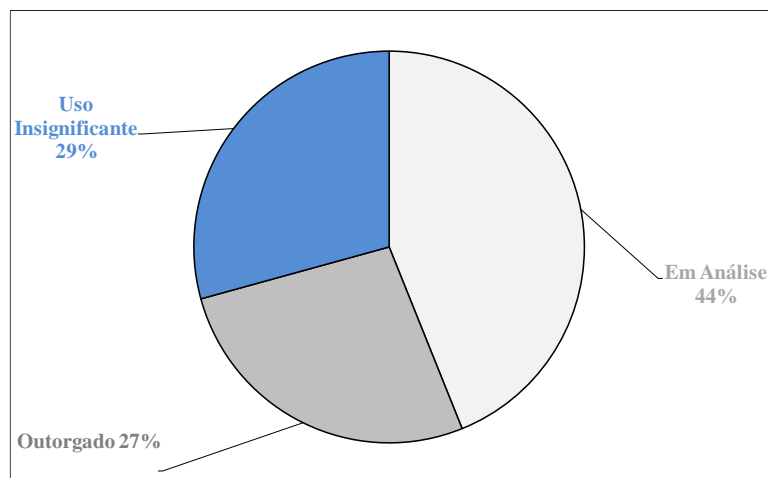
Fonte: O autor (2020)

Gráfico 1 - Distribuição do deferimento do tipo de uso de recursos hídricos subterrâneos do município do Rio de Janeiro – CNARH40 – Março/2019



Fonte: CNARH40 (2019)

Gráfico 2 - Distribuição do deferimento do tipo de uso de recursos hídricos subterrâneos das regiões administrativas dos bairros da Tijuca, Vila Isabel e Rio Comprido – CNARH40 – Março/2019



Fonte: CNARH40 (2019)

Tendo em vista o cenário apresentado anteriormente do consumo de recurso hídrico sob análise, tal trabalho poderá servir como forma de subsidiar tomadas de decisões para identificação dos usos presentes e futuros da região de interesse. Pois, de acordo com INEA (2019), “locação de poço e o regime de bombeamento serão avaliados segundo seus riscos potenciais considerando a vulnerabilidade provocada por processos antropogênicos a partir de ações que ofereça suscetibilidade às águas subterrâneas”, o aspecto relacionado a vulnerabilidade da água subterrânea encontra-se relacionado em aspectos normativos estabelecidos pelo órgão ambiental responsável.

### 3.1.2 Caracterização geológica e hidrogeológica da área de interesse

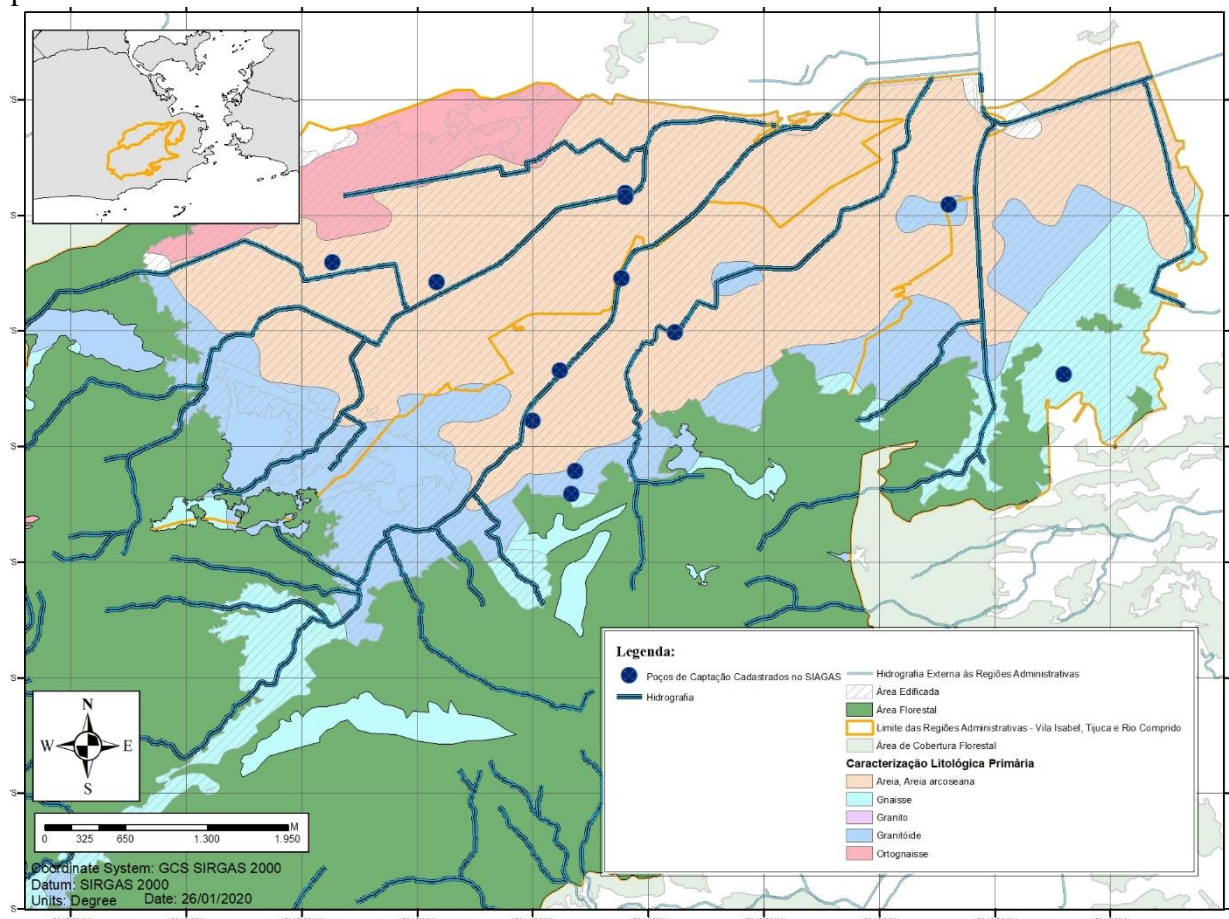
Conforme apresentado anteriormente, o entendimento das características geológicas da região de interesse é de importante conhecimento pois servirá de insumo para a elaboração dos relatórios de caracterização hidrogeológica da área de interesse, bem como a identificação de unidades litológicas principais da área de estudo.

De acordo com o mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro CPRM (2016), a área de estudo encontra-se centralizada sobre depósitos aluviais formados por barras arenosas, planícies de inundação e áreas de preenchimento de canal. Ainda, de acordo, a base de dados fornecida pelo CPRM, tal região de depósitos aluviais apresenta como característica principal a litologia primária associada à areias e areias arcoseanas. Além disso, de acordo com o CPRM (2016), em áreas próximas ao maciço da Tijuca, a região apresenta a formação de rochas mais consolidadas do tipo granitoides intrusivos e/ou



híbridos. Ainda, segundo o CPRM (2015), correlacionando informações da carta hidrogeológica, a área de estudo encontra-se localizada sobre uma área com caracterização hidrogeológicas com extensão regional de caráter predominantemente livre e de grande heterogeneidade, onde sua produtividade encontra-se condicionada à presença de fraturas. De maneira geral, frente a feição dos níveis de água estáticos dos poços de bombeamento cadastrados e disponibilizados pelo CPRM (2020) na plataforma do sistema de informação de água subterrânea, a região apresenta cerca de 85% dos seus poços de captação de água subterrânea, com distância até o lençol freático menores que 5 metros. A Figura 9 apresenta a distribuição das características da descrição da litologia primária fornecida pela base dados do Serviço Geológico do Brasil.

Figura 9 - Distribuição geoespacial dos poços de captação de água subterrânea disponíveis pelo SIAGAS e identificação das características da descrição da litologia primária fornecida pela base de dados do CPRM.



Fonte: o Autor (2020)

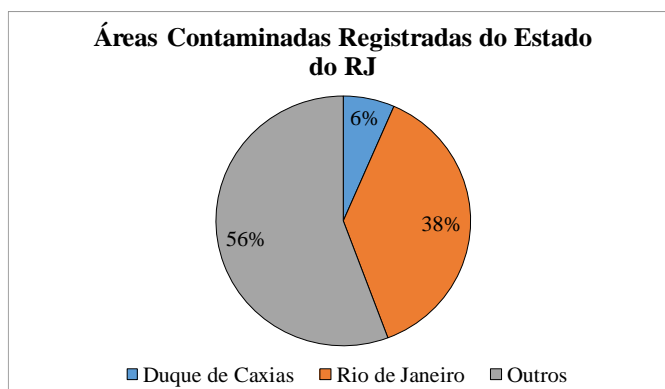
A partir da visualização da localização dos poços de captação cadastrados no SIAGAS e da descrição da caracterização litológica primária estabelecidos por estudos científicos do CPRM, pode-se observar que a distribuição geoespacial dos poços de captação de água

subterrânea contempla boa parte da região de interesse, desta forma, é de interesse aplicar os métodos para identificação de vulnerabilidade natural da água subterrânea da região de interesse.

### 3.1.3 Caracterização da área de estudo com relação a presença de áreas contaminadas e reabilitadas

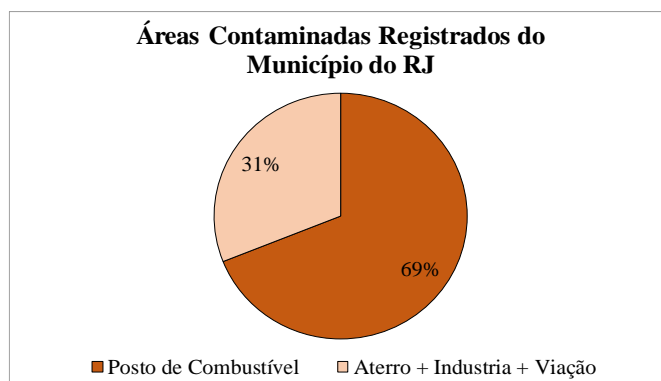
Em relação às áreas consideradas contaminadas no estado do RJ pode-se verificar que cerca de 38% das áreas registradas contaminadas encontram-se localizadas no município do Rio de Janeiro (INEA, 2015). As áreas contaminadas foram segregadas por diferentes tipos de atividades, sendo elas: Industrial, Aterro, Aviação e Posto de Combustíveis; e é válido ressaltar que em relação às áreas contaminadas, no município do Rio de Janeiro, cerca de 69% corresponde a imóveis sob atividade de posto de combustível, totalizando, 80 imóveis com registro de contaminação (INEA, 2015). Os Gráfico 3 e 4 apresentam a relação de áreas contaminadas no estado do Rio de Janeiro e a relação das atividades frente ao registro de contaminação na cidade do Rio de Janeiro.

Gráfico 3 – Distribuição municipal do cadastro de áreas contaminadas registradas no INEA do estado do Rio de Janeiro



Fonte: INEA (2015)

Gráfico 4 – Relação entre as fontes das áreas contaminadas registradas no município do Rio de Janeiro



Fonte: INEA (2015)

De acordo com a base de dados do INEA (2015) referente ao cadastro de áreas contaminadas e reabilitadas do estado do Rio de Janeiro, a área de estudo apresenta cerca de 9 (nove) postos de combustíveis registrados no cadastro de áreas contaminadas, bem como, 1 (uma) unidade de viação como unidades potencialmente poluidoras à contaminação do solo e das águas subterrâneas. Dentre as principais classes de contaminantes presentes no meio e em água subterrânea destacam-se substâncias químicas, como por exemplo, benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, dentre outras identificadas. É válido ressaltar que as áreas consideradas contaminadas se encontram cadastradas sob diferentes classificações, dentre elas, nomeiam-se: AI (Área Contaminada sob Investigação); ACI (Área Contaminada sob Intervenção); AMR (Área em Processo de Monitoramento e Remediação) e AR (Área Reabilitada para o Uso Declarado). A Tabela 5 apresenta a relação do cadastro de áreas consideradas contaminadas e reabilitadas da região da área de estudo.

Além disso, a partir do cadastro de áreas contaminadas e reabilitadas disponibilizados pelo INEA, foi possível identifica-las geoespacialmente conforme apresentado na Figura 10 onde pode-se identificar as áreas listadas na tabela abaixo e suas respectivas classificações, contaminação em água subterrânea no meio em questão e suas medidas de intervenções adotadas.



Tabela 5 – Identificação das fontes poluidoras registradas no cadastro de áreas contaminadas e reabilitadas do INEA (2015)

ID da Área	Atividade	Situação	Uso Atual	Contaminação em Água Subterrânea	Medida de Intervenção	Classificação
A1	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX, PAH e TPH	-	AI
A2	Viação	Desativada	Comercial	-	Escavação do Solo / Remoção de Produtos e Resíduos / Monitoramento Ambiental	AR
A3	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX e PAH	Bomb. e Tratamento	ACI
A4	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX e PAH	Extração Multifásica (MPE)	AI
A5	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX, PAH e TPH	-	AI
A6	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX, PAH e TPH	Monit. Ambiental /	AMR
A7	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX e PAH	Bomb. e Tratamento	AMR
A8	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX, PAH e TPH	-	ACI
A9	Posto de Combustíveis	Ativo	Comercial	BTEX e PAH	Restrição ao Uso de Água Subterrânea	AMR
A10	Posto de Combustíveis	Desativado	Comercial	BTEX e PAH	Restrição ao Uso de Água Subterrânea	AR

Legenda:

BTEX – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos

PAH – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

Bomb. – Bombeamento

Monit. – Monitoramento

AI – Área Contaminada Sob Investigação

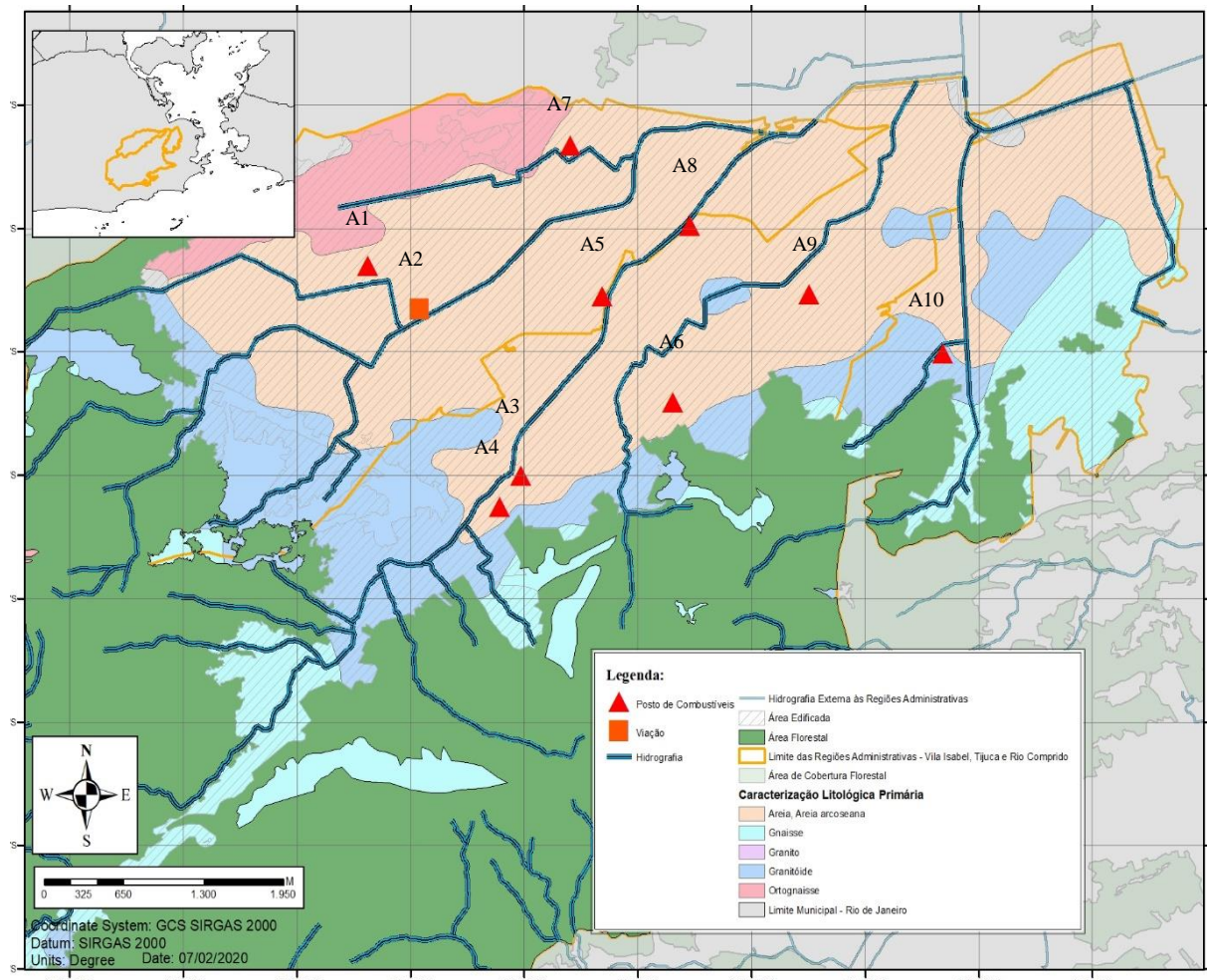
ACI – Área Contaminada Sob Intervenção

AMR – Área em Processo de Monitoramento e Remediação

AR – Área Reabilitada p/ o Uso Declarado

Fonte: INEA (2015)

Figura 10 - Distribuição geoespacial das áreas consideradas contaminadas e/ou reabilitadas pelo cadastro estabelecido pelo INEA (2021)



Fonte: o Autor (2020)

Desta forma, pode-se observar que a área de estudo apresenta em sua composição 10 áreas consideradas contaminadas e reabilitadas, sendo, 9 delas postos de combustíveis e 1 viação. Do total de áreas registradas, uma única área (P10) encontra-se sob área reabilitada sob uso declarado com a medida de intervenção a restrição ao uso de água subterrânea. Tendo em vista, esse cenário comparativo entre o uso de água subterrânea da região e o cadastro apresentado de áreas contaminadas e reabilitadas é possível apresentar que há significância de um estudo referente à vulnerabilidade natural da água subterrânea para a região de interesse. O capítulo a seguir apresenta os resultados preliminares da simulação de um estudo de vulnerabilidade de aquífero para a área de interesse.

## 4 RESULTADOS

Tendo em vista a contextualização da área de estudo frente ao uso de captação de água subterrânea e ao cadastro de áreas consideradas contaminadas e reabilitadas do estado do Rio de Janeiro, pode-se entender que o estudo de vulnerabilidade natural de um aquífero é uma ferramenta de contribuição à gestão de recursos hídricos subterrâneos. Segundo Carvalho e Hirata (2012) a proteção do recurso hídrico subterrâneo dar-se-á por duas formas principais, o controle do uso do solo a fim de identificar áreas suscetíveis a contaminação e uma das formas a se executar tal identificação é na confecção de mapas cartográficos de vulnerabilidade de aquífero à contaminação e perímetros de proteção dos poços (PPP). Além disso, como a gestão de recursos hídricos subterrâneos encontra-se associada à gestão pública, a resolução nº 92 de novembro de 2008 do CNRH, preconiza que os órgãos gestores deverão promover estudos hidrogeológicos regionais para identificação de potencialidades, disponibilidades e vulnerabilidade dos aquíferos para utilização de água subterrânea em especial para áreas com indícios de poluição e contaminação.

A partir deste cenário que relaciona a importância dos estudos hidrogeológicos de vulnerabilidade natural da água subterrânea à contaminação, foi possível aplicar, parcialmente, o método GOD na área de interesse. Entende-se que o método GOD utilizado na área de interesse pode ser aplicado a partir de dados secundários obtidos a partir de estudos geológicos realizados pelo órgão competente em questão, o Serviço Geológico do Brasil. Entende-se que dados secundários são válidos para simulação e identificação empírica de potenciais áreas a serem estudadas mais especificamente. Ainda, tal metodologia servirá como subsídio e aplicada a baixo custo para caracterizar, de forma primária empírica, a vulnerabilidade da água subterrânea na área de interesse. Ainda, a ASTM (2008), aponta que, a maioria dos métodos de avaliação de vulnerabilidade à água subterrânea são desenvolvidos para avaliação de áreas regionais amplas para auxiliar a esfera pública local, estadual e federal para identificar e priorizar áreas onde as avaliações mais detalhadas se fazem necessárias ajudando, assim, no desenvolvimento da gestão de água subterrânea da área de interesse.

Desta forma, a Tabela 6, apresenta um resumo das fontes de dados para a caracterização geológica e hidrogeológica, bem como, a sua respectiva aplicação ao método escolhido. A Tabela 7 apresenta a localização dos poços de captação de água subterrânea

utilizados para o estudo da vulnerabilidade natural do aquífero, as respectivas regiões administrativas da área de interesse, bem como, o uso declarado para tal.

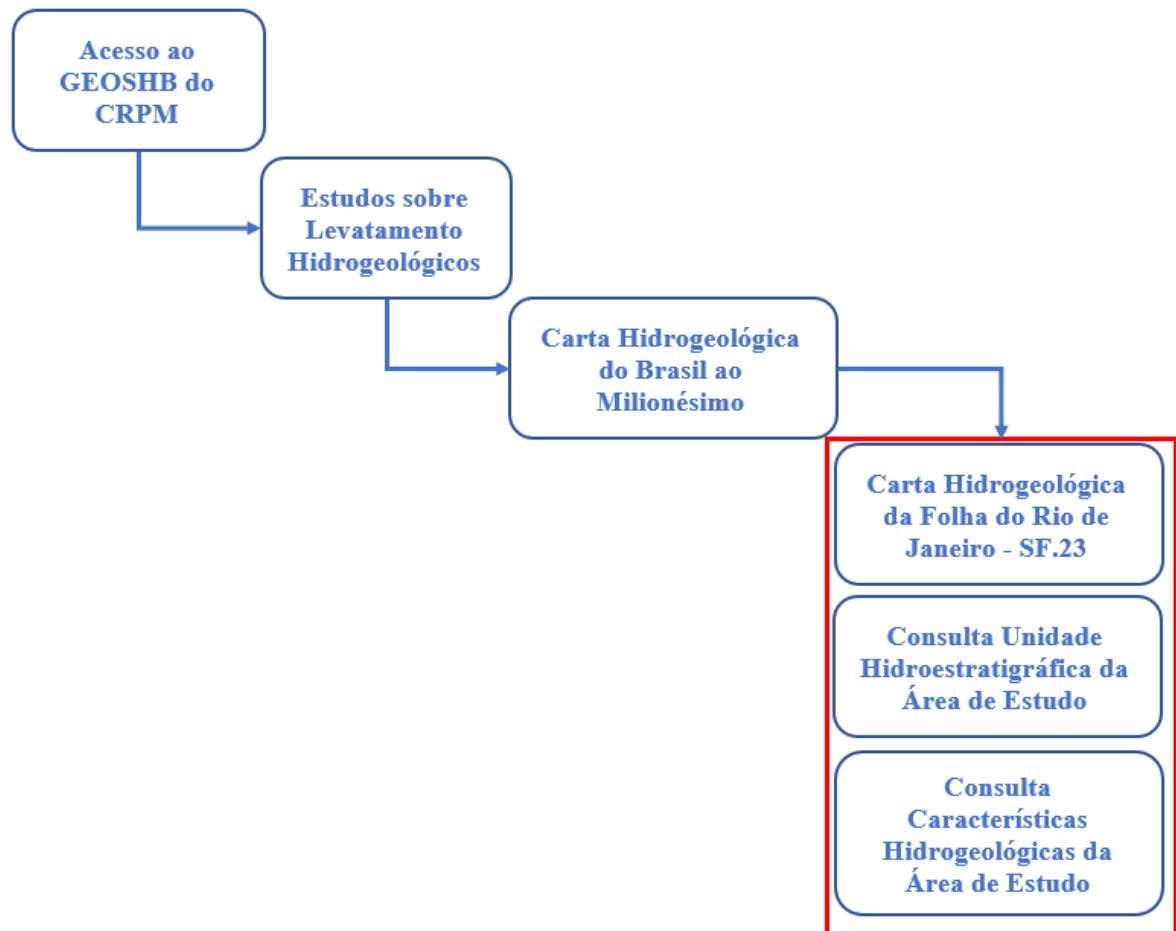
Tabela 6 – Identificação das fontes de dados para determinação dos parâmetros utilizados para à aplicação do método GOD.

Fonte	Informação Adquirida	Título	Escala	Parâmetro do Método GOD
Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015)	Caracterização Hidrogeológica do Embasamento Fraturado Indiferenciado	Carta Hidrogeológica	1:1.000.000	Grau de Confinamento da Água Subterrânea (G)
Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2016)	Classificação Litológica Primária	Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro	1:400.000	Ocorrência de Estrato de Cobertura (O)
Sistemas de Informação de Águas Subterrânea (SIAGAS) – Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2020)	Nível Estático	Cadastrados dos Poços de Captação de Água Subterrânea	-	Distância até o Lençol Freático (D)

Fonte: o Autor (2020)

Para fins de diagramação e melhor entendimento em relação às etapas subsequentes de obtenção dos dados para o cálculo da vulnerabilidade natural à água subterrânea. É válido apresentar o fluxograma decisório e de aquisição dos dados para cada parâmetro a ser avaliado pelo método GOD, isto é, Grau de Confinamento da Água Subterrânea (G), Ocorrência de Estrato de Cobertura (O) e Distância até o Lençol Freático (D). O primeiro parâmetro, determinado pelo Grau de Confinamento da Água Subterrânea foi obtido a partir da caracterização hidrogeológica do embasamento fraturado indiferenciado da carta hidrogeológica fornecida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2015). O Fluxograma 2 apresenta o ordenamento das etapas até a obtenção do valor a ser utilizado pelo parâmetro grau de confinamento da água subterrânea.

Fluxograma 2 – Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro do grau de confinamento da água subterrânea.



Fonte: O autor (2020)

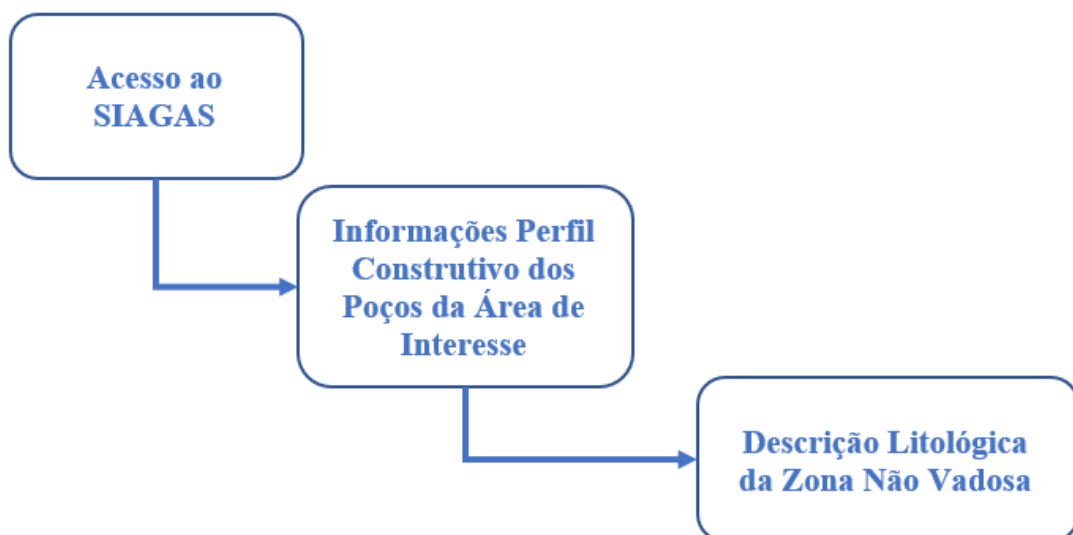
A partir do acesso ao banco de dados fornecidos pelo CPRM pelo GEOSHB é possível fazer o download dos dados relacionados ao levantamento hidrogeológico, em específico, da carta hidrogeológica do Brasil ao Milionésimo, segmentada em diferentes cartas hidrogeológicas estaduais. Em específico, na Carta Hidrogeológica da Folha do Rio de Janeiro é possível acessar a unidade hidroestratigráfica da área de estudo e da região de interesse com a informação da denominação das características hidrogeológicas da área selecionada para estudo.

Além disso, O Fluxograma 3 apresenta o ordenamento das etapas até a obtenção do valor a ser utilizado pelo parâmetro ocorrência de estrato de cobertura quando os dados do perfil construtivo dos poços da área de estudo encontram-se disponíveis por disponibilidade de dados públicos. Tal fluxograma é atingido por meio do acesso ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, disponível pelo CPRM, onde é possível identificar a área de interesse via mapas e localizar poços cadastrados no sistema, onde os mesmos, quando disponíveis,

apresentam informações a respeito do perfil construtivo dos poços juntamente com a descrição litológica da zona não vadosa, isto é, do estrato de cobertura do solo a cima da zona saturada da área de interesse.

É importante destacar que há limitação do acesso aos dados litológicos dos perfis construtivos dos poços de captação de água subterrânea e dos poços de monitoramento ambiental tendo em vista que tais informações podem estar restritas às empresas privadas que realizaram os respectivos serviços listados anteriormente. Desta forma, o apelo pelo uso de cartas litoestratigráficas em escala inferiores à 1:1000 é eminente, tendo em vista o detalhamento do que se encontra disponível publicamente e para a aplicação de preliminar do presente momento.

Fluxograma 3 – Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro da ocorrência de estrato de cobertura da zona não vadosa do solo com acesso ao perfil construtivo do poço de monitoramento a ser considerado.

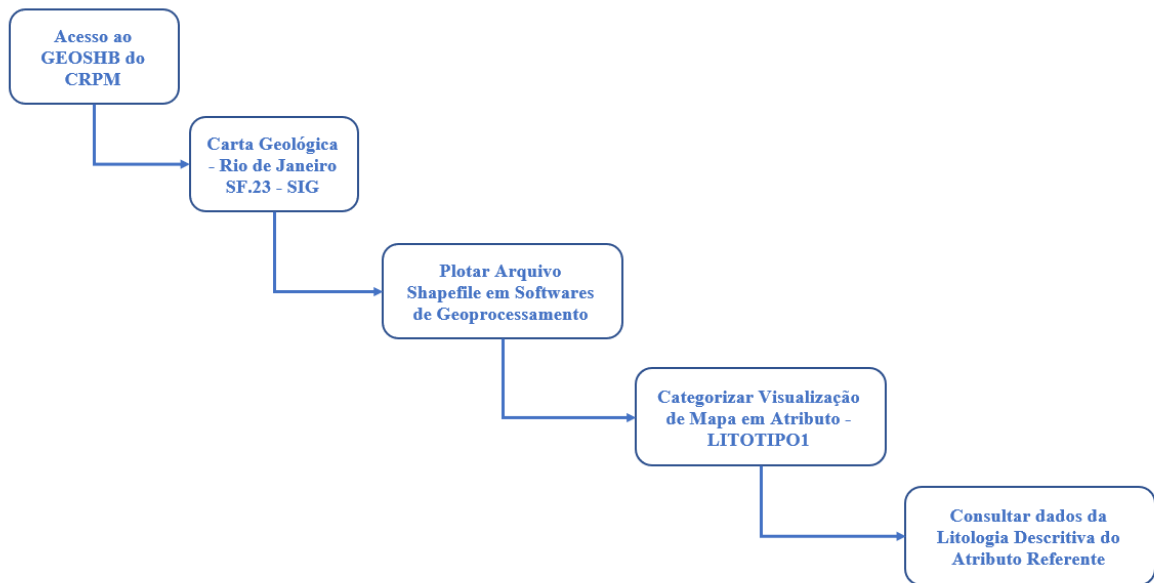


Fonte: O autor (2020)

Não obstante, devido a ausência de disponibilidade de dados referentes aos perfis construtivos dos poços de uma área de interesse, faz-se necessário a utilização de outras ferramentas plausíveis para obtenção de dados representativos para a simulação da metodologia GOD apresentada. Desta forma, utiliza-se outra ferramenta disponível no banco de dados do CPRM que faz referência à ocorrência litoestratigráfica representativa da área de interesse, tal ferramenta é disponível pelo banco de dados do sistema de informação geográfica da plataforma do CPRM (SIG). O Fluxograma 4 apresenta o ordenamento das

etapas para obtenção de dados litoestratigráficos na ausência de fontes diretas sobre litologia da zona não-vadosa do solo disponível no perfil construtivo de cada poço de monitoramento avaliado.

Fluxograma 4 – Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro da ocorrência de estrato de cobertura da zona não vadosa do solo na ausência de dados primários do perfil construtivo dos poços de monitoramento avaliado.

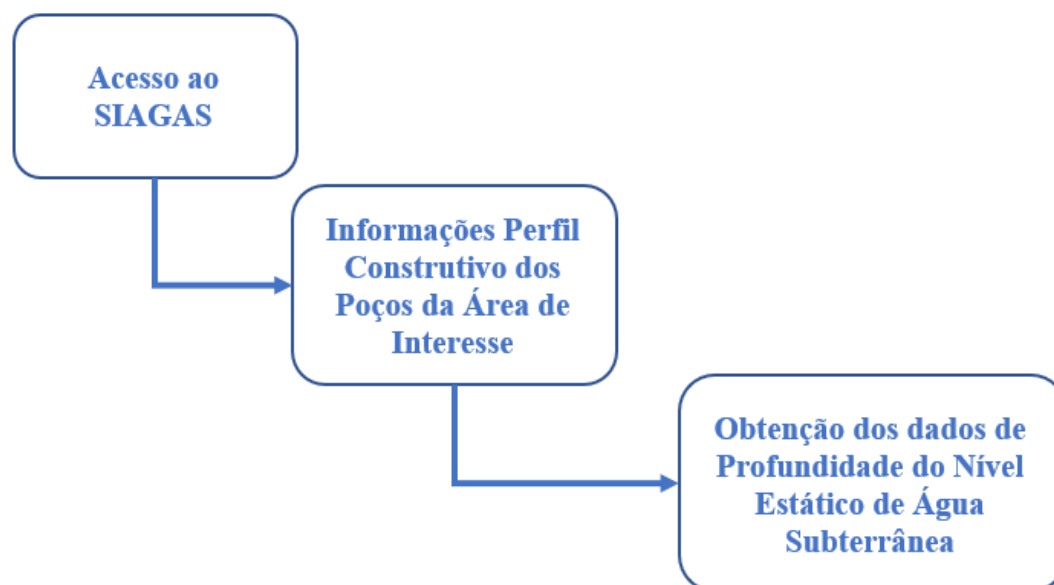


Fonte: O autor (2020)

Para a obtenção dos dados referentes ao parâmetro “D” da metodologia GOD, isto é, parâmetro referente à distância até o lençol freático, obtém-se a partir do perfil construtivo dos poços de água subterrânea cadastrados e disponíveis com dados na plataforma do Sistema de Informação de Água Subterrânea (SIAGAS) do CPRM. Para tal, é extraído o resultado da métrica referente ao valor estimado pelo nível de água estático referente ao poço de bombeamento em questão. O nível estático tende a ser mais representativo, pois representa a profundidade de equilíbrio da água subterrânea da área de estudo. Desta forma, o Fluxograma 5 apresenta as etapas de obtenção dos dados referente ao parâmetro distância até o lençol freático (D) da metodologia apresentada como base de estudo do presente trabalho.



Fluxograma 5 – Ordenamento das etapas para obtenção do valor do parâmetro do distanciamento ao lençol freático (profundidade do nível estático de água subterrânea).



Fonte: O autor (2020)

Tabela 7 – Localização dos poços de captação de água subterrânea e seu respectivo uso declarado utilizados para aplicação do método GOD.

Ponto/Poço	Latitude (Y)	Longitude (Y)	Região Administrativa	Uso declarado
P1	7463311	684245	Rio Comprido	Abastecimento Industrial
P2	7464674	683406	Tijuca	Outros
P3	7464119	680977	Praça da Bandeira	Outros
P4	7464795	681014	Vila Isabel	Outros
P5	7464794	681013	Vila Isabel	Outros
P6	7464119	680977	Tijuca	Outros
P7	7463683	681371	Tijuca	Abastecimento Doméstico
P8	7462400	680586	Tijuca	Outros
P9	7462585	680617	Tijuca	Outros
P10	7462988	680309	Tijuca	Outros
P11	7463386	680513	Tijuca	Outros
P12	7464104	679609	Vila Isabel	Outros
P13	7464267	978842	Vila Isabel	Outros

Fonte: SIAGAS (2019)

Conforme apresentado anteriormente no capítulo referente às características hidrogeológica e geológica da área de estudo, pode identificar através da Tabela 8 as seguintes características geológicas, litológicas e hidrogeológicas que foram aplicadas ao método GOD.

Tabela 8 – Localização dos poços de captação de água subterrânea, unidade geológica, descrição geológica, litologia primária e nível estático.

Ponto/Poço	Unidade Geológica (CPRM)	Descrição (CPRM)	Litologia Primária (CPRM)	Nível Estático (CPRM)
P1	São Fidélis	Silimanita-biotita gnaiss	Gnaiss, rocha metamórfica	1.490
P2	Rio de Janeiro	Granitoides Sin-Colisionais intrusivos ou híbridos - biotita granito porfirítico foliado	Rocha ígnea (magmática), rocha consolidada	1.640
P3				2.280
P4	Depósito Aluvionar	Depósitos aluviais - barras arenosas, planície de inundação e preenchimento de canal	Sedimento inconsolidado	1.250
P5				Areia, Areia arcoseana
P6				1.250
P7				2.840
P8				0.350
P9	Rio de Janeiro	Granitoides Sin-Colisionais intrusivos ou híbridos - biotita granito porfirítico foliado	Rocha ígnea (magmática), rocha consolidada	6.550
P10				5.000
P11	Depósito Aluvionar	Depósitos aluviais - barras arenosas, planície de inundação e preenchimento de canal	Sedimento inconsolidado	2.700
P12				Areia, Areia arcoseana
P13				7.500
				3.260
				1.800

Fonte: Adaptado CPRM (2015), CPRM (2016) e CPRM (2020).

Desta forma, a partir destas informações foi possível elaborar e identificar previamente os pontos e suas características referentes à vulnerabilidade natural do aquífero. De maneira geral, a partir da observação das informações presentes através dos 13 poços de captação de água subterrânea, identificou-se regiões de áreas próximas com classificação de vulnerabilidade média-alta com valores índice de 0.48 a 0.54 e com classificação de vulnerabilidade alta 0.56 a 0.64. A Tabela 9 apresenta os resultados adquiridos a partir da simulação do método GOD para os pontos de captação de água subterrânea de interesse da área de estudo.

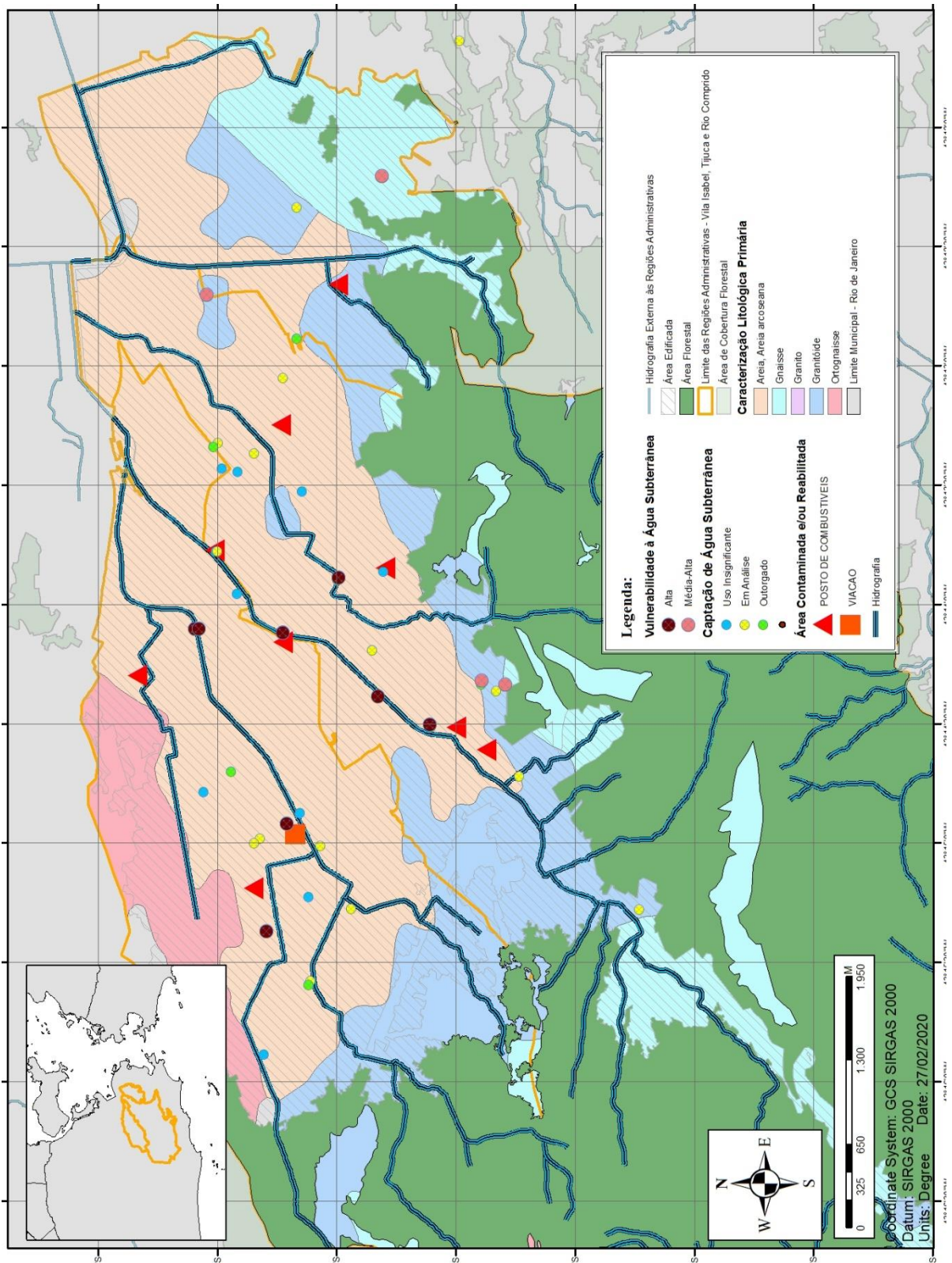
A Figura 11 apresenta a distribuição geoespacial não rasterizados, isto é, resultados pontuais da aplicação da metodologia GOD na área de interesse. A Figura 12 aponta o resultado da interpolação dos resultados pontuais da metodologia GOD aplicada aos pontos avaliados na área de interesse.

Tabela 9 – Resultados da aplicação da metodologia GOD na área de interesse.

Ponto	Grau de Confinamento da Água Subterrânea (G)		Ocorrência de Estratos de Cobertura (O)		Distância até o Lençol Freático (D) Uso declarado		Resultado	
	Fator	Justificativa	Fator	Justificativa	Fator	Justificativa	Índice GOD	Vulnerabilidade
P1	1		0.6	Rocha Consolidada (Rocha Duras) - Formações Metamórficas	0.9	5.0 m	<b>0.54</b>	<b>Média-Alta</b>
P2	1		0.6	Rocha Consolidada (Rocha Duras) - Formações Magmáticas	0.9	5.0 m	<b>0.54</b>	<b>Média-Alta</b>
P3	1		0.7		0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>
P4	1	Aquífero Livre (CPRM, 2015)	0.7	Rocha	0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>
P5	1		0.7	Sedimentar	0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>
P6	1		0.7	Inconsolidada (sedimentos)	0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>
P7	1		0.7	- Areia Aluvial	0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>
P8	1		0.6		0.8	5-20 m	<b>0.48</b>	<b>Média-Alta</b>
P9	1		0.6	Rocha Consolidada (Rocha Duras) - Formações Magmáticas	0.9	5.0 m	<b>0.54</b>	<b>Média-Alta</b>
P10	1		0.7	Rocha	0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>
P11	1		0.7	Sedimentar	0.8	5-20 metros	<b>0.56</b>	<b>Alta</b>
P12	1		0.7	Inconsolidada (sedimentos)	0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>
P13	1		0.7	- Areia Aluvial	0.9	5.0 m	<b>0.63</b>	<b>Alta</b>

Fonte: O Autor (2020)

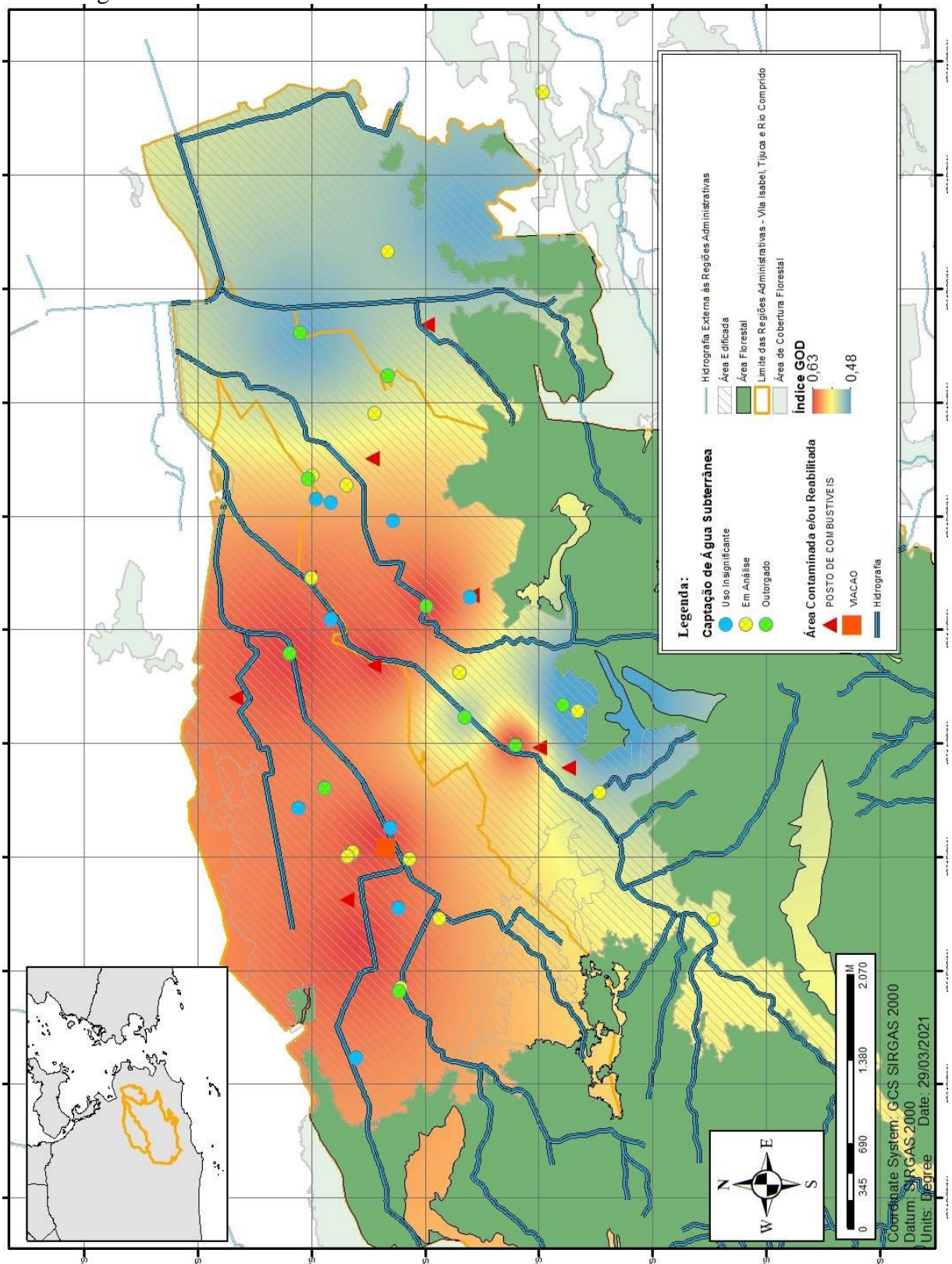
Figura 11 - Distribuição geoespacial não rasterizada com os resultados pontuais da aplicação da metodologia GOD na área de estudo.



Fonte: o Autor (2020)



Figura 12 - Distribuição rasterizada com os resultados da interpolação da aplicação da metodologia GOD em escala de 1:20 na área de estudo.



Fonte: Autor (2021)

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme apresentado anteriormente, o resultado individual da aplicação metodológica do índice de vulnerabilidade natural à água subterrânea definido pela métrica estimada pelo GOD, determinou que a região de interesse apresenta valores de média-alta à alta vulnerabilidade. Ainda, os mapas a seguir representam a interpolação dos dados referentes aos parâmetros e valores obtidos. O método de interpolação indicado referencia-se ao IDW, segundo Junior et al (2015), tal método trabalha com a média ponderada euclidiana entre os pontos, onde sua utilização transforma valores pontuais em uma imagem representando os pesos aproximados para a área em questão avaliada.

Em relação aos aspectos litoestratigráficos com a ocorrência de vulnerabilidade apresentada pela simulação executada. Observa-se que, em sua maioria, a ocorrência de índice de valores de vulnerabilidade alta natural do aquífero encontra-se localizado sobre a litologia definida pelo CPRM como areia, areia arcoseana na porção norte da área de estudo próximo a jusante do rio Maracanã e ao longo do rio Joana. Ainda, em relação ao tipo de litologia, muito associado ao fato da ocorrência de ser um substrato sedimentar inconsolidado. Tal região é uma região tem a ocorrência de área urbanizada com presença da maioria das áreas cadastradas no sistema de gerenciamento de áreas contaminadas do estado do Rio de Janeiro sob diferentes situações de intervenções. A Tabela 10 apresenta a relação entre a litoestratigrafia observada na área de estudo e a ocorrência do resultado do índice de vulnerabilidade natural à água subterrânea.

Tabela 10 - Relação entre litoestratigrafia observada na área de estudo e resultado do índice de vulnerabilidade natural à água subterrânea.

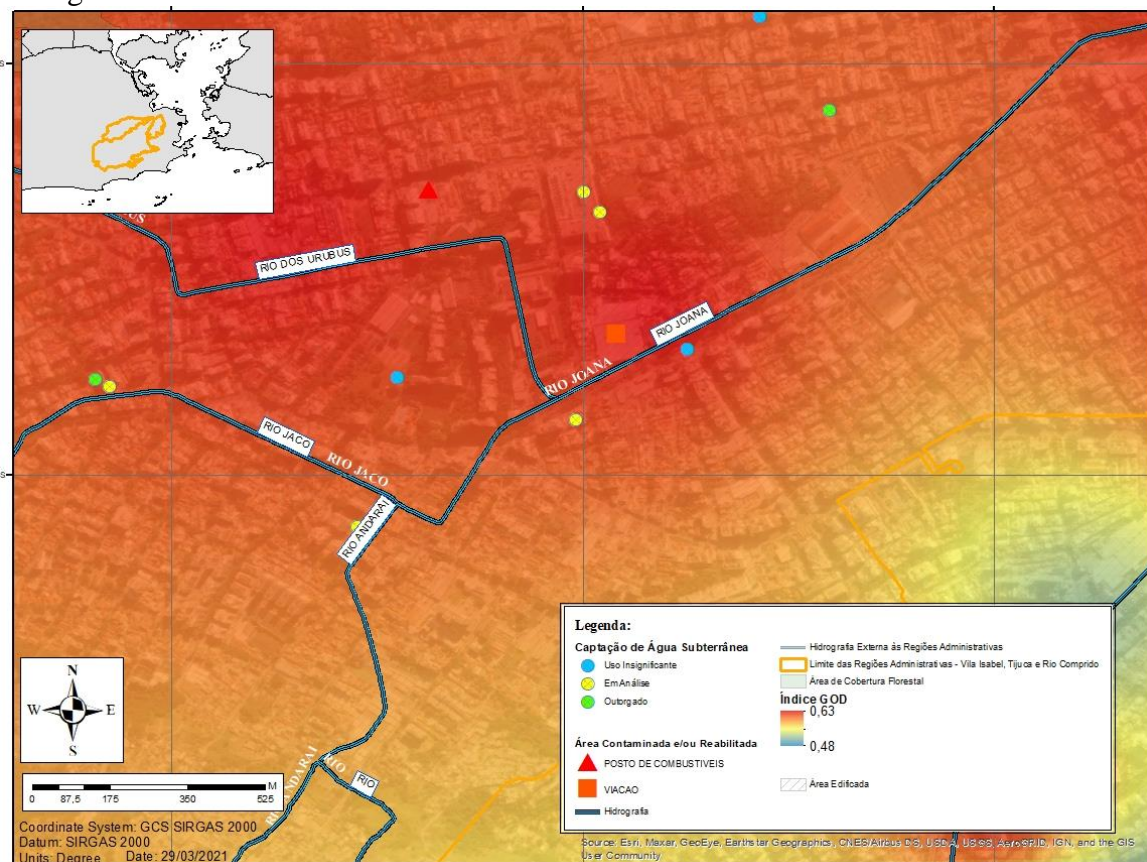
Resultado Vulnerabilidade	Litoestratigrafia definida pelo CPRM
Alta	Areia, areia arcoseana
Média-Alta	Granitoide, Gnaisse e Ortognaisse

Fonte: O autor (2020)

Não obstante também, em relação aos aspectos legislativos que tangem à caracterização atual do sistema de outorga de água subterrânea da área de estudo, pode-se avaliar que a porção norte apresentou valores mais altos de vulnerabilidade em relação à

porção mais ao sul, encontram-se regimes de outorgas sob análise, sob uso insignificante, bem como, sob regime outorgável. Em específico, na confluência entre os rios Jacó, dos Urubus e rio do Andaraí para a formação do Rio Joana, há a ocorrência de índice altos do GOD sob regimes de outorga de água subterrânea, cadastrados no CNARH referente a base de dados de 2019, em status de análise e de uso insignificante. E, ainda em consideração ao cadastro de áreas contaminadas, existe nesta porção da área de estudo a ocorrência de área contaminada sob investigação, no caso de um posto de gasolina e, uma área reabilidade para uso declarado que passou por um processo de remediação de escavação do solo (INEA, 2015). Sendo assim, o mapeamento entre o índice de vulnerabilidade natural preliminar, regime de outorga de água subterrânea e o cadastro de áreas contaminadas podem servir de fonte de informações para a tomada de decisão no momento de liberação dos usos de água subterrânea sob análise. A Figura 13 apresenta a informação a respeito dos valores interpolados pelos índices GOD dos poços avaliados, a informação sobre o cadastro de áreas contaminadas e as situações de uso de água subterrânea de cada registro cadastrado.

Figura 13 - Distribuição geoespacial do resultado do índice GOD interpolado em comparação com o regime de uso de recursos hídricos subterrâneos, cadastro de áreas contaminadas e hidrografia da área de interesse – Norte e Noroeste.

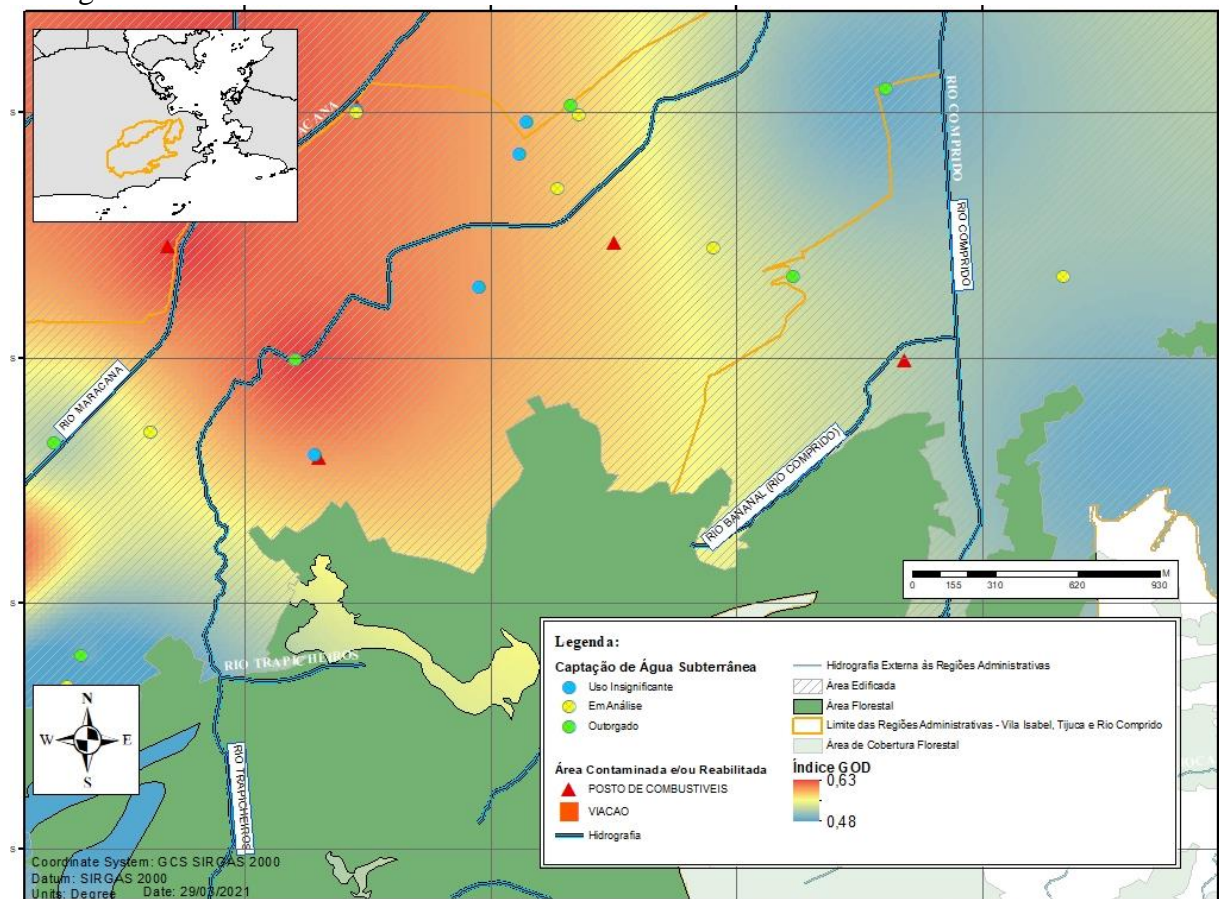


Fonte: o Autor (2021)



Em relação à porção mais ao sul e sudeste da área de estudo, consegue-se observar a ocorrência de um índice mais voltado para valores ao parâmetro GOD considerado como médio, sendo titulado, com valor mais acima do médio (0,5). Desta forma, a litologia estratigráfica e os valores de distância até o lençol freático nortearam tal classificação. Tal classificação de média a alta encontra-se sob uma região próxima à vegetação e cobertura florestal, região ao sul da área de estudo e também a uma região mais a sudeste da área, sem a ocorrência de registros cadastrados de áreas contaminadas. A Figura 14 representa a interpolação dos valores resultados do índice GOD para a região sudeste e sul da área de estudo, bem como, a ocorrência de cadastro de áreas contaminadas e regime de uso de recursos hídricos subterrâneos.

Figura 14 - Distribuição geoespacial do resultado do índice GOD interpolado em comparação com o regime de uso de recursos hídricos subterrâneos, cadastro de áreas contaminadas e hidrografia da área de interesse – Sul e Sudeste.



Fonte: o Autor (2021)

É possível avaliar também que tal região, entre a porção considerada de média alta a transição entre a porção com vulnerabilidade alta, tem a ocorrência do rio Trapicheiros e o rio Maracanã, a presença de ocorrência de usos cadastrados de água subterrânea como usos insignificantes. Os usos insignificantes cadastrados no estado do Rio de Janeiro estão sujeitos



a emissão de uma certidão ambiental de uso insignificante o qual não estão sujeitos, segundo INEA (2019), ao uso para consumo e higiene humana em áreas que possuem abastecimento de água regularizado. Desta forma, tal informação do índice GOD, devido à necessidade de obtenção de dados hidrogeológicos para aplicação para uso insignificante, pode ser um fator importante na hora de determinar o tipo de uso para àqueles que se encontram sob análise. Tendo em vista, que para emissão de outorga de água subterrânea, é necessária a apresentação do relatório de avaliação hidrogeológica que no qual contempla a necessidade de considerar a vulnerabilidade provocada por circunstância que ofereça suscetibilidade às águas subterrâneas.

Assim, consegue-se observar que o exemplo entre o cruzamento dos dados de vulnerabilidade natural à água subterrânea obtido pela a metodologia aplicada pelo índice GOD e a visualização frente ao cenário de uso de recursos hídricos subterrâneos e o cadastro de áreas contaminadas, é possível observar uma ferramenta aplicável à gestão de recursos hídricos. Ainda, com relação, a ASTM (2008) preconiza que tal ferramenta pode ser utilizada para avaliações preliminares de regiões a serem estudadas mais detalhadamente frente ao cenário de uso e ocupação do solo, incluindo, o uso de água subterrânea da área de interesse.

## 6 CONCLUSÃO

A partir do cenário importante representativo do consumo da água subterrânea para a sociedade, isto é, o uso do recurso hídrico subterrâneo como parte da formação e do desenvolvimento socioeconômico de uma região, cidade ou estado entende-se que o conhecimento da gestão deste bem natural parte do princípio do conhecimento do quantitativo e da qualidade da água subterrânea a ser utilizada. Logo, uma problemática condizente apontada por Hirata (2019) é a presença de apenas 1% dos poços tubulares utilizados para abastecimento cadastrados e registrados como regulares, ou seja, pertencem ao controle governamental na gestão do recurso hídrico subterrâneo. Observando, assim, uma defasagem entre o real número de uso de poços tubulares, colocando em comprometimento os usuários que utilizam para fins produtivos, insignificantes e domiciliares.

Tal relação de número de cadastros registrados no órgão ambiental e real quantitativo utilizado pela sociedade dificulta o processo de emissão de novos usos pelo estado, tendo em vista o cenário não representativo. Desta forma, no Rio de Janeiro, aponta-se algumas normas operacionais elaboradas pelo INEA a fim de organizar a gestão de recursos hídricos subterrâneos. As normas relacionadas são aquelas que se referenciam para realização de estudo hidrogeológicos do ponto de interferência a ser outorgado (NOP-INEA-39) a partir do relatório de avaliação hidrogeológica, NOP-INEA-40 que refere-se a critérios, definições e condições gerais para emissão da certidão ambiental de uso insignificante e NOP-INEA-38, que referencia-se às condições para outorga de direito de uso de recursos hídricos. Tais normas, embasam, no estado do Rio de Janeiro o aspecto de gestão e regulação do sistema de gestão de águas subterrâneas, sendo uma fonte de licenciamento para sistematizar e roteirizar a dinâmica de gestão das águas.

Ainda, a gestão das águas subterrâneas deve ser considerada sob aspectos e fins de qualidade ambiental para seu uso. Frente a esse cenário, entende-se que tal conhecimento é de importância para gestão territorial dos usos de água subterrânea considerando o aspecto de qualidade, e uma das formas de tal englobamento, é a apreciação da ocorrência de áreas contaminadas em uma determinada região e área de estudo. A água subterrânea está passível a contaminação por diversas potenciais fontes que contaminam o solo ou a água subterrânea sob diferentes processos de dispersão de poluentes. Uma das principais fontes de contaminantes conhecidas são os postos de combustíveis e seus sistemas de armazenamento subterrâneo de combustíveis que são utilizados para armazenagem de diferentes tipos de combustíveis, como,

gasolina, óleo lubrificantes e outros (EPA, 1990). Tendo em vista esse cenário, nos EUA, cerca de 42,5%, isto é, 125.000 áreas contaminadas por atividades de tanqueamento subterrâneo de combustíveis, não obstante, no município do Rio de Janeiro, cerca de 69% das áreas contaminadas no registro do estado correspondem a atividades vinculadas a postos de combustíveis (INEA, 2015).

Válido ressaltar que as áreas contaminadas em cadastro passam por diferentes formas de classificação segundo Brasil (2009), isto é, áreas contaminadas sob investigação, intervenção e sob monitoramento para reabilitação. Esses estágios referem-se a diferentes tipos de estudo, desde da contextualização da confirmação de alguma contaminação até o evidenciamento de ocorrência ou não de risco, não obstante também, até a avaliação tolerável de risco envolvido, bem como, área reabilitada para o uso declarado. Em específico, na área de estudo, é possível observar 9 (nove) postos de combustíveis registrados no cadastro e 1 (uma) unidade de viação como área potencialmente poluidora à contaminação do solo e água subterrânea. Essas ocorrências encontram-se dispostas geoespacialmente espaçadas na área de estudo sob diferentes condições de contorno quando considerado o uso de recursos hídricos subterrâneos cadastrados na área de interesse. Sendo dos quais, cerca de 44% dos usos registrados no cadastro do CNARH (2019), 44% encontram-se sob estado de análise, sendo os demais usos de água subterrânea enquadrados sob usos insignificantes e usos outorgáveis.

Desta forma, uma ferramenta importante para a análise mútua da gestão territorial da área de estudo é o mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero associado à possibilidade de contaminação de água subterrânea. Além disso, ASTM (2008), aponta que, a maioria dos métodos de avaliação de vulnerabilidade à água subterrânea são desenvolvidos para avaliação de áreas regionais amplas para auxiliar a esfera pública local, estadual e federal para identificar e priorizar áreas onde as avaliações mais detalhadas se fazem necessárias ajudando, assim, no desenvolvimento da gestão de água subterrânea da área de interesse. Assim, a aplicação da metodologia GOD na área de estudo indicada como ideal quando se tem a obtenção de dados preliminares e secundários indicou a ocorrência de resultado de vulnerabilidade alta para a litoestratigrafia considerada como unidade principal a areia e areia arcoseana. Além disso, é possível avaliar que esta região é a região de mais ocorrência de distribuição geoespacial dos poços de captação de água subterrânea da área de interesse com usos sob análise de outorga e uso insignificante. Não obstante, a área com resultado de vulnerabilidade média-alta está vinculada a áreas próximas ao maciço da Tijuca, região com formação de rochas mais consolidadas do tipo granitoide, bem como, área de ocorrência de nível de água subterrânea estático mais profundo em comparação à média dos demais poços.

Sendo assim, o resultado apresentado pela metodologia GOD em relação à vulnerabilidade natural do aquífero da área de estudo é um resultado preliminar e que pode ser utilizado como indicativo e de embasamento dos possíveis relatórios hidrogeológicos dos pontos de análise de captação de água subterrânea ainda a serem definidos como uso outorgável. Além disso, os resultados de vulnerabilidade natural à água subterrânea podem subsidiar a tomada de decisão para detalhamento de futuros estudos hidrogeológicos da zona de interesse para uma melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos cadastrados. E ainda, a capacidade de utilizar também esses estudos para embasamento aos usos futuros considerados insignificantes à área de estudo. Então, para conclusão do presente trabalho tal ferramenta e metodologia pode ser aplicada disseminadamente para regiões de interesse onde a acessibilidade de dados primários esteja limitada e onde a utilização de dados secundários e de vulnerabilidade podem nortear a tomada de decisão para os usos de recursos hídricos subterrâneos sob análise.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/regulacao/principais-servicos/cadastro-de-usuarios-cnarh>

ATLAS BRASIL. **Abastecimento Urbano de Águas: Resultados por Estado**. Brasília: Agência Nacional de Águas; Engecorps/Cobrape, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6030 – 15**. Standard Guide for Selection of Methods for Assessing Groundwater or Aquifer Sensitivity and Vulnerability. United States, 2008.

ABNT NBR 15515-1:2007. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Passivo ambiental em solo e água subterrânea – Avaliação Preliminar**. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15515-2:2011. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Passivo ambiental em solo e água subterrânea – Investigação Confirmatória**. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15515-3:2013. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Passivo ambiental em solo e água subterrânea – Investigação Detalhada**. Rio de Janeiro.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de Julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 18 jul 2000. Art. 2º, p.1, 2000.

BRASIL. **Resolução nº 92, de 05 de Novembro de 2008**. Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 05 nov 2008. Art. 2º, II, p.2, 2008.

CARVALHO A. M., HIRATA R. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do estado de São Paulo. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. São Paulo, v.12, n.1, p. 53-70, Abril, 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **O que são áreas contaminadas**. São Paulo. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/o-que-sao-areas-contaminadas/#:~:text=Uma%20C3%A1rea%20contaminada%20pode%20ser,acidental%20ou%20at%20C3%A9%20mesmo%20natural>.

COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS DO RIO DE JANEIRO. **Histórico de Abastecimento de Água da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2019.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Citizen's Guide To Ground-Water Protection**. United States, 1990. Disponível em:

[https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/2006\\_08\\_28\\_sourcewater\\_guide\\_citguidegwp\\_1990.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/2006_08_28_sourcewater_guide_citguidegwp_1990.pdf)

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guide for conducting contaminant source inventories for public drinking water supplies: Technical Assistance Document.** United States, 1991. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/10003HST.PDF?Dockey=10003HST.PDF>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Learn About Superfund.** United States. 2018. Disponível em <https://www.epa.gov/superfund/learn-about-superfund>

FOSTER, S., HIRATA R., GOMES D., D'ELIA M., PARIS M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: Um guia para empresas de abastecimento de água, órgão municipais e agências ambientais.** Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento. Banco Mundial. Washington, D.C. 2006.

HIRATA, R., SUHOGUSOFF, A., MARCELLINI, S. S., VILLAR, P. C., & MARCELLINI, L. (2019). **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento.** São Paulo: Inst. Trata Brasil.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Gerenciamento de Áreas Contaminadas do Estado do Rio de Janeiro – 2ª Edição.** Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2015.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Base legal para a gestão das águas do Estado do Rio de Janeiro – 3ª Edição.** Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2017.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Atlas dos mananciais de abastecimento público do Estado do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro: Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2018.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **NOP-INEA-38.** Critérios, definições e condições para outorga de direito de uso de recursos hídricos subterrâneos. Rio de Janeiro. 2019.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **NOP-INEA-39.** Critérios, orientações e procedimentos para elaboração do Relatório de Avaliação Hidrogeológica - RAH. Rio de Janeiro. 2019.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **NOP-INEA-40.** Critérios, definições e condições gerais para concessão de certidão ambiental de uso insignificante de recursos hídricos. Rio de Janeiro. 2019.

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). 2018. Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) Site Management: LCSM Evaluation, Decision Pocess and Remedial Technologies. Disponível em: <https://lnapl-3.itrcweb.org/3-key-lnapl-concepts/>

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). 2018. **TPH Risk Evaluation at Petroleum-Contaminated Sites.** THPRisk-1. Washington, D.C.: Interstate

Technology & Regulatory Council, TPH Risk Evaluation Team. Disponível em:  
<https://tphrisk-1.itrcweb.org/4-tph-fundamentals/>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 420/2009** - "Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas." - Data da legislação: 28/12/2009 - Publicação DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84

KAZEMI, E., KARYAB, H. & EMAMJOME, MM. **Optimization of interpolation method for nitrate pollution in groundwater and assessing vulnerability with IPNOA and IPNOC method in Qazvin plain.** *J Environ Health Sci Engineer* **15**, 23 (2017). Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0287-x>

MEIRA, José Carlos Rodrigues; DE-CAMPOS, Alfredo Borges; PEREIRA JÚNIOR, L. C. (2014) **Vulnerabilidade natural e perigo à contaminação de zona de recarga do Aquífero Guarani.** *Águas Subterrâneas*, 28(1): 31-46.

PEREIRA JÚNIOR, L. C., SOARES, H. L. T., & CASTRO, S. S. de. (2015). **Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do Aquífero Bauru no município de Rio Verde – GO.** *Águas Subterrâneas*, 29(2), 129–145.  
<https://doi.org/10.14295/ras.v29i2.27947>

PUERARI, E. M.; COSTA, C. T.; CASTRO, M. A. H. de. Utilização do método drástico na análise de vulnerabilidade natural do complexo industrial e portuário do PECÉM - Fortaleza/Ceará. *Águas Subterrâneas*, [S. l.], 2003. Disponível em:  
<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24004> Acesso em: 13 abr. 2021.

SÃO PAULO. **Decisão de Diretoria Nº 038/2017/C, de 07 fevereiro de 2017.** *Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual nº 13.577/2009 e seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto nº 59.263/2013, e dá outras providências.* Publicado no Diário Oficial Estado de São Paulo - Caderno Executivo I (Poder Executivo, Seção I), edição nº 127(28) do dia 10/02/2017 Páginas : 47 a 52.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Hidrogeológico.** Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2015. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro.** Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2016. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informações de Água Subterrânea.** Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2020. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>

SILVA, Rosimar Lima Brandão et al . Estudo da contaminação de poços rasos por combustíveis orgânicos e possíveis conseqüências para a saúde pública no Município de Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro , v. 18, n. 6, p. 1599-1607, Dec. 2002. Disponível em:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-311X2002000600014&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2002000600014&lng=en&nrm=iso) .

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Contamination of Groundwater**. US Gov. 2020. Disponível em: [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/contamination-groundwater?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/contamination-groundwater?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)