



INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE ESPACIAL DO AQUÍFERO POROSO DO
CONJUNTO URBANÍSTICO DE BRASÍLIA (CUB) A PARTIR DE MÉTODOS DE
INDEXAÇÃO**

Hermínio Medeiros de Oliveira

Dissertação de Mestrado

Brasília – Distrito Federal.

Agosto – 2019

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE ESPACIAL DO AQUÍFERO POROSO DO
CONJUNTO URBANÍSTICO DE BRASÍLIA (CUB) A PARTIR DE MÉTODOS DE
INDEXAÇÃO**

Hermínio Medeiros de Oliveira

Dissertação de Mestrado (Tese de Doutorado) submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial. Linha de pesquisa: Geoprocessamento.

Aprovado por:

Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes.
Universidade de Brasília
Orientador

Examinador Externo: Prof. Dr. Jeater Waldemar Maciel Correa Santos.
Universidade Federal de Mato Grosso – Departamento de Geografia.
Examinador Externo

Examinador Externo: Prof. Dr. Arnaldo Yoso Sakamoto.
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – Departamento de Ciências Humanas.
Examinador Externo

Brasília – DF, 30 de agosto de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, HERMÍNIO MEDEIROS DE

Análise de Vulnerabilidade Espacial do Aquífero Poroso do Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB) a partir de Métodos de Indexação, 88 p., 297 mm, (UnB – GEA, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2019).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.

- | | |
|--|--|
| 1. vulnerabilidade | 2. CUB |
| 3. aquífero | 4. postos de abastecimento de combustíveis |
| 5. sistemas de informações geográficas | |
| I. UnB–IH-GEA | II. Título (série) |

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para produzir cópias desta Dissertação, assim como emprestar ou vender tais cópias somente para fins acadêmicos. O autor reserva os demais direitos de publicação, de forma que nenhuma parte desta Dissertação de Mestrado possa ser alterada sem a autorização por escrito deste.

Hermínio Medeiros de Oliveira

Agradecimentos

Para chegar até aqui não teria sido possível sem a paciência e sabedoria da Yamilla Oliveira, Angélica Sales, Cláudia Varizo e Heloísa Azevedo. Não posso deixar batido a compreensão e as dicas de Vicente Lima Neto e os amigos da SEGETH. Agradecido.

Obrigado ao povo do bom do Laboratório de Sensores e Informações Espaciais (LSIE): Daniela, João, Núbia, Marcos, Saiaka, Camarão, Anesmar, Naty Roots, Petrônio, Filipe, Nickolas, Maria Bonita, Karina, Hugo, Ivo Chiquito, Alexandre Pagodinho, Vinagre e a Professora Potira Hermuche.

A Gabriela Branquinho e Bruno Rodrigues agradeço a fraternidade, companheirismo e ensinamentos da vida e da academia, um achado nessa altura da vida. Um pacote caído do céu.

Aos funcionários da Secretaria da Pós-Graduação do Departamento de Geografia que zelam pelo cumprimento das normas - sempre alertas com tudo - Valeu.

Os Professores Osmar e Renato foram valiosos pelas contribuições certeiras e amizade sincera. O laboratório (LSIE) é agradável, bom de se estar e estudar. Indico a amizade dos dois, sem margem de decepção.

Ao Professor Roberto - um cara inteligente, bem humorado e tranquilo – cumpriu a função com capricho do começo ao fim. Valeu demais. Recomendo como amigo e orientador.

Agradeço a minha família por tudo e a família do meu pai pelo apoio financeiro que sempre recebi. Não tenho do que reclamar. Teresinha Medeiros é um espelho para todos nós, conseguiu reunir em uma única encarnação um refinamento que muitos levam mil anos! Ao meu primo, irmão e amigo Cícero Dedice de Medeiros Gois considere a dívida quitada.

Aos tios e primos de Santa Cruz do Rio Pardo e São José dos Campos só tenho elogios. Vocês participam de forma definitiva da minha vida, preenchendo um vazio que parece que nunca existiu. Quanta atenção e carinho. Demais ter vocês por perto.

Depois de uma empreitada dessa envergadura vai ser difícil voltar a levar a vida na flauta. É isso.

RESUMO

Esta pesquisa trata da avaliação de vulnerabilidade natural de aquíferos e de análises espaciais sobre os postos de abastecimento de combustíveis e os poços de captação de água subterrânea no Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB). Os cruzamentos dessas informações frente aos usos com potenciais de contaminação promoveram uma abordagem diferenciada para a área estudada, cuja configuração territorial contempla um planejamento voltado para sua preservação sem considerar, porém, as fragilidades do meio físico com maiores detalhes. Os mapeamentos de vulnerabilidade surgem como argumento fundamental para orientar os usos e ocupações do “invisível” espaço urbano subterrâneo, alinhando as premissas de preservação do Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília (PPCUB) e a proteção do binômio solo-água subterrânea. Dentro deste contexto, o trabalho discorre sobre cenários de vulnerabilidade natural tratados a partir da aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os resultados obtidos após tal procedimento oferecem subsídios e aporte teórico favoráveis à inclusão do tema em estudos futuros sobre ocupações do sítio tombado. A pesquisa não somente adotou metodologias clássicas para a determinação de vulnerabilidade de aquíferos como também discutiu a evolução conceitual dos termos técnicos, além de considerar hipóteses e ajustes das aplicações dos métodos mais recentes. No que concerne à implementação dos resultados em políticas públicas setoriais de urbanismo e meio ambiente, os estudos de vulnerabilidade encontram, nas Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 396/2008 e 420/2009, o arcabouço legal para fundamentar a necessidade de proteção às águas subterrâneas. O trabalho busca, portanto, correspondências entre as ocupações e os usos propostos pelo PPCUB por um lado, e a capacidade de suporte das respectivas zonas de vulnerabilidade por outro.

Palavras chave: vulnerabilidade, CUB; aquífero; Brasília; postos de abastecimento de combustíveis; Sistemas de Informação Geográfica.

ABSTRACT

This research focuses on the assessment of aquifer vulnerability and spatial analyses of both gas stations and undergroundwater wells within the Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB) [Brasília Urbanistic Area]. The intersection of the gathered data contrasted to the potential pollutive use has promoted a distinct view on this area occupation, which territorial configuration has involved preservation plans without taking into consideration environmental fragilities with further details. Mapping the vulnerability areas has come as a fundamental argument for guiding both the uses and the occupations of this “invisible” underground urban space so that the Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília (Preservation Plan of Brasília Urbanistic Area) premises and the soil-underground water binomial protection can be aligned. Within this context, this paper presents scenarios of natural aquifer vulnerability provided by the Geographic Information System (GIS) application. The results obtained after the procedure offer subsidies and theoretical support for the inclusion of the theme in studies of this heritage site future occupations. This research not only has adopted classical methodologies for determining the vulnerability of aquifers but also has brought into discussion technical terms conceptual evolution apart from considering hypotheses and adjustments in more recent method applications. Regarding the implementation of the results in urban and environmental public policies, studies on vulnerability have found legal background for founding the need of preserving underground water in the 396/2008 and 420/2009 resolutions of the Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) [National Council of Environment]. This research aims at finding correspondence with the occupations and PPCUB usage proposals on one side, and the support capacity of the vulnerability zones on the other.

Keywords: vulnerability; CUB; aquifer; Brasília; gas stations; Geographic Information System.

Lista de Abreviaturas e Siglas

ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do DF
ANA	Agência Nacional de Águas
CAESB	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONPLAN	Conselho de Planejamento Territorial e Urbano do DF
CUB	Conjunto Urbanístico de Brasília
DF	Distrito Federal
DRASTIC	Acrônimo do Método DRASTIC (Depth of water (D), Recharge (R), Aquifer media (A), Soil media (S), Topography (T), Impact of the vadose zone (I) e Conductivity Hydraulic (C))
DRASTIC - PAC	Metodologia derivada do DRASTIC, aplicada a PACs
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMO	Eixo Monumental
EPIA	Estrada Parque Indústria e Abastecimento
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GOD	Acrônimo dos parâmetros do Método GOD (Grau de confinamento (G), Ocorrência do estrato de cobertura (O) e Nível freático (D))
ha.	hectare
IS	Índice de Susceptibilidade
LSIE	Laboratório de Sensores e Informações Espaciais da UnB
LU	Land Use (Uso do solo)
LUOS	Lei de Uso e Ocupação do Solo
MDT	Modelo Digital do Terreno
MNT	Modelo Numérico do Terreno
NCR US	Conselho de Pesquisa Nacional dos Estados Unidos
NHRI	National Hydrology Research Institute (Canada).
PAC	Posto de abastecimento de combustível
PDL	Plano Diretor Local
PDOT	Plano Diretor de Ordenamento Territorial do DF

PEOT	Plano Estruturador de Organização Territorial do DF
POT	Plano de Ocupação Territorial do DF
POUSO	Plano de Ocupação e Uso do Solo do DF
PPCUB	Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília
SEDUH	Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação do DF
SEGETH	Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação do DF
SEMA - PR	Secretaria do Meio Ambiente do Paraná
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINTACS	Acrônimo dos parâmetros do Método SINTACS (Profundidade do aquífero (S), Recarga ou Infiltração (I), Característica ou influência da zona não-saturada (N), Tipo de Solo (T), litologia do Aquífero (A), Condutividade hidráulica (C) e Topografia (S)
SISPLAN	Sistema de Planejamento Territorial e Urbano do DF
SITURB	Sistema de Informações Territoriais e Urbanas do DF
UPT	Unidade de Planejamento Territorial
ZEE – DF	Zoneamento Ecológico-Econômico do DF

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa das poligonais do CUB e PPCUB.....	18
Figura 2: Mapa de Solos do CUB.....	20
Figura 3: Mapa de Geologia do CUB.....	22
Figura 4: Mapa dos aquíferos do sistema poroso.	25
Figura 5: Mapa de Geomorfologia do CUB.	27
Figura 6: Escalas operacionais de atividades relacionadas à proteção das águas subterrâneas. (Foster, 2002).	34
Figura 7: Esquema ilustrativo da metodologia DRASTIC (Guiger,2002).	36
Figura 8: Escala de Vulnerabilidade DRASTIC. Aller et al. (1987).	37
Figura 9: Esquema GOD, adaptado de Foster (2002).	38
Figura 10: Fluxograma geral da pesquisa.....	42
Figura 14: Semivariograma do nível freático.	44
Figura 15: Semivariograma da cota do terreno.	44

Figura 13: Mapa de sondagens.	45
Figura 12: Variações dos valores de condutividade hidráulica (Freeze e Cherry, 1979).	47
Figura 11: Fluxograma das metodologias GOD, DRASTIC e DRASTIC – PAC.	47
Figura 16: Procedimentos para gerar o MNT.	52
Figura 17: Procedimentos para estimativa da Densidade de Kernel.	56
Figura 18: Mapa do Grau de Confinamento do aquífero.	59
Figura 19: Mapa da ocorrência de estrato de cobertura.	60
Figura 20: Mapa do nível freático GOD.	61
Figura 21: Mapa da vulnerabilidade GOD.	62
Figura 22: Mapa do nível freático – DRASTIC.	63
Figura 23: Mapa de recarga anual – DRASTIC	65
Figura 24: Mapa de solos – DRASTIC.	66
Figura 25: Mapa de Impacto da Zona não saturada – DRASTIC.	68
Figura 26: Mapa do Material do Aquífero - DRASTIC	69
Figura 27: Mapa de Declividade – DRASTIC.	70
Figura 28: Mapa de Condutividade – DRASTIC.	71
Figura 29: Mapa Índice DRASTIC.	72
Figura 30: Mapa da densidade de Kernel	74
Figura 31: Mapa de proximidade – PACs e poços de outorga de água subterrânea.	75
Figura 32: Mapa Vulnerabilidade DRASTIC – PAC.	77

Lista de Tabelas

Tabela 1: Classificação dos aquíferos subterrâneos do Distrito Federal.	23
Tabela 2: Unidades Hidrográficas de Gerenciamento da Bacia do Lago Paranoá.	28
Tabela 3: Unidades Hidrográficas de Gerenciamento no CUB.	28
Tabela 4: Pesos e índices dos parâmetros DRASTIC.	36
Tabela 5: Parâmetros e pesos do método Índice de Susceptibilidade.	41
Tabela 6: Intervalos e Classes de Vulnerabilidade do Índice de Susceptibilidade.	41
Tabela 7: Tabela dos parâmetros, dados primários, escala e fonte.	43
Tabela 8: Pesos e índices para o nível freático.	48
Tabela 9: Tabela de dados das estações pluviométricas consideradas no cálculo da pluviometria	49
Tabela 10: Pesos e Índices para a Recarga.	50

Tabela 11: Pesos e índices para a declividade.	52
Tabela 12: Pesos e Índices para Influência da Zona não- saturada (I).	53
Tabela 13: Pesos e índices para a Densidade de Kernel.	56
Tabela 14: Peso Índices da distância entre PACs e poços de captação de água subterrânea. ..	57
Tabela 15: Representatividade da textura do solo na área de estudo.	66
Tabela 16: Representatividade da textura da zona não saturada.	67
Tabela 17: Representatividade da textura do material do aquífero.	69
Tabela 18: Distribuição postos de abastecimento (PAC) e poços de captação de água subterrânea. DRASTIC.	73
Tabela 19: Distribuição postos de abastecimento (PAC) e poços de captação de água subterrânea. DRASTIC - PAC.	77
Tabela 20: Resultado da tabulação das vulnerabilidades DRASTIC e DRASTIC – PAC.	78

Lista de Quadros

Quadro 1: Classes de Vulnerabilidade de aquíferos à poluição.	32
Quadro 2: Quadro Resumo – Métodos para avaliação natural de aquíferos.	34

ÍNDICE

1.INTRODUÇÃO.....	13
2.JUSTIFICATIVA	14
3.OBJETIVOS.....	14
4. CONTEUDO DA PESQUISA	15
5.CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
5.1. CONTEXTO INSTITUCIONAL DO CUB	16
5.2. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO DO CUB	19
5.2.1. SOLOS	19
5.2.2. GEOLOGIA	21
5.2.3. HIDROGEOLOGIA.....	23
5.2.4. GEOMORFOLOGIA	26
5.2.4. HIDROGRAFIA	28
6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
6.1 VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO.....	31
6.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO	32
6.2.1. METODOLOGIA DRASTIC	35
6.2.2 METODOLOGIA GOD.....	38
6.2.3. MÉTODO AQUIFER VULNERABILITY INDEX.....	39
6.2.4. SINTACS	40
6.2.5 INDICE DE SUSCEPTIBILIDADE.....	40
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
7.1. AQUISIÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS	42
7.2. METODOLOGIA	46
7.2.1. DRASTIC.....	48
7.2.2. GOD	53
7.2.3. DRASTIC PAC	54
8. DISCUSSÃO E RESULTADOS DAS VULNERABILIDADES DOS MÉTODOS GOD, DRASTIC E DRASTIC – PAC.....	58
8.1. RESULTADO DA METODOLOGIA GOD.....	58
8.1.1. GRAU DE CONFINAMENTO	58
8.1.2. OCORRÊNCIA DO ESTRATO DE COBERTURA.....	59
8.1.3. NÍVEL FREÁTICO	60

8.1.4 RESULTADO ÍNDICE GOD	61
8.2. RESULTADOS DOS PARÂMETROS E ÍNDICE DRASTIC	63
8.2.1 NIVEL FREÁTICO	63
8.2.2. RECARGA.....	64
8.2.3. SOLOS	65
8.2.4. IMPACTO NA ZONA NÃO SATURADA	67
8.2.5. MATERIAL DO AQUIFERO	68
8.2.6. TOPOGRAFIA.....	70
8.2.7 CONDUTIVIDADE.....	71
8.2.8. RESULTADO DA VULNERABILIDADE DRASTIC	72
8.3. RESULTADO DO DRASTI PAC.....	73
8.3.1. DENSIDADE DE KERNEL.....	73
8.3.2. ANÁLISE DE PROXIMIDADE	75
8.3.3. ÍNDICE DRASTIC – PAC.....	76
9. CONCLUSÃO.....	79
10. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1.INTRODUÇÃO

O planejamento do Distrito Federal se faz presente desde sua criação, com a proposta do Plano Piloto de Lúcio Costa em 1957. Atualmente, a Lei Orgânica do Distrito Federal prevê quatro instrumentos de planejamento urbano: o Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT), a Lei de Uso e Ocupação – a qual abrange toda a área do Distrito Federal -, os Planos de Desenvolvimento Local (PDL) - que compreendem as Unidades de Planejamento Territorial (UPTs) - e o Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília (PPCUB).

Os trabalhos de atualização do diagnóstico da área do Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB) são contínuos e contam com revisões periódicas de 5 anos. As fragilidades do meio físico assim como sua relação com os usos que apresentam potencial de contaminação, porém, não são contemplados nesse diagnóstico, impossibilitando que usos mais conscientes sejam empregados como meta a ser cumprida por um tombamento que não se restrinja a questões urbanísticas.

Com o intuito de suprir tal lacuna, esta pesquisa levanta as características do meio físico por meio da avaliação de vulnerabilidade de aquíferos, como forma de prevenção e manutenção da qualidade das águas subterrâneas e de uma ocupação territorial que leve em consideração a compatibilidade da vulnerabilidade com as ocupações e usos pretendidos e repensem sobre as situações onde incompatibilidades forem identificadas.

Os estudos de vulnerabilidade vêm-se tornando uma ferramenta de gestão territorial no que concerne a proteção do binômio solo/água subterrânea e o planejamento do uso e ocupação do solo quando realizados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Para esta pesquisa, foram utilizados os métodos de vulnerabilidade DRASTIC e GOD, além de uma adaptação do primeiro, por meio do incremento de dois parâmetros de análises espaciais: um de densidade de postos de abastecimento de combustíveis (PAC) e outro de proximidade entre os PACs e os poços de captação de água subterrânea, de forma a permitir uma comparação entre os resultados encontrados.

Outros estudos de vulnerabilidade de aquíferos foram realizados no Distrito Federal através da simplificação de metodologia, como no Inventário Hidrogeológico do Distrito Federal e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal (1998), e no Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal – ZEE (2012), que adotou critérios específicos para inferir sobre vulnerabilidade da contaminação.

2.JUSTIFICATIVA

A avaliação de vulnerabilidade do aquífero poroso na área do CUB pelos métodos GOD e DRASTIC faz-se necessária tanto para definir diretrizes em escala local quanto para comparar os resultados entre si. Os estudos realizados anteriormente para o Distrito Federal pelo Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal (1998) e Zoneamento Ecológico Econômico (2011) contemplaram a vulnerabilidade por meio de simplificações metodológicas.

As análises de vulnerabilidade de aquífero corroboram com as Resoluções do CONAMA Nº 396/2008 e 420/2009 ao fornecerem subsídios aos órgãos ambientais, de recursos hídricos e saúde para definir restrições e medidas de controle no uso de água subterrânea, bem como para a implementação de áreas de proteção de aquífero.

Os estudos do Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília (PPCUB) não apresentam questões de avaliação do meio físico face ao tombamento, principalmente com foco em usos com potencial poluidor significativo, como é o caso de postos de abastecimento de combustíveis. É essencial, por isso, buscar preencher essa lacuna com o propósito promover uma ocupação mais sustentável e consciente.

3.OBJETIVOS

O objetivo geral é avaliar a vulnerabilidade do aquífero poroso no Conjunto Urbanístico de Brasília com intuito de ocupar o território com sustentabilidade.

Os objetivos específicos são os listados a seguir:

Avaliar a vulnerabilidade do aquífero poroso pelas metodologias GOD e DRASTIC, integradas a Sistemas de Informações Geográficas; e

Considerar a presença de postos de abastecimento de combustíveis e outorgas de poços de água subterrânea no cenário de vulnerabilidade da metodologia DRASTIC.

4. CONTEUDO DA PESQUISA

A fim de possibilitar o desenvolvimento da pesquisa, a seguinte ordem de assuntos foi respeitada:

- **Capítulo 1** – Compreende a Introdução, Objetivos, Justificativa, Conteúdo da pesquisa e Caracterização da área de trabalho, cada seção pormenorizada a seguir:
- Introdução – proporciona, em linhas gerais, uma descrição da problemática da interface entre o planejamento e os estudos de vulnerabilidade na área do CUB;
- Justificativa – aponta a necessidade dos estudos de vulnerabilidade para eficiência da gestão territorial;
- Objetivos – dispõe sobre o que se espera encontrar uma vez em posse dos resultados da vulnerabilidade.
- Caracterização da Área de Estudo – trata dos aspectos físicos do CUB relacionados à vulnerabilidade de aquíferos (solos, geologia, hidrogeologia, geomorfologia e hidrografia), assim como aspectos de tombamento e preservação.
- **Capítulo 2** – apresenta a revisão bibliográfica e discute tanto a evolução de conceitos de vulnerabilidade quanto a aplicação de metodologias de avaliação. Aqui, são abordados estudos de casos, suas aplicabilidades e limitações, além das novas perspectivas de investigação frente aos avanços das técnicas e métodos utilizados.
- **Capítulo 3** – diz respeito à coleta, à edição e ao tratamento dos dados de fontes distintas, bem como às especificidades das metodologias aplicadas; leva em conta também hipóteses e adaptações dos métodos.
- **Capítulo 4** – ocupa-se dos resultados de parâmetros e índices gerais obtidos pelos métodos, tecendo comentários sobre as particularidades encontradas.
- **Capítulo 5** – sugere a aplicação dos resultados encontrados em políticas de gestão territorial e de recursos hídricos e elenca possibilidades de trabalhos futuros.

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O planejamento para a ocupação do Conjunto Urbanístico de Brasília tem seguido um mesmo padrão desde sua criação até o momento do tombamento da cidade, focando em normas de conservação e preservação. Além da caracterização dos aspectos fisiográficos relacionados

à vulnerabilidade de aquíferos, faz-se fundamental a contextualização dos princípios urbanísticos e institucionais referentes aos usos e às ocupações do sítio tombado.

5.1. CONTEXTO INSTITUCIONAL DO CUB

O Plano Estruturador de Organização Territorial (PEOT) foi homologado por meio do Decreto 4.409, de 10 de janeiro de 1977 (Distrito Federal, 1977), e constitui-se, de fato, no primeiro documento norteador de gestão territorial capaz de detectar a desarticulação de núcleos urbanos e definir áreas de expansão urbana, tendo esta última o foco na implantação do transporte de massa.

O Plano de Ocupação Territorial do Distrito Federal (POT) estabeleceu o sistema normativo de Uso e Ocupação do Solo do Distrito Federal, consolidando as propostas do Plano Estruturador de Organização Territorial do DF (PEOT) e já considerando um macrozoneamento dividido em zonas urbanas, rurais e naturais. Este documento, elaborado em 1985, não chegou a ser realmente aprovado, porém, as premissas por ele estabelecidas serviram de subsídios para os estudos posteriores.

O Brasília Revisitada, embora não constitua um plano diretor, merece também destaque visto que possibilitou que o CUB tivesse definidas tanto sua poligonal de tombamento bem como as propostas de ocupações futuras em seu interior. O Decreto 10.829, de 14 de outubro de 1987 (Distrito Federal, 1987), anexou o documento Brasília Revisitada, assegurando a manutenção do projeto original de Lúcio Costa pela concepção das quatro escalas da concepção urbana original da cidade: a monumental, a gregária, a residencial e a bucólica.

O Plano de Ocupação e Uso do Solo (POUSO), por sua vez, foi aprovado pelo Decreto nº 12.898, de 13 de dezembro de 1990. Esse plano contém os princípios do documento Brasília Revisitada, do POT e do PEOT, o que permitiu ressaltar a proteção dos mananciais de abastecimento público e das áreas de preservação permanente - ambas estabelecidas pelo Código Florestal - e a necessidade de estudos ambientais prévios, previstos nas resoluções do CONAMA.

O Plano Diretor de Ordenamento Territorial do ano de 1992 (PDOT/92) harmonizou a particularidade de ter sido formulado e atualizado no interstício de sua data de elaboração – Lei nº 212, de 20 de dezembro de 1991 (Distrito Federal, 1991) - até a aprovação da Lei Orgânica do Distrito Federal, dado que esta previa outros moldes para a constituição desse plano.

O PDOT foi oficialmente aprovado nos termos da Lei nº 353, de 18 de janeiro de 1992 (Distrito Federal, 1992), e, mais adiante, a Lei Orgânica do Distrito Federal foi promulgada (Distrito Federal, 1993). Sua elaboração teve como fundamento as informações contidas nos documentos técnicos disponíveis na época acerca de demografia, sócio economia e meio ambiente; muitos destes provenientes do Plano Diretor de Águas e Esgotos e Controle da Poluição Hídrica do Distrito Federal, elaborado pela CAESB em 1990.

O PDOT/92 ainda instituiu o Sistema de Planejamento Territorial e Urbano do Distrito Federal (SISPLAN), o Sistema de Informações Territoriais e Urbanas do Distrito Federal (SITURB) e o Conselho de Planejamento Territorial e Urbano do Distrito Federal (CONPLAN). Essas medidas contribuíram para o crescimento e aprimoramento da cartografia e seus estudos complementares. (COSTA, 2011).

Nos termos da Lei Orgânica do Distrito Federal, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial é o instrumento básico das políticas de ordenamento territorial e das de expansão e desenvolvimento urbanos, sendo complementados pela Lei de Uso e Ocupação do Solo e os Planos de Desenvolvimento Locais (PDL). No sítio urbano tombado, o Plano de Preservação do Conjunto Urbanístico de Brasília (PPCUB) substitui o PDL.

O art. 6º do Projeto de Lei do PPCUB estabelece que os objetivos gerais do plano se fundamentam, prioritariamente, na consolidação, no resguardo e na valorização do Conjunto Urbanístico de Brasília como sítio tombado e Patrimônio Cultural da Humanidade.

Os objetivos ocorrem tanto por meio da aplicação de instrumentos de política urbana que assegurem sua preservação e seu desenvolvimento sustentável quanto pelo estabelecimento de diretrizes compatíveis com esta condição, protegendo, recuperando, valorizando e fomentando suas potencialidades de sítio histórico (MARQUEZ, 2007).

O Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB) perfaz uma área de 11.258 ha. e ocupa a parte central do Distrito Federal, tendo como limites físicos a orla do Lago Paranoá a Leste, a Estrada Parque Indústria e Abastecimento – EPIA a Oeste, o Córrego Vicente Pires ao Sul e o Córrego Bananal ao Norte, considerado entorno direito dos dois eixos que estruturam o Plano Piloto conforme estabelecido no §2º, Art. 1º, Decreto nº 10.829, de 14 de outubro de 1987(DISTRITO FEDERAL, 1987). Os estudos do PPCUB estabeleceram como polígono do PPCUB a área do CUB acrescido da área do Lago Paranoá, conforme a Figura 1

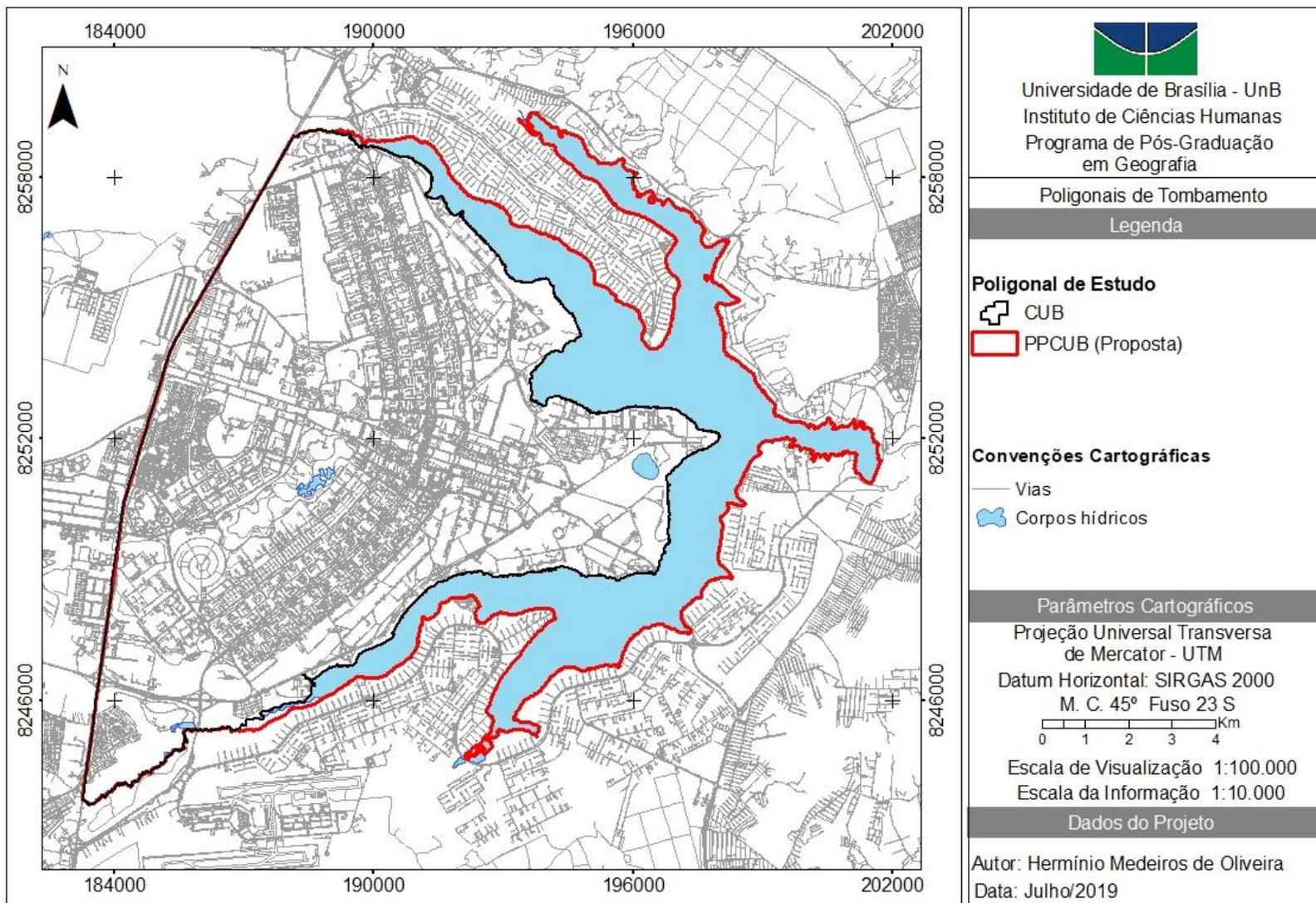


Figura 1: Mapa das poligonais do CUB e PPCUB.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO DO CUB

O Distrito Federal cobre uma área de 5.814 km², cujos limites ao norte e sul são os paralelos de 15°30' e 16°03'S, respectivamente. Os limites a leste e oeste se aproximam dos meridianos de 47°18' e 48°17' W.Gr., por tomarem os rios Preto e Descoberto para a demarcação dessa divisa. A caracterização da área de estudo irá se ater aos aspectos fisiográficos que tem relação com vulnerabilidade de aquíferos.

5.2.1. SOLOS

A caracterização apresentada neste trabalho é focada nos aspectos que guardam relação com a vulnerabilidade de aquíferos. Portanto, em linhas gerais, a abordagem será considerando a sensibilidade do solo e sua relação com processos erosivos, e das relações que o solo tem com os aquíferos, cuja base de informação é o documento Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal, (EMBRAPA,1978).

Os latossolos predominam a área do CUB, e apresentam profundidades de até 20 metros com taxa de infiltração moderada. Campos e Gonçalves (2015) estimou a taxa de infiltração na ordem de 10⁻⁴ a 10⁻⁷ m/s, concluindo que os latossolos proporcionam a formação de aquíferos porosos importantes e constituem também áreas de recarga para aquíferos fraturados.

Em termos de ocorrência de processos erosivos, os solos do DF foram caracterizados pelo ZEE – DF (2011), avaliando a sensibilidade do solo e do risco ecológico de perda de solo por erosão. A área do CUB apresentou os menores valores em relação a erodibilidade e da perda de solo por erosão, mostrando que as características físicas do latossolo, com percentual 20% de argila e 20% de Argila, faz dessas características intrínsecas do latossolo resistentes a processos erosivos (REATOO et al., 2004).

A taxa de infiltração moderada dos solos no CUB é confirmada, em parte, pela presença de argila, fazendo também uma certa resistência a propagação de contaminação. Porém, essa afirmação é em relação às características intrínsecas, uma proteção natural do solo, pois a propagação e o transporte de contaminantes dependem de outros fatores.

A Figura 2 ilustra os tipos de solos na área do CUB, predominando o Latossolo vermelho, e pequenas zonas de Latossolo vermelho-amarelo e Gleyssolo háplico, este último corresponde à calha do ribeirão Bananal.

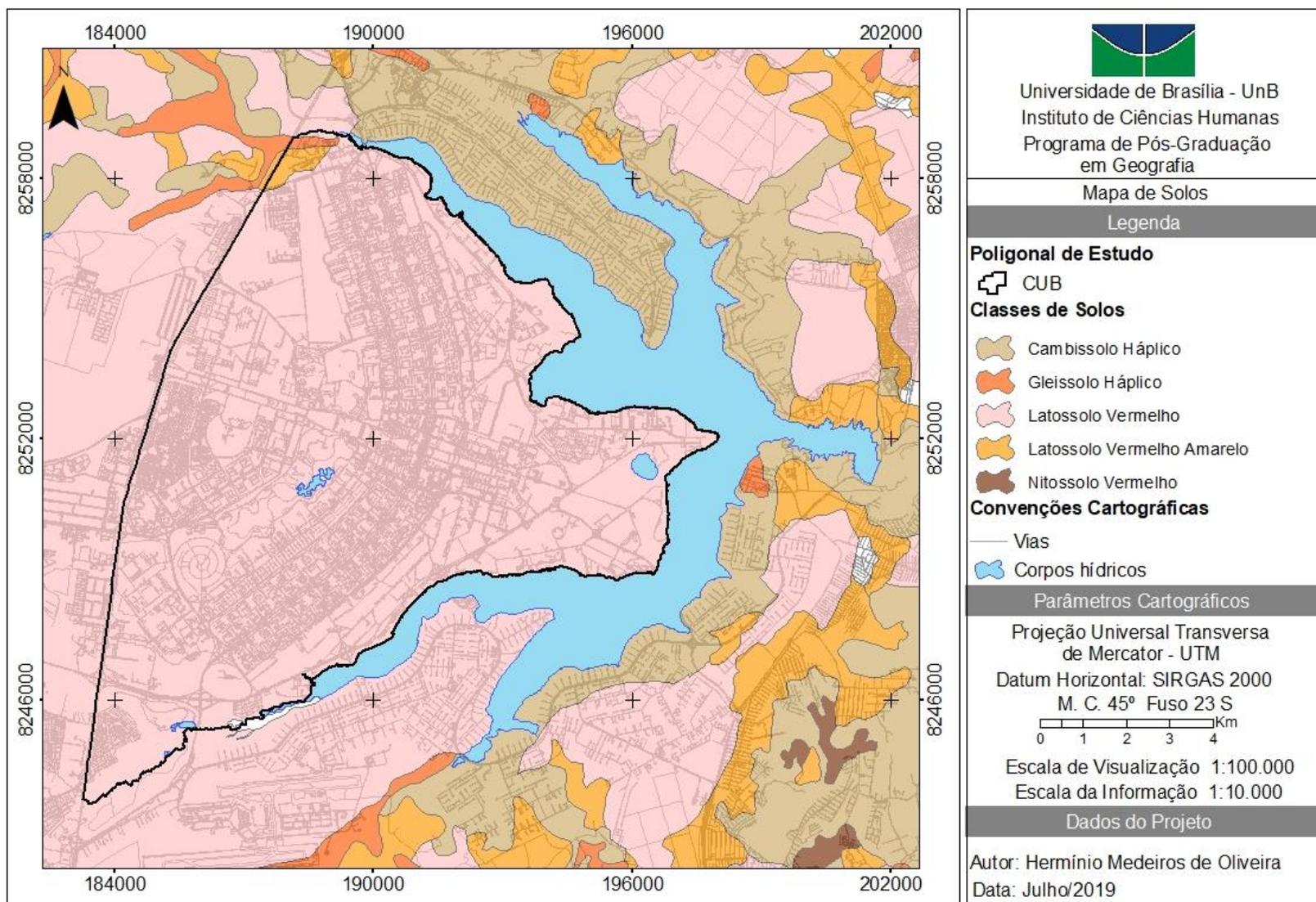


Figura 2: Mapa de Solos.

5.2.2. GEOLOGIA

A geologia do Distrito Federal apresenta a divisão das rochas em 4 grupos: Canastra, Paranoá, Araxá e Bambuí, com suas coberturas de solos Freitas-Silva e Campos (1998). Os grupos Paranoá e Canastra apresentam idade Mesoproterozóica e os grupos Araxá e Bambuí, idade Neoproterozóica.

O Distrito Federal cobre, aproximadamente, 65% do território pertencente ao Grupo Paranoá, onde está inserido o Conjunto Urbanístico de Brasília. Este grupo teve formalizada sua designação por letra-código por Campos et al. (2013), os quais agruparam as camadas por formações. Na área do CUB estão presentes as Formações Ribeirão do Torto e Ribeirão Piçarrão.

A Formação Ribeirão Piçarrão apresenta uma litofácie peculiar de metassiltitos argilosos homogêneos, cinza esverdeados a amarelada quando frescos, passando a tons rosados e vermelho escuro após intemperismo. Nessa Formação, estão os metassiltitos com níveis de quartzitos finos, camadas de quartzito médios a grossos, rochas carbonáticas dispostas em lentes interdigitadas a metarritmitos e ainda metarritmitos com bancos de quartzitos arcoseanos. (CAMPOS et al., 2013).

Segundo Campos et al.(2013), a Formação Ribeirão do Torto (MNPpart) apresenta ardósias cinza esverdeada, quando recentes, e cor avermelhada quando sofreram alteração das intempéries. Integra a formação as camadas de quartzitos brancos e amarelados, que aparecem em contornos restritos, na forma irregular e maciças de lentes métricas ou decamétricas, respectivamente, assim como pode ser observado na Figura 3, que ilustra a geologia do sítio estudado.

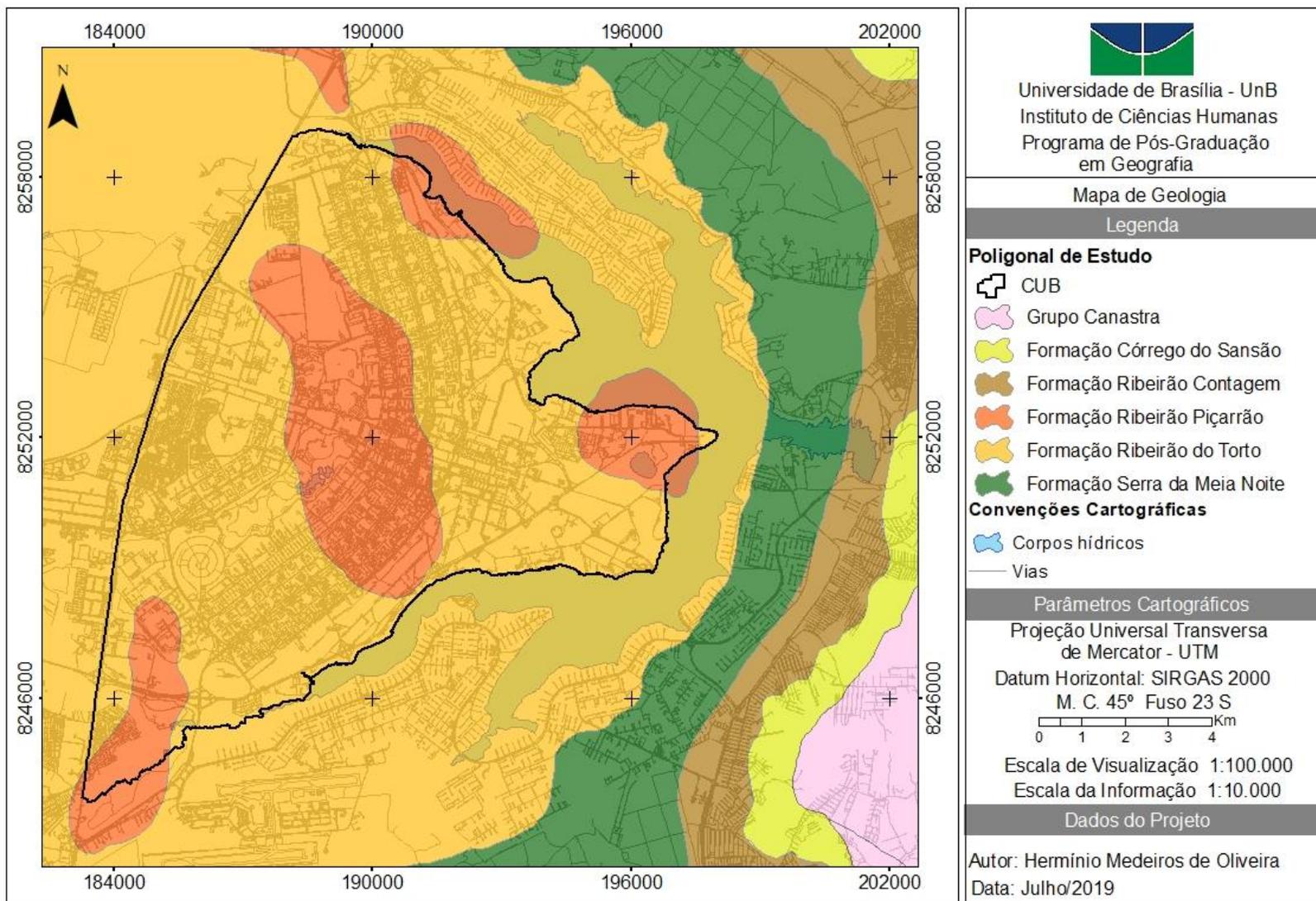


Figura 3: Mapa de Geologia

5.2.3. HIDROGEOLOGIA

No âmbito do Distrito Federal, Freitas-Silva e Campos (1998) propuseram - em função da porosidade - que os aquíferos fossem classificados em domínios: Intergranular, Fraturado e Físsuro-Cárstico; estes, por sua vez, foram subdivididos em sistemas e subsistemas, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos aquíferos subterrâneos do Distrito Federal.

Grupo	Domínio	Sistema	Subsistema	Solo/Rocha predominante
Freático	Intergranular	P ₁	-	Latosolos Arenosos e, Neossolos Quartzarênicos
		P ₂	-	Latissolo Argiloso
		P ₃	-	Plintossolos e Argissolos
		P ₄	-	Cambissolos
Profundo	Fraturado	Paranoá	S/A	Metassiltitos
			A	Ardósias
			R ₃ /Q ₃	Quartzitos e metarritmitos arenosos
			R ₄	Metarritmitos micáceos
		Canastra	F	Filitos micáceos
		Bambuí	-	Siltitos e arcóseos
		Araxá	-	Mica xistos
	Físsuro-Cárstico	Paranoá	PPC	Metassiltitos e lentes de mármore
		Canastra	F/Q/M	Calcifilitos, quartzitos e mármore
		Bambuí	-	Lentes de calcáreos

Fonte: Freitas-Silva e Campos (1998).

Os aquíferos do tipo freático são aqueles onde a porosidade ocorre entre os grãos, comumente nominada de intergranular. A porosidade compreende a fração relativa do volume da rocha que é ocupada por poros, no caso dos aquíferos, os poros estão preenchidos por água. Segundo Campos e Gonçalves (2015), no Distrito Federal os aquíferos freáticos compreendem os solos e rochas em alteração. O nível freático é a superfície que demarca o estrato, cujos poros estão totalmente ocupados por água, dos estratos, onde os poros estão parcialmente preenchidos.

Os aquíferos desse domínio são diferenciados nos sistemas P₁, P₂, P₃ e P₄, em função de vários parâmetros, dos quais dois são destacados: a espessura saturada (zona onde os vazios, poros ou fraturas, se encontram totalmente preenchidos d'água) e a condutividade hidráulica (velocidade de fluxo da água no meio), sendo que ambos são diretamente controlados pelo tipo de material geológico e pelo relevo do terreno onde cada tipo se desenvolve. (CAMPOS e GONÇALVES, 2015).

Por ser um domínio essencialmente representado pelos solos e pelo manto de alteração das rochas, pelo menos nos limites do Distrito Federal, o mapa dos domínios freáticos é derivado do mapa de solos, considerando propriedades como espessura saturada e a condutividade hidráulica, controladas pela geologia e geomorfologia. (GONÇALVES, 2016).

Campos e Gonçalves (2015), caracterizou os sistemas do domínio poroso no Distrito Federal, conforme o resumo a seguir descrito:

- Os sistemas P₁ e P₂ Constituem os aquíferos em solos bem desenvolvidos com mais de 20 metros e valores de condutividade hidráulica oscilando em torno de 10^{-6} m/s (alta). São áreas propícias a recarga e reserva de água;
- No Sistema P₃ as espessuras totais são reduzidas para menos de 10 metros e a capacidade de infiltração é moderada, com condutividade hidráulica na ordem de 10^{-6} m/s. Apesar de não apresentar boas condições para reservar água, em contrapartida atuam como depuradores; e
- O Sistema P₄ apresenta estratos com até 2,5 metros, sendo comum espessuras inferiores a 1 metro e valores de condutividade hidráulica muito baixa. Está associado a solos pouco desenvolvidos e relevo acidentado.

Pelo fato do estudo se ater ao sistema de aquífero raso (freático), a representação cartográfica será do domínio freático. A área do CUB apresentou apenas a classe de aquífero P₁, conforme Figura 4.

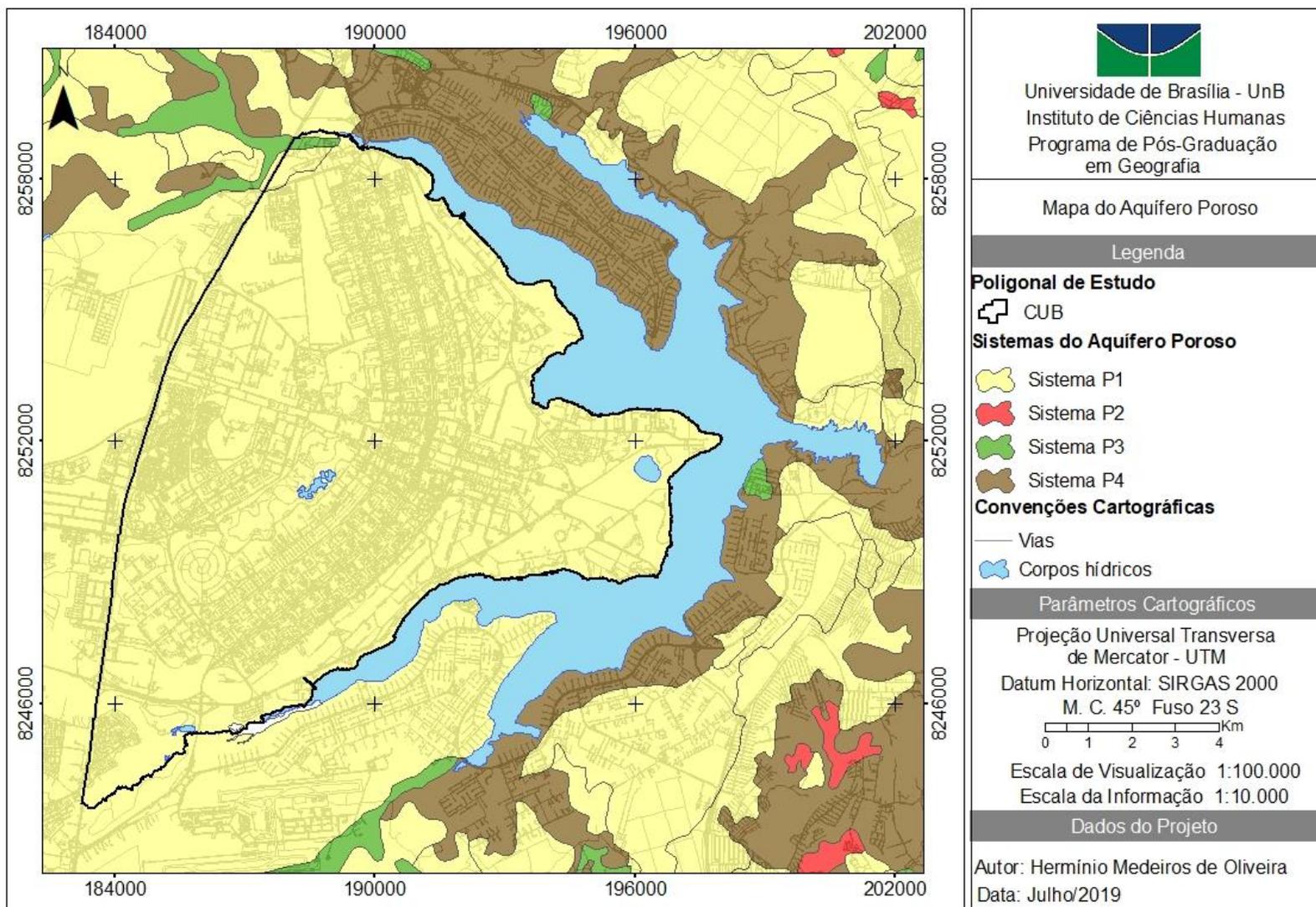


Figura 4: Mapa dos aquíferos do sistema poroso.

5.2.4. GEOMORFOLOGIA

Esta pesquisa considera a compartimentação geomorfológica proposta por Campos (2011), que revisou e atualizou as propostas de Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998), resultando na proposição de 5 unidades geomorfológicas: Plano Elevado, Plano Intermediário, Vale Dissecado, Rebordo e Rampa íngreme.

O Plano elevado consiste em áreas com declividade superiores a 10%, de relevo suave a plano e declividade inferior a 10%. A cobertura é de latossolo vermelho e vermelho-amarelo.

O Plano intermediário, com características similares ao Plano elevado, difere deste por apresentar declividade até 12% e altitude entre 950 e 1.050 metros, predomina também a presença de latossolos.

Os Vales dissecados apresentam declividades superiores a 20% e altitudes inferiores a 850 metros, apresenta uma alta densidade de rede de drenagem, com predomínio dos cambissolos, por consequência, uma baixa taxa de infiltração.

O Rebordo apresenta declividade entre 10 e 20% e altitudes entre 950 e 1.100m. A rede de drenagem é moderada e os cambissolos se fazem dominantes, neste compartimento, porém em menor quantidade que nos vales dissecados.

A Rampa íngreme o relevo dominante é forte ondulado e escarpado, declividades superiores a 25% e cotas entre 800 e 1000m, repete-se a predominância dos cambissolos e alta densidade de drenagem.

Dentro desse contexto, as áreas com declividades altas, com predominância de latossolos e relevo suave, e baixa rede de drenagem, por estas características se constituem as compartimentações geomorfológicas com maior significância em termos da recarga de aquíferos.

As características da área do CUB, totalmente inserido na região de Plano Intermediário. Por ser uma área plana associada ao latossolo vermelho, não favorece a ocorrência de processos erosivos intrínsecos, porém é uma importante área de recarga, e por este fato, avaliação e estudos sobre contaminação e vulnerabilidade devem ser considerados, em quaisquer abordagens sobre o meio físico. A Figura 5 exhibe o mapa de compartimentação geomorfológica do sítio estudado.

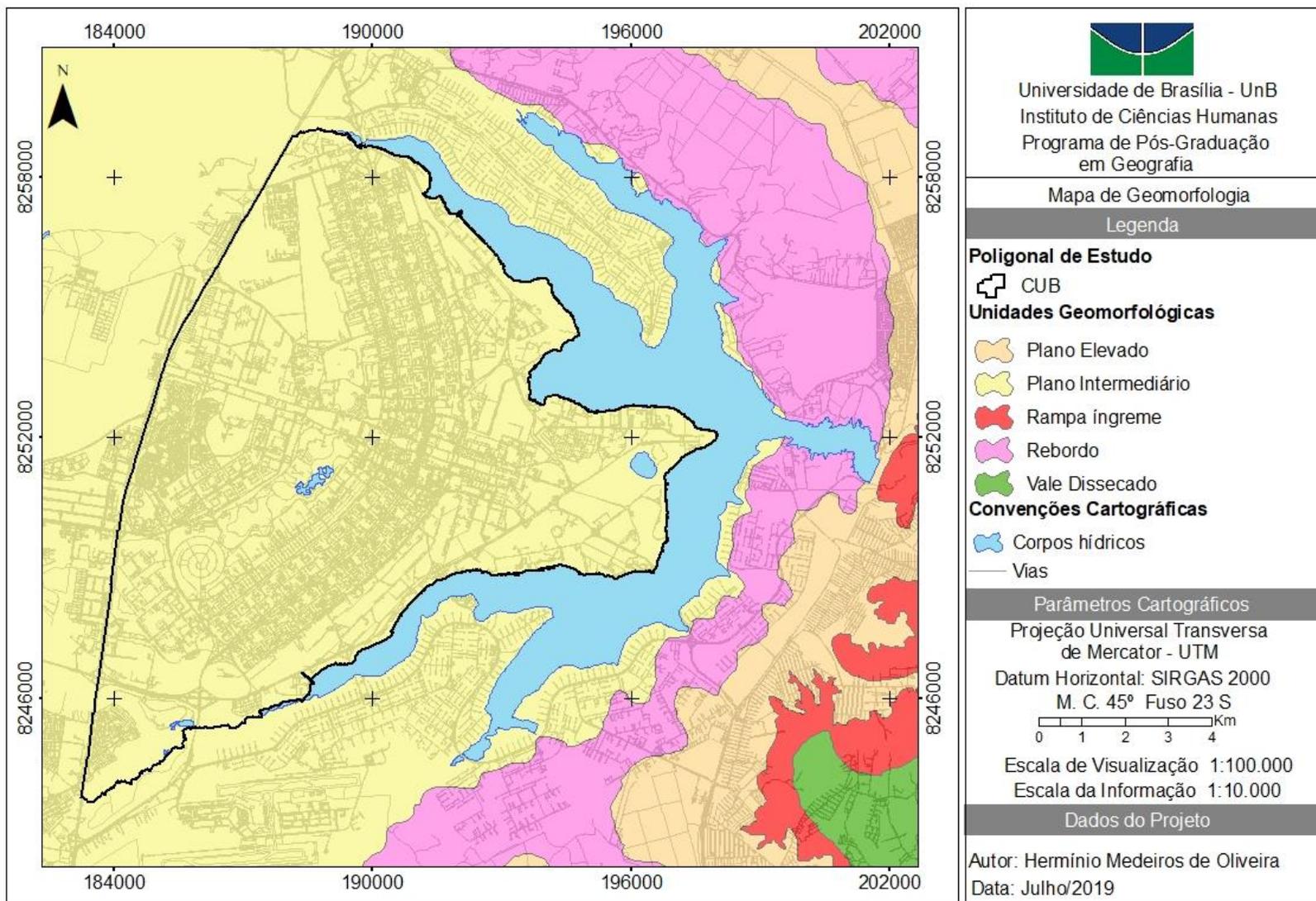


Figura 5: Mapa de Geomorfologia.

5.2.4. HIDROGRAFIA

A Bacia do Lago Paranoá apresenta drenagem anelar com sentido de escoamento de Oeste para Leste, ocupando uma área de aproximadamente 1.056,29 Km². É constituída por cinco unidades hidrográficas de gerenciamento: Ribeirão do Torto, Córrego Bananal, Riacho Fundo, Ribeirão do Gama e Lago Paranoá, cuja distribuição é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Unidades Hidrográficas de Gerenciamento da Bacia do Lago Paranoá.

Unidade Hidrográfica de Gerenciamento	Área (km ²)
Riacho Fundo	200,57
Córrego Bananal	122,12
Ribeirão do Gama	150,12
Lago Paranoá	337,48
Ribeirão do Torto	245,95

Fonte: O Autor.

A área do Conjunto Urbanístico de Brasília ocupa o centro da Bacia do Lago Paranoá, que tem a particularidade de estar totalmente inserida no Distrito Federal, corroborando para uma gestão sem conflitos com outros estados, principalmente no que diz respeito a qualidade dos corpos hídricos tributários do Lago Paranoá, que vem sendo utilizado como manancial de abastecimento público. O Conjunto Urbanístico de Brasília engloba parcialmente três unidades hidrográficas de gerenciamento, conforme ilustra a Tabela 3.

Tabela 3: Unidades Hidrográficas de Gerenciamento no CUB.

Unidade Hidrográfica de Gerenciamento	Área (km ²)
Riacho Fundo	6,59
Córrego Bananal	6,99
Lago Paranoá	98,99

Fonte: O Autor.

As áreas de contribuição das Bacias do Riacho Fundo e Córrego Bananal apesar de inserida em área urbana, apresenta baixo índice de ocupação, representam, respectivamente

5,85% e 6,21% da área do CUB. O restante do CUB - 87,94% - pertence a unidade hidrográfica do Lago Paranoá, onde a ocupação urbana se faz marcante.

A unidade hidrográfica do Córrego Bananal é formada pelo ribeirão Bananal e pelo córrego Acampamento e outros tributários de menor porte, contribuindo diretamente para o Lago Paranoá. A parcela da bacia do córrego Bananal que cobre a área do CUB compreende o Setor Noroeste, Setor Militar Urbano e Parque Burle Max, cuja contribuição é proveniente da infiltração e/ou do escoamento superficial, não há corpos hídricos superficiais.

A unidade hidrográfica do Riacho Fundo tem como corpo hídrico principal o Riacho Fundo e os afluentes de destaque são: Açudinho, Coqueiros, Vicente Pires e Guará. Na área do CUB, compreende as regiões administrativas da Candangolândia e Brasília. O córrego Guará recebe a contribuição do escoamento superficial da Candangolândia e do Jardim Zoológico de Brasília.

A unidade hidrográfica do Lago Paranoá cobre a maior parte da área do CUB e conta com o Lago Paranoá que recebe a contribuição de córregos pequenos em toda a sua extensão. O Lago Paranoá recebe a contribuição da drenagem pluvial das regiões administrativas do Plano Piloto, Sudoeste, Octogonal, Cruzeiro e Lagos Sul e Norte, e de efluentes das Estações de Tratamento de Esgotos Brasília Sul e Norte.

A baixa densidade de corpos hídricos e o relevo plano que o CUB apresenta é indicativo que a área reflete sua vocação para recarga. Na área do CUB, faz-se presente o ribeirão Bananal (na extremidade Norte) e o córrego Guará e Riacho Fundo (na extremidade Sul), que estabelecem o limite da área tombada. Dois corpos hídricos intermitentes, identificados por codificação, se fazem presentes no final da Asa Norte (do Parque Olhos d'água até a ETE Norte) e final da Asa Sul (do Parque da Asa Sul até a ETE Sul), com extensões de 1.150m e 730m, respectivamente, conforme ilustra a Figura 6.

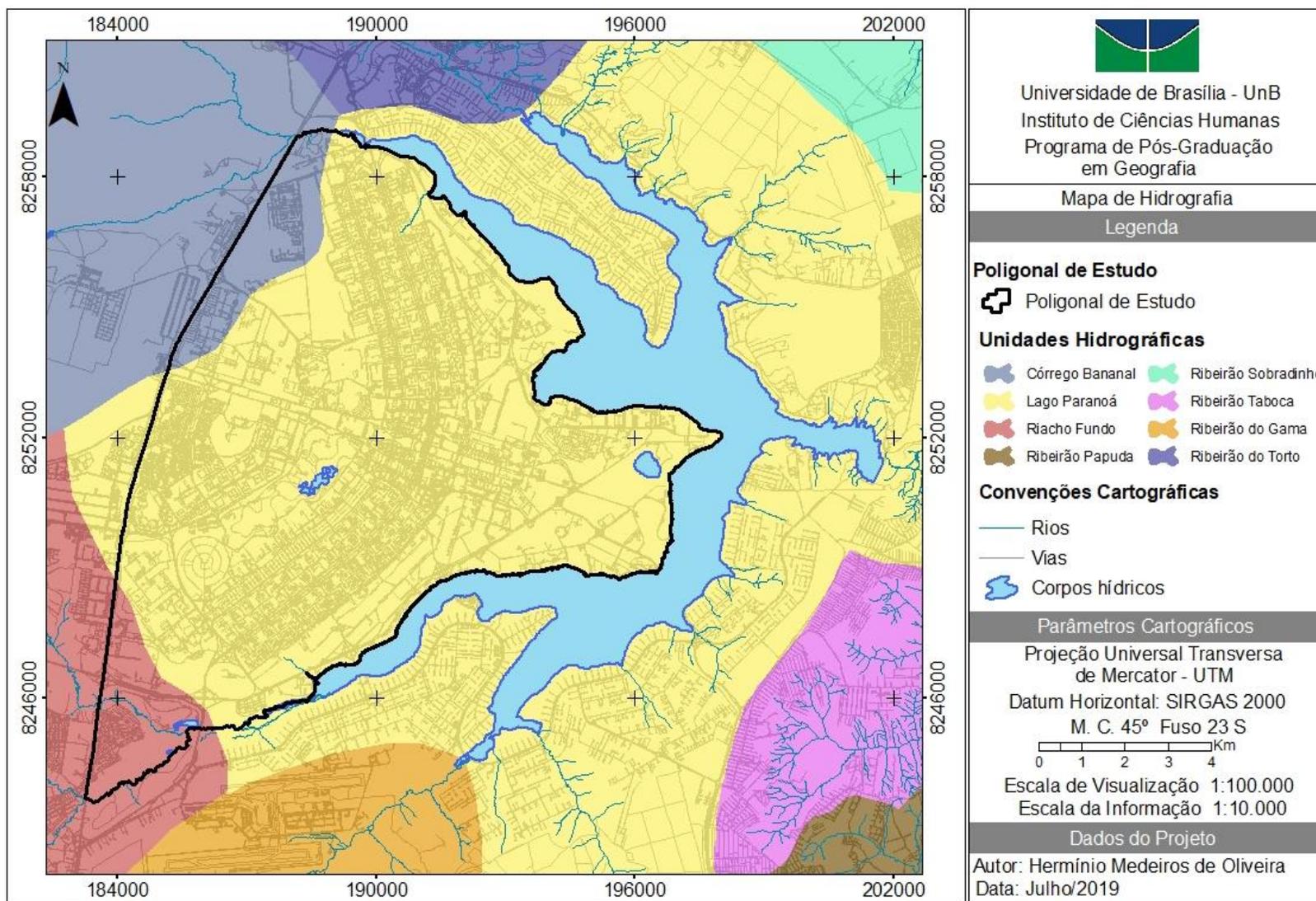


Figura 6: Mapa de Hidrografia

6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1 VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO

O conceito de vulnerabilidade evoluiu desde os primeiros estudos sobre o tema apresentados por Le Grand (1964) nos EUA, Albinet & Margat (1970) na França e Taltasse (1972) no Brasil.

No Brasil, o estudo da vulnerabilidade à contaminação no município de Campinas, nominado de “Poluição dos Lençóis Aquíferos, (TALTASSE, 1972), marca o advento da vulnerabilidade no Brasil. (PEREIRA JÚNIOR et al., 2015). Nesses primeiros estudos, não se buscou consenso sobre o termo vulnerabilidade, nem tão pouco foram estabelecidos postulados e premissas para aplicação de metodologias.

Com o advento da Conferência Internacional – Vulnerability of Soil and Groundwater Pollutants - em 1987, na Holanda, se fortaleceu o conceito de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. Legitimando esse posicionamento, Foster (1988) considerou os atributos naturais dos aquíferos que determinam a sensibilidade dos sistemas hidrogeológicos a serem afetados por uma contaminação ou poluente em nível significativo, como sendo a vulnerabilidade natural de aquíferos.

Após concordância sobre os aspectos dos conceitos de vulnerabilidade, a aplicação da vulnerabilidade foi acatada pelo Conselho de Pesquisa Nacional dos Estados Unidos (NRC 1993) e Associação Internacional de Hidrogeólogos, recomendando sua utilização em estudos que tem como foco a proteção de aquíferos. (VRBA & ZAPOROZEC 1994).

No intuito de promover conformidade e consistência conceitual, em 1993, o NCR indicou os princípios sobre a vulnerabilidade de aquíferos: 1) Qualquer aquífero apresenta um grau de vulnerabilidade; 2) A incerteza é presente em todos os estudos de vulnerabilidade e 3) Em modelos conceituais hidrogeológicos complexos, o evidente pode estar ofuscado e o sutil ser impossível de se perceber.

As recentes publicações explicitam que a escolha da avaliação da vulnerabilidade intrínseca ou relativa, depende da quantidade de dados disponíveis para aplicação do método. A vulnerabilidade natural não precisa de incremento de dados, pois a configuração hidrogeológica é disponibilizada em fontes secundárias (SAHOO, 2016), porém o seu valor pode ser superestimado, por não considerar o potencial de atenuação dos contaminantes (ELÇI, 2017).

Os resultados dos mapeamentos de vulnerabilidade apresentam zonas distintas, facilitando a indicação de diretrizes práticas a serem adotadas na gestão do territorial. Foster et al (2002) propuseram uma proposta de aplicação para as classes de vulnerabilidades, mostrada no Quadro 1.

Quadro 1: Classes de Vulnerabilidade de aquíferos à poluição.

Classes de Vulnerabilidade	Definição Prática
Extrema	Vulnerável a maioria dos poluentes, com rápido Impacto na maioria dos cenários de contaminação
Alta	Vulnerável a maioria dos poluentes, exceto aqueles pouco móveis e persistentes
Média (moderada)	Vulnerável a alguns poluentes, sendo vulnerável em situações de lançamentos continuados.
Baixa	Vulnerável a contaminantes conservativos, em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançados.
Insignificante	Camadas confinantes com fluxo vertical descendente não significativos.

Fonte: Foster (2002).

A simplificação das características geológicas e hidrogeológicas para aplicação em estudos de vulnerabilidade é uma premissa destacada por Foster (2002), acrescentando também a presença de corpos hídricos superficiais indefinidos e as condições de exploração do aquífero.

No que tange a aplicabilidade de estudos de vulnerabilidade, mesmo com todas as hipóteses para sua determinação, a proteção das águas subterrâneas envolve a organização de estratégias, que devem ser baseadas na determinação de áreas ou atividades com elevado potencial de degradação dos aquíferos, cujo escopo é auxiliar o ordenamento do uso do solo, prevenindo eventos de poluição. (FRANCISCO, 2018).

Por fim, os mapas de vulnerabilidade não constituem uma ferramenta definitiva de gestão territorial, mas sim um mecanismo de caráter orientativo, sujeito a refinamentos periódicos, seja pela atualização de metodologias e/ou dados mais precisos.

6.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO

A utilização de modelos de vulnerabilidade para as águas subterrâneas, vem sendo aplicados para os mais diversos fins, a depender da escala utilizada e dos métodos utilizados. No geral, estas configurações são descrições ou aproximações conceituais que descrevem sistemas físicos através de artifícios matemáticos. Com os resultados da representação dos

sistemas hidrogeológicos, é possível comparar e prever cenários alternativos (LOPES, 2017), promovendo uma ocupação ordenada do território estudado.

As metodologias de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos são agrupadas em três categorias: métodos de superposição ou indexação, determinísticos e estatísticos. O emprego destes dependem da disponibilidade de dados e do foco dos estudos. (LIGGETT & TALWAR, 2009).

Os métodos de superposição ou indexação relacionam características físicas geológicas (solo e hidrogeologia), propondo uma classificação pré-estabelecida, para os parâmetros considerados, por meio de uma soma ponderada, entre pesos e índices, ou simplesmente pela multiplicação direta dos pesos dos parâmetros.

Os métodos estatísticos de avaliação de vulnerabilidade inferem relações estatísticas com os parâmetros relacionados com as águas subterrâneas, onde a poluição foi previamente detectada, cujas limitações residem na qualidade dos dados da qualidade da água subterrânea. (ELÇI, 2017)

Os métodos determinísticos empregam modelos matemáticos que simulam o fluxo de contaminação, bem como as formas de propagação da contaminação. As limitações da aplicação dos métodos determinísticos, foram alvo de observações de Artuso (2002), que ressaltou as seguintes restrições: probabilidade de existência de fluxo preferencial subterrâneo; reações de adsorção ou retardamento da carga contaminante; e transporte simples e multifase do contaminante.

Segundo Machiwal et al. (2018), os métodos estatísticos e determinísticos são mais robustos que os métodos de indexação, porém apresentam como desvantagem a necessidade de dados detalhados. Os métodos de indexação, por sua vez, podem ser aplicados mesmo quando existem limitações relacionadas a escassez de dados além de não serem sobrecarregadas por complexidades computacionais.

No grupo dos métodos empíricos de indexação ou superposição estão os modelos mais conhecidos: GOD, AVI, DRASTIC, SINTACS e IS. Estes métodos são baseados em dois fatores cruciais atribuídos a cada parâmetro: peso, faixa de valores. A classificação final muitas vezes considerada um terceiro parâmetro nada mais é que o resultado da expressão algébrica dos pesos e faixas de valores. (BRINDA & ELANGO, 2015).

Para os métodos de indexação, Foster et al (2002) propôs escalas operacionais, conforme o objetivo do trabalho, abrangendo atividades ou políticas públicas que visam a proteção da qualidade das águas subterrâneas, conforme a Figura 7.

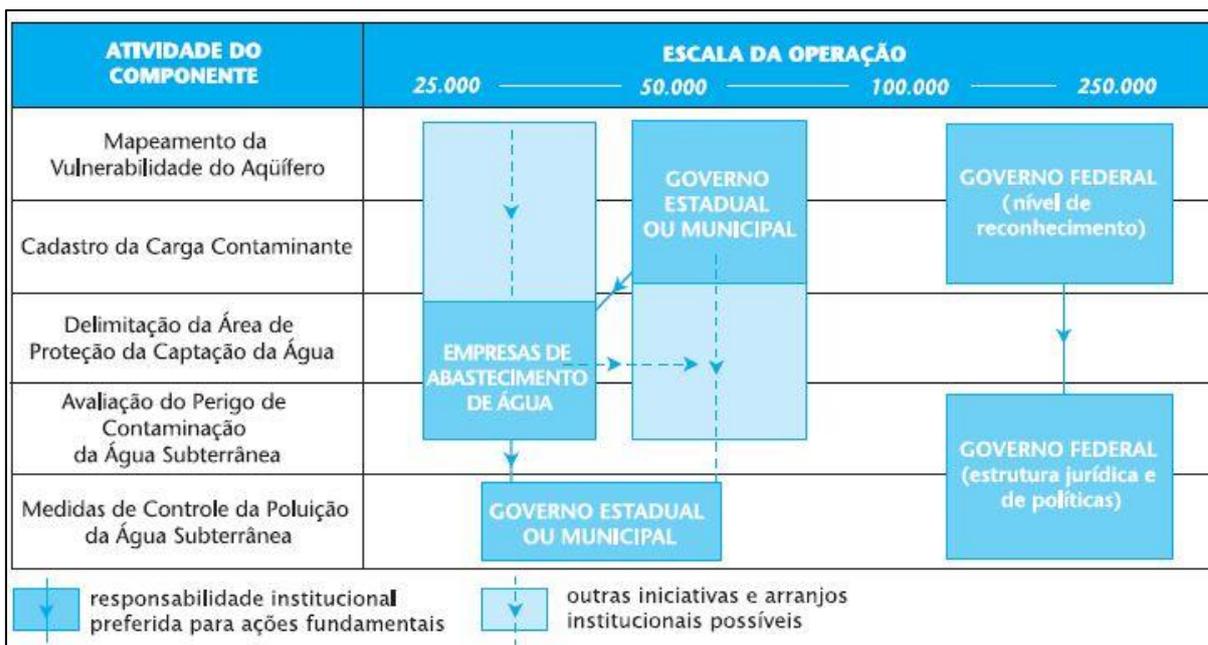


Figura 7: Escalas operacionais de atividades relacionadas à proteção das águas subterrâneas. (Foster, 2002).

Os métodos paramétricos-indexadores vêm sendo amplamente utilizados devido a difusão de técnicas de geoprocessamento, e a disponibilidade de dados em sistemas de informações geográficas, que possibilitam a aplicação desses métodos. (FRANCISCO, 2018). São vários os métodos para avaliação natural para aquífero, os que guardam relação com os métodos e variações utilizadas nesta pesquisa serão apresentados no Quadro 2, com seus respectivos parâmetros e proponentes.

Quadro 2: Quadro Resumo – Métodos para avaliação natural de aquíferos.

Métodos	Parâmetros	Autores
DRASTIC	Profundidade do nível de água, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, impacto da zona não saturada e condutividade hidráulica.	Aller et al. (1987)
GOD	Grau de confinamento das águas subterrâneas, litologia/grau de consolidação da zona insaturada e profundidade do nível d'água.	Foster e Hirata (1988)
SINTACS	Iguais aos utilizados no DRASTIC, modificando apenas os pesos atribuídos aos parâmetros.	Civita e De Maio (1997)
IS	Profundidade do nível freático, recarga, litologia do aquífero,	Ribeiro (2005).

Fonte: O Autor.

Guiger (2002) recomenda que os métodos indexadores por expressar a vulnerabilidade por meio de mapas de parâmetros, deveriam ser aplicados usando sistemas de informações geográficas, já que ocorre uma sobreposição de mapas de parâmetros.

6.2.1. METODOLOGIA DRASTIC

O DRASTIC é o método paramétrico mais empregado para estimar a vulnerabilidade em trabalhos de proteção de recursos hídricos subterrâneos. (MUHAMMAD et al., 2015; SAHOO et al., 2016; MACHIWAL et al, 2018). Foi desenvolvido por Aller et al. (1987) e pela National Water Well Association, em colaboração com a Agência de Proteção Ambiental dos EUA - USEPA, para avaliar o potencial de poluição das águas subterrâneas utilizando parâmetros hidrogeológicos com pesos indexados.

A metodologia considera dois níveis de ponderação: os pesos que variam de 1 (menos significativo) a 5 (mais significativo) e os índices no intervalo de 1 a 10, dependendo da significância do atributo do parâmetro. Com tais valores, o mínimo da vulnerabilidade perfaz o Índice final 26 e o máximo 226.

O acrônimo dos parâmetros nomeia a metodologia: Depth of water (D), Recharge (R), Aquifer media (A), Soil media (S), Topography (T), Impact of the vadose zone (I) e Conductivity Hydraulic (C). O Índice DRASTIC (ID). O índice DRASTIC é estimado conforme a Equação 1.

$$\text{Índice DRASTIC} = DpDc + RpRc + ApAc + SpSc + TpTc + IpIc + CpCc. \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Dp, Rp, Ap, Sp, Tp, Ip e Cp correspondem aos pesos dos fatores DRASTIC que não podem ser modificados, enquanto que: Dc, Rc, Ac, Sc, Tc, Ic e Cc correspondem aos fatores de carga das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência, cujo valor varia de acordo com o nível identificado pelo usuário do método.

Para aplicação do DRASTIC são considerados os pressupostos: bacia hidrográfica com relevo plano e uma área maior que 0,4 km²; fontes potenciais de contaminação localizadas na superfície; potenciais contaminantes propagam a partir da superfície até alcançar o aquífero pelo processo de infiltração; a natureza e o tipo de contaminantes potenciais não estão envolvidos no cálculo da vulnerabilidade; e sistema aquífero é composto por meios porosos. (Civita, 1994).

Um valor baixo do índice não significa que não possa ocorrer contaminação, apenas que o impacto será menor que em outras áreas caso esta venha a ocorrer. (GUIGER, 2002). Um esquema ilustrativo do método é apresentado na Figura 8.

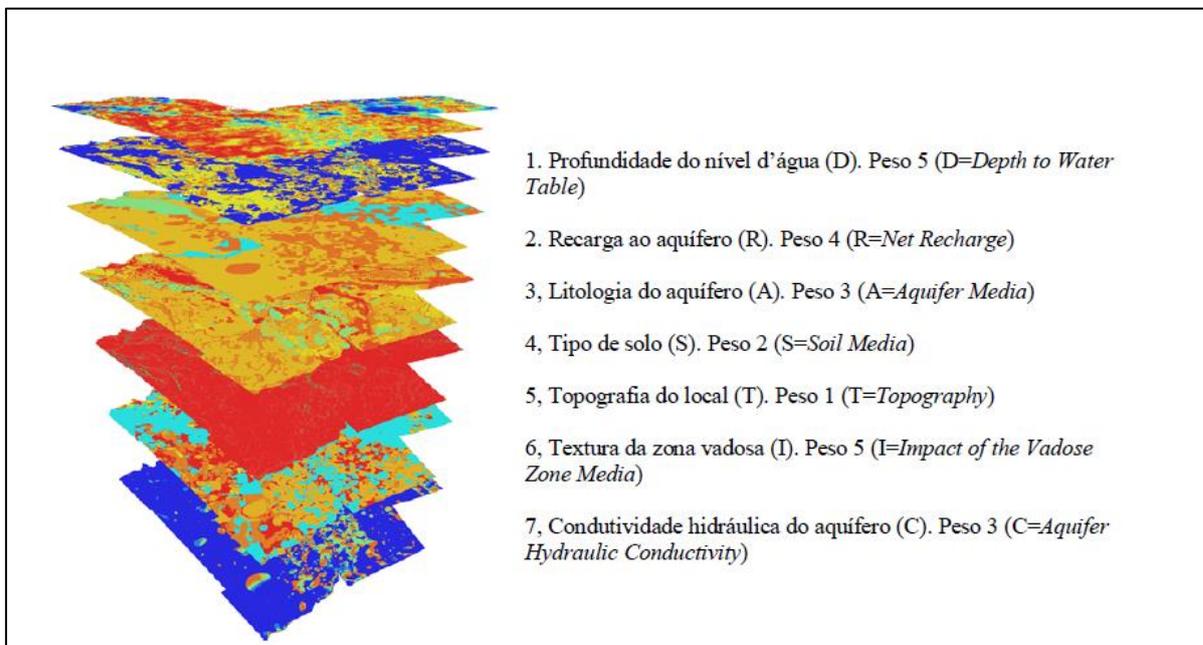


Figura 8: Esquema ilustrativo da metodologia DRASTIC (Guiger,2002).

Os pesos dos parâmetros do método DRASTIC, mostrado na Tabela 4, variam de 1 (um) a 5 (cinco), e cada parâmetro tem amplitude 10 (dez), exceto a Recarga que apresenta amplitude 9 (nove)

Tabela 4: Pesos e índices dos parâmetros DRASTIC.

Parâmetro DRASTIC	Índices	Peso
Nível Freático (D)	1 - 10	5
Recarga (R)	1 - 9	4
Material do Aquífero (A)	1 - 10	3
Solo (S)	1 - 10	2
Topografia (T)	1 - 10	1
Impacto da Zona não saturada (I)	1 - 10	5
Condutividade Hidráulica (C)	1 - 10	3

Fonte: Aller et al. (1987).

O resultado do Índice Geral DRASTIC é a soma dos produtos entre o peso e os valores de cada parâmetro. A escala de vulnerabilidade do DRASTIC, adaptada por Melo (2008) é representada na Figura 9.

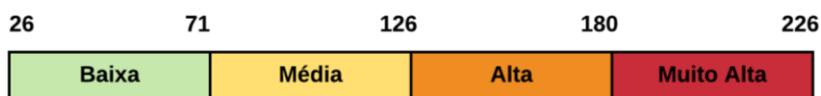


Figura 9: Escala de Vulnerabilidade DRASTIC. Aller et al. (1987).

Em estudos recentes, alguns autores tentaram implementar métodos paramétricos de vulnerabilidade intrínseca para melhorar representatividade dos índices. Panagopoulos et al. (2006) aplicou um DRASTIC modificado na região da Trifíli da Grécia, reclassificando fatores de ponderação dos parâmetros por meio técnicas estatísticas e geoestatísticas (LASAGNA, 2018).

MFONKA et al. (2018) justificaram a utilização dos métodos de indexação pelas seguintes razões: (a) simplicidade do método e número considerável de parâmetros que controlam a poluição, (b) incluem um elevado número de camadas de dados de entrada que limitam os impactos de erros dos parâmetros individuais no resultado final; c) parâmetros, cujos dados encontram-se com relativa facilidade disponibilidade.

Ao longo do tempo, os métodos de indexação mostraram melhores resultados quando aplicado em aquíferos porosos (FOSTER et al., 1987; JAMRAH et al., 2008; NEH et al., 2015, MACHDAR et al, 2018). Porém, uma crítica que o método recebe é que a condutividade, o material do aquífero e a Influência da Zona não saturada são considerados parâmetros que se sobrepõe, fato que foi abordado por Descovi (2009), quando expressou que o método DRASTIC usa uma quantidade excessiva de parâmetros e a dependência de alguns deles.

As adaptações mais recorrentes do método DRASTIC ocorrem pela supressão de parâmetros e inclusão de variáveis que melhorem os resultados conforme os objetivos pretendidos. Como foi o caso do método IS (Índice de Susceptibilidade), que excluiu três parâmetros do DRASTIC (condutividade, impacto da zona não saturada e solos), considerados redundantes e incluiu o uso do solo, com o intuito maior de identificar zonas sujeitas à contaminação de atividades agrícolas SANTOS (2010).

A estrutura simples e pragmática deste método, baseado no sistema empírico, é aplicado por apresentar uma rápida avaliação da vulnerabilidade de um aquífero à poluição (SILVA, 2013). Este método não utiliza pesos para aos parâmetros utilizados, mas apenas índices que variam de 0 a 1, onde o maior valor corresponde a maior vulnerabilidade.

O método GOD é mais eficaz para avaliar a vulnerabilidade em áreas extensas, conforme destacaram Gogu e Dassargues (2000). Cortés et al., (2006), e complementam suas observações a respeito do método que sua aplicabilidade é o primeiro passo para a avaliação do perigo de poluição do aquífero, visando criar prioridades.

Para que ocorra um resultado do índice GOD que tenha a representatividade para as classes de vulnerabilidade alta e extrema, é necessário que pelo menos três parâmetros apresentem índices em torno de 0,9

Quando a área em estudo não possui informações sobre o nível freático, geralmente o índice GOD é superestimado, porém quando os três parâmetros apresentam índices e estes estão nos valores médios, o índice geral GOD será subestimado.

Nem sempre um número maior de parâmetros da metodologia implica melhores resultados, em estudo realizado por Silva (2013), sobre a vulnerabilidade de aquíferos em Maceió, os resultados do método GOD apresentaram duas classes a mais que o método DRASTIC.

6.2.3. MÉTODO AQUIFER VULNERABILITY INDEX

O método AVI (Aquifer Vulnerability Index) foi desenvolvido por Stempvoort et al. (1993), para a National Hydrology Research Institute – NHRI do (Canadá), pondera a vulnerabilidade por meio de dois parâmetros: densidade inferida da espessura (T) das camadas sedimentares sobre o aquífero estudado e as respectivas condutividades hidráulica inferida (C). (STEMPVOORT et al., 1992; ARTUSO et al, 2002, VÍAS et al., 2005).

A vulnerabilidade mapeada (AVI) refere-se apenas à proteção geológica sobreposta ao aquífero, que é função da espessura do material, da condutividade hidráulica vertical e da direção e magnitude do gradiente hidráulico. Por simplificação, o AVI pode ser aplicado a sistemas de aquíferos freáticos, admitindo apenas uma camada (espessura da zona não saturada), e em situações de escassez de dados (SANTOS, 2010).

Este modelo não calcula o Índice de Vulnerabilidade, mas sim um fator teórico nominado resistência hidráulica, que corresponde a soma das espessuras dividida pelas condutividades de cada depósito ou material sobreposto ao aquífero (KUMAR,2015).

6.2.4. SINTACS

O SINTACS é um método de sobreposição, proposto por Civita em 1994, aplicado para escalas regionais e fazendo uso dos mesmos parâmetros do DRASTIC, cujos acrônimos são listados a seguir: S – profundidade do aquífero, I – Recarga ou Infiltração, N – Característica ou influência da zona não-saturada, T – Tipo de Solo, A – litologia do Aquífero, C – Condutividade hidráulica e S – Topografia.

A diferença com o método DRASTIC reside nos índices e pesos dos parâmetros. Os pesos são atribuídos de maneira mais abrangente, considerando todas as condições ambientais relacionadas aos sete parâmetros utilizados no modelo, sua aplicação é para áreas de mineração de carvão e petróleo. (KUMAR, 2015).

6.2.5 INDICE DE SUSCEPTIBILIDADE

Segundo Foster et al. (2002), os métodos de avaliação de vulnerabilidade são mais consistentes quando aferem a vulnerabilidade para um contaminante específico ou grupo deste, em caso da informação disponível

O índice de susceptibilidade (IS) foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição difusa, mais precisamente na região do Alentejo, Portugal, sendo este uma modificação do DRASTIC (CHRISPIM, 2016). É importante ratificar que este método leva em consideração a carga poluidora e, pelo acréscimo desse fator, passar a ser uma estimativa de susceptibilidade.

O método IS é uma adaptação do DRASTIC, que manteve os parâmetros: nível do freático (D), recarga (R), material do aquífero (A) e topografia (T), e foram excluídos S (solos), I (impacto da zona não saturada) e C (condutividade), devido a relação que guardam com o material do aquífero (A). Ante a exclusão de parâmetros, foi considerado o parâmetro LU (Land Use, isto é, uso do solo), cuja falta era presumida como uma limitação do método. (RIBEIRO, 2005).

Para o uso do solo, o método IS considera a classificação da Ocupação do solo, com base na carta de CORINE Land Cover (CNIG, 1988), utilizadas para mapeamento em escalas de planejamento regional. A ponderação dos fatores foi modificada em relação ao DRASTIC, após consulta para especialistas das áreas de hidrogeologia e recursos hídricos, porém os valores correspondentes as classes e amplitudes foram mantidos segundo Lopes (2017), conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros e pesos do método Índice de Susceptibilidade.

Parâmetro IS	Peso
Nível Freático - D	0,186
Recarga - R	0,212
Material do Aquífero - A	0,259
Topografia - T	0,121
Uso do Solo - US	0,222

Fonte: Francés et al, (2001).

As Classes de Susceptibilidade do método IS são resultantes da aplicação da equação: $IS = (0,186 \times D) + (0,212 \times R) + (0,259 \times A) + (0,121 \times T) + (0,222 \times LU)$, cujos índices e respectivas classes são apresentadas na Tabela 6 apresentada a seguir:

Tabela 6: Intervalos e Classes de Vulnerabilidade do Índice de Susceptibilidade.

Intervalos dos Índices - IS	Classes
85 – 100	Muito Alta
65 – 85	Alta
45 – 65	Intermediária
0 - 45	Baixa

Fonte: Francés et al, (2001).

Segundo Guiguer (2002), nenhuma metodologia considera conexões a corpos de água superficiais (curto circuito hidráulico) ou variações do nível do lençol freático. Também não são consideradas características específicas dos contaminantes, umidade específica do solo, taxas de precipitação e sua composição química.

7. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados da pesquisa procederam de diversas fontes como sondagens, arquivos vetoriais e de literatura, sobre os quais foram aplicados procedimentos tornando aplicáveis aos sistemas de informações geográficas, cujos detalhes serão pormenorizados na metodologia. O

fluxograma geral da pesquisa, representado na Figura 11, mostra as etapas que esta pesquisa seguiu na estimativa de vulnerabilidade.

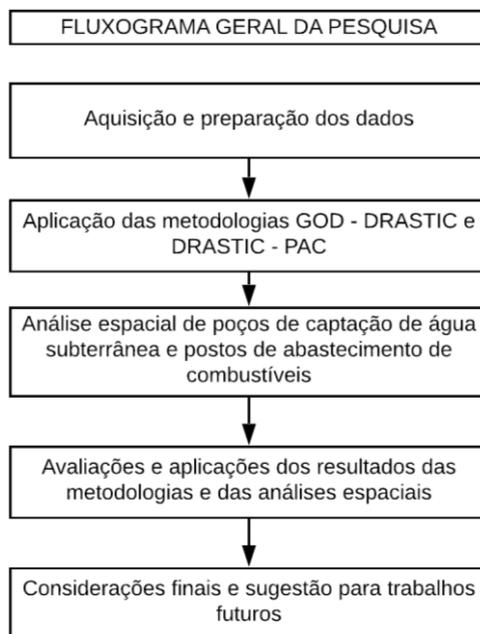


Figura 11: Fluxograma geral da pesquisa.

7.1. AQUISIÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS

As metodologias GOD e DRASTIC foram utilizadas sem ajustes ou modificações paramétricas dos seus métodos originais. O método DRASTIC – PAC, que consiste numa adaptação do método DRASTIC, levou em consideração análises espaciais sobre Postos de Abastecimento de Combustíveis – PACs e poços de captação de água subterrânea.

Os parâmetros derivados de sondagem estavam armazenados em planilha eletrônica (Excel), e neste formato foram previamente categorizados de acordo com a descrição textural, pontuando conforme os intervalos adotados nas metodologias.

Os dados de sondagem foram classificados verticalmente, adotando-se a divisão: o primeiro metro foi considerado como Solo (S), a camada entre o nível freático e o solo compreende a Zona não saturada (I) e o Material do aquífero (A) caracterizou a textura encontrada abaixo da superfície freática. Os detalhes de edição e tratamento dos dados que não foram provenientes da sondagem serão particularizados nos tópicos específicos, quando da descrição das metodologias. . A origem e a natureza das informações estão descritas na Tabela

7, listando os dados primários e relacionando-os com os parâmetros dos métodos, fonte e escalas.

Tabela 7: Tabela dos parâmetros, dados primários, escala e fonte.

PARÂMETROS		DADOS PRIMÁRIOS	ESCALA	FONTE
D	Nível freático*	Sondagem/ MDT	1:10.000	Silva (2007)
R	Recarga	HIDROWEB (ANA, 2018)	-	ANA (2018)
A	Material do Aquífero	Sondagem	1:10.000	Silva (2007)
S	Solos	Sondagem	1:10.000	Silva (2007)
T	Topografia (declividade)	SEGETH (2017)	1:10.000	SEGETH (2017)
I	Impacto Zona não saturada	Sondagem	1:10.000	Silva (2007)
C	Condutividade	Condutividade do aquífero	-	Campos (2016 apud Oliveira, 2018)
G	Grau de Confinamento	ADASA (ADASA)	-	ADASA (2016)
O	Ocorrência Estratos de Cobertura	Solos	1:100.000	ZEE (2011)
D	Nível freático*	Sondagem/ MDT	1:10.000	Silva (2007)
D	Nível freático*	Sondagem/ MDT	1:10.000	Silva (2007)
R	Recarga	HIDROWEB (ANA, 2018)	-	ANA (2018)
A	Material do Aquífero	Sondagem	1:10.000	Silva (2007)
S	Solos	Sondagem	1:10.000	Silva (2007)
T	Topografia (declividade)	SEGETH (2017)	1:10.000	SEGETH (2017)
I	Impacto Zona não saturada	Sondagem	1:10.000	Silva (2007)
C	Condutividade	Condutividade do aquífero	-	Campos (2016 apud Oliveira, 2018)
Dens	Densidade de Kernel	Postos de Combustíveis		IBRAM DF
Dist	Distância entre PAC e poços de captação de água subterrânea	Poços de captação de água subterrânea		ADASA - DF
DRASTIC		GOD		DRASTIC - PAC

Fonte: O Autor.

* Parâmetro compartilhado entre as três metodologias.

O enfoque probabilístico no tratamento matemático dos parâmetros, em estudos de vulnerabilidade, reflete as incertezas envolvidas no que diz respeito, principalmente, a amplitude que deve ser definida para estes. Considerando essa premissa, os parâmetros desta pesquisa foram especializados empregando interpoladores de natureza geoestatística, a seguir pormenorizada.

Os parâmetros Solo, Impacto da zona não-saturada e Material do aquífero foram incorporados ao SIG (*Data Management Tools > Features > Add XY Coordinates*), e

especializados pelo *Topo to Raster* (*Arctoolbox > 3D Analyst Tools > Raster Interpolation > Topo to Raster*) e por fim reclassificados com os respectivos índices.

A superfície freática foi espacializada por *Cokrigagem* (*Customize > Toolbars > Geostatistical Analyst > Kriging/ Cokriging*), utilizando-se de dois conjuntos de variáveis (topografia e nível freático).

O raio de busca para a elaboração do semivariograma experimental foi um elipsoide com eixo maior de 10 km, e um eixo menor de 5km, ajustado ao modelo teórico *stable*. O nível freático obtido foi reclassificado, empregando os índices estabelecidos para cada método, descritos nas metodologias. Os semivariogramas do nível freático e da cota do terreno são apresentados nas figuras 12 e 13, respectivamente.

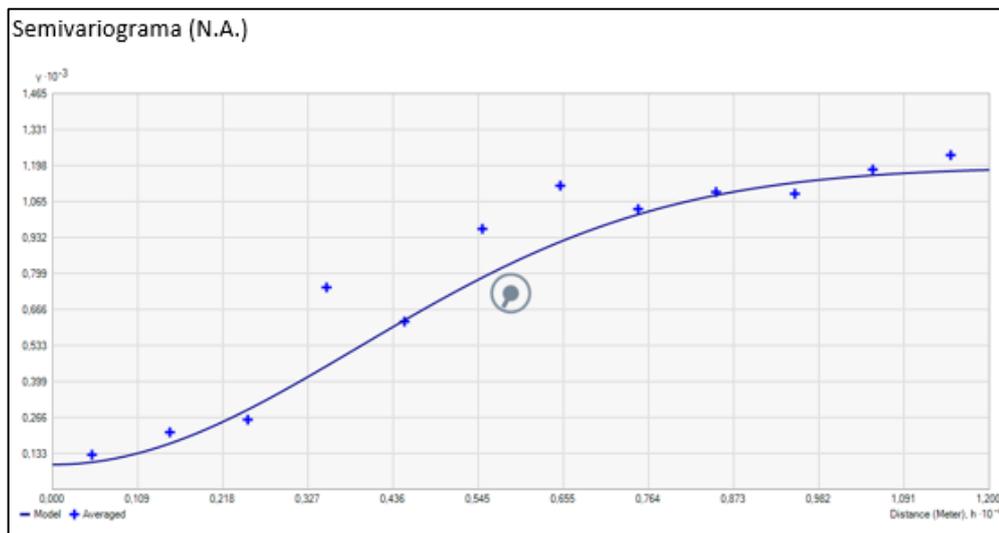


Figura 12: Semivariograma do nível freático.

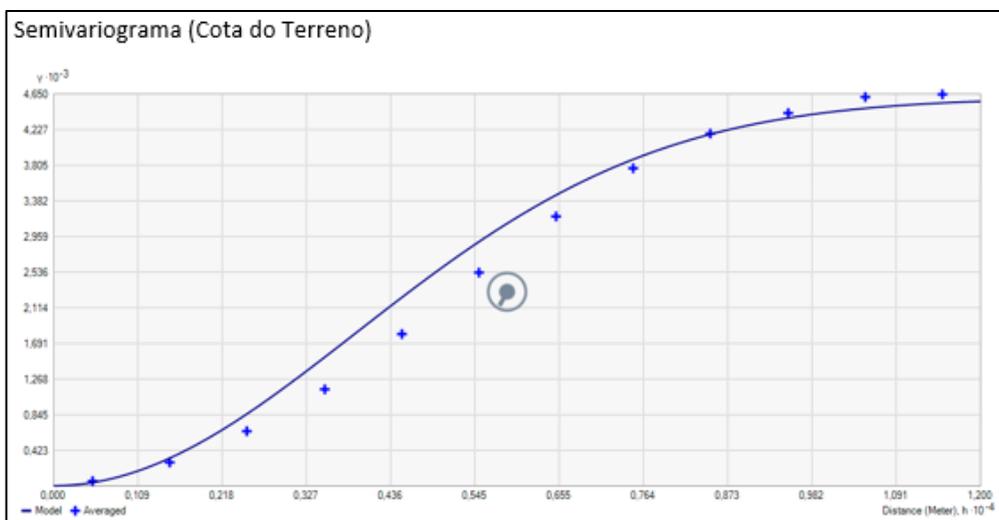


Figura 13: Semivariograma da cota do terreno.

Os dados vetoriais e matriciais foram ajustados à região de interesse, utilizando a ferramenta *clip* (*Arctoolbox > Analysis Tools > Clip*) e *Extract by mask* (*Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract to mask*) respectivamente.

Todos os parâmetros foram reclassificados pela ferramenta *Reclassify* (*Spatial Analyst Tools/ Reclass*), ajustando os valores dos *rasters* aos índices de cada parâmetro.

A localização das sondagens que deram origem aos parâmetros comentados neste tópico é mostrada na Figura 14.

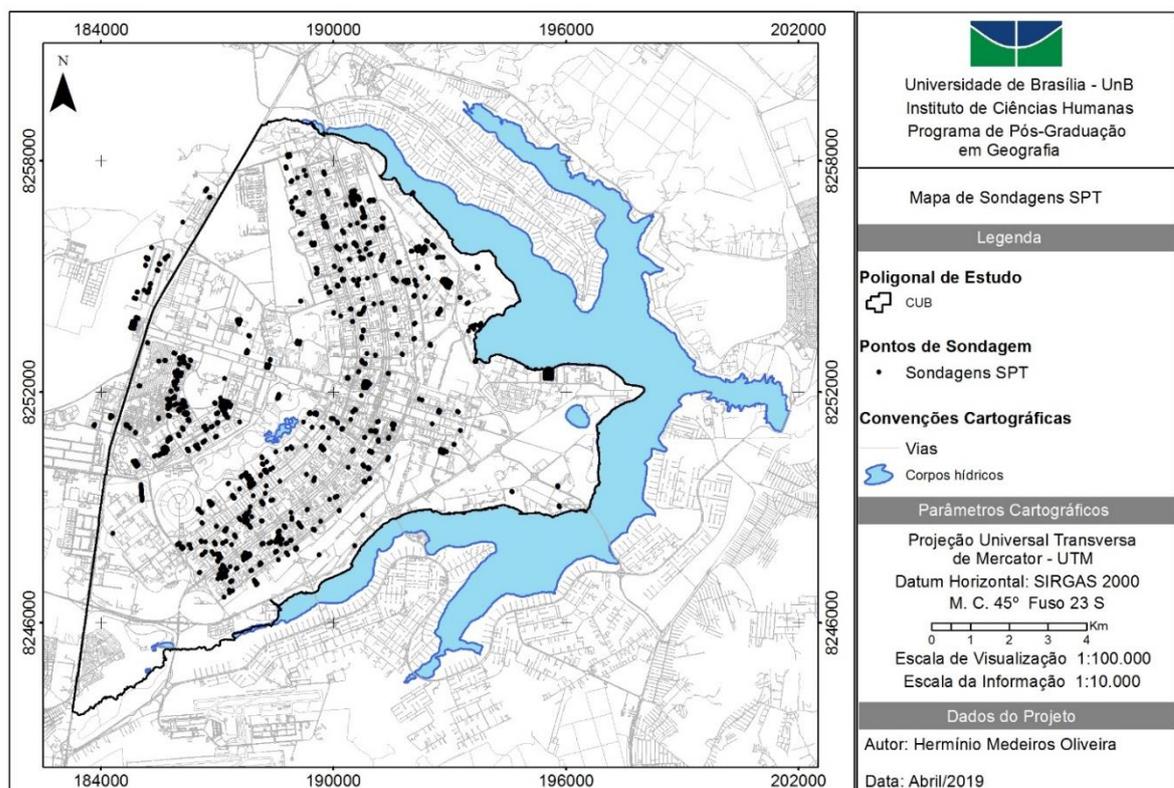


Figura 14: Mapa de sondagens.

Os dados cartográficos estão na projeção Universal Transversa de Mercator – UTM, Datum horizontal - Sirgas 2000 23S - e meridiano central 45°, os processamentos ocorreram no software ArcGis 10.6, disponibilizado no Laboratório de Sensores e Informações Espaciais – LSIE - do Departamento de Pós-Graduação de Geografia, da Universidade de Brasília.

7.2. METODOLOGIA

Os métodos indexadores foram empregados nesta pesquisa promovendo resultados de fácil compreensão e aplicação. As principais limitações das metodologias de indexação residem no fato de não considerar os processos físicos e químicos considerados em modelos conceituais de contaminação, nem a existência de fluxos preferenciais na zona não saturada.

Os métodos interagem entre si, em vários aspectos, pois além de considerar o parâmetro nível freático nas três avaliações, o método DRASTIC – PAC utilizou os sete parâmetros do DRASTIC original adicionando dois parâmetros referente às análises espaciais. Os três parâmetros do método GOD guardam relação com os parâmetros do DRASTIC, como é o caso Grau de Confinamento do Aquífero (G) e Ocorrência do estrato de cobertura (O) que se assemelham com os parâmetros Material do aquífero (A), Impacto da zona não-saturada (I) e Solos (S) e o Nível freático (D) que difere nos intervalos de profundidade.

Alguns métodos derivados do DRASTIC, que abarcam outros parâmetros, geralmente reduzem o número de parâmetros do método original. Como foi o caso da metodologia IS – Índice de Susceptibilidade, que excluiu os parâmetros Solos, Impacto da zona não saturada e Condutividade do aquífero, face à redundância destes parâmetros, e acrescentou o uso do solo (LOPES, 2017).

Apesar do método DRASTIC permitir uma classificação do material inconsolidado, com os índices já parametrizados, procurou-se embasar em dados de literatura para classificar os testemunhos de sondagem considerando a condutividade hidráulica dos materiais.

A condutividade hidráulica proposta para os diversos tipos de material proposta por Freeze e Cherry (1979), definiu os valores dos índices para cada intervalo estudado, cujo esquema é mostrado na Figura 15.

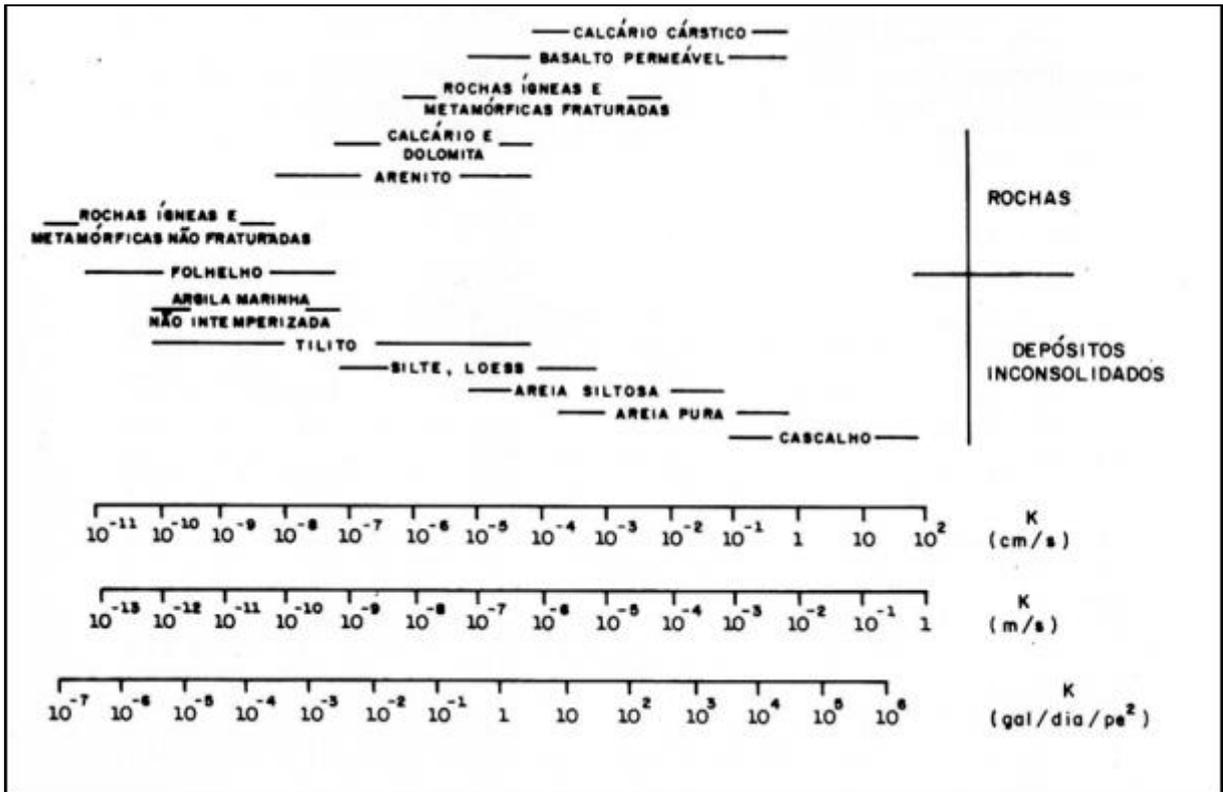


Figura 15: Variações dos valores de condutividade hidráulica (Freeze e Cherry, 1979).

Os parâmetros do método DRASTIC são todas propriedades físicas e o DRASTIC – PAC, metodologia proposta neste trabalho, acrescentou dois parâmetros resultantes de análises espaciais sobre PACs e poços de captação de água subterrânea. Um fluxograma das metodologias é apresentado na Figura 16.

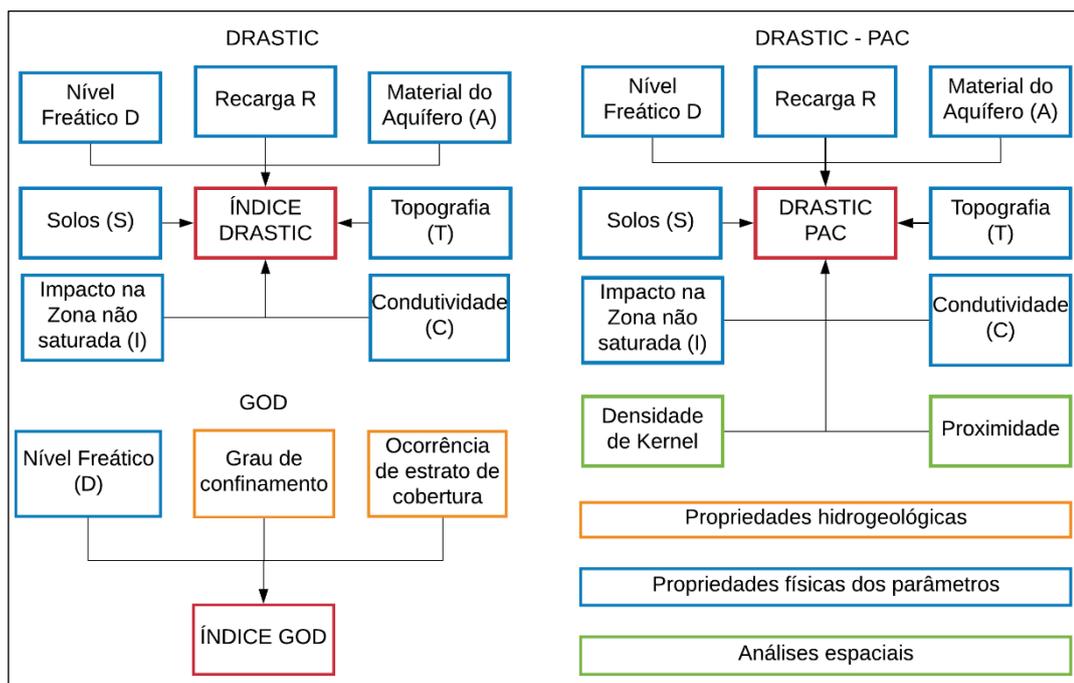


Figura 16: Fluxograma das metodologias GOD, DRASTIC e DRASTIC – PAC.

A utilização dos métodos GOD e DRASTIC foi realizada para fins de comparação, e sobre DRASTIC, que apresentou melhores resultados, foram acrescentados dois parâmetros relativos às análises espaciais sobre PACs e poços de captação de água subterrânea.

7.2.1. DRASTIC

O método DRASTIC foi calculado por meio da ferramenta *Raster Calculator* (*Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Map Álgebra > Raster Calculator*). Os produtos dos pesos e índices de cada parâmetro foram somados, gerando o mapa de vulnerabilidade, conforme a Equação Índice DRASTIC – ID - apresentada a seguir: $ID = (D_i \times D_p) + (R_i \times R_p) + (A_i \times A_p) + (S_i \times S_p) + (T_i \times T_p) + (I_i \times I_p) + (C_i \times C_p)$. Onde: $D_p, R_p, A_p, S_p, T_p, I_p$ e C_p são os pesos dos parâmetros e $D_c, R_c, A_c, S_c, T_c, I_c, C_c$ representam os valores atribuídos aos parâmetros. A escala do método DRASTIC utilizada neste trabalho, teve os valores convertidos para o sistema Internacional de Medidas (MELO, 2008).

Nível Freático (D)

É o parâmetro que recebe o maior peso, juntamente com Impacto da zona não saturada, mensurando a distância vertical entre a superfície do solo até chegar à superfície superior do solo saturado, na trajetória desconsidera a existência de fluxos preferenciais do solo e da zona não saturada.

Para o método DRASTIC, Os intervalos estão listados na Tabela 8.

Tabela 8: Pesos e índices para o nível freático.

Profundidade do Nível Freático (m)	Índice	Peso
< 1,5	10	5
1,5 – 5	9	5
5 – 10	7	5
10 – 15	5	5
15 – 23	3	5
23 – 30	2	5
> 30	1	5

Fonte: Aller et al. (1987).

Considerando cenários de contaminação, quanto mais profundo for o nível freático, menor o índice a ser atribuído e quanto mais próximo da superfície, maior este será. Os procedimentos para obtenção do nível freático foram comentados no item 6.2.

Recarga do aquífero (R)

A Recarga expressa a quantidade de água, por unidade de área, que infiltra na superfície, passando pela zona não saturada até chegar ao aquífero. Foram utilizados os dados de 14 estações nas proximidades da área de estudo, com os dados de precipitação anual referente ao ano de 2018, por possuir dados consistentes e sem lacunas, do HIDROWEB-ANA., conforme a Tabela 9.

Tabela 9: Tabela de dados das estações pluviométricas consideradas no cálculo da pluviometria

Código	Nome	Latitude	Longitude	Pluviometria
1547006	Brasília - Aeroporto	-15.85	-47.9	1623.5
1547008	ETE Sul	-15.841389	-47.908611	1623
1547009	ETE Norte	-15.743333	-47.877222	1402.2
1547010	Contagem	-15.653056	-47.878889	1584.8
1547014	Área Alfa	-15.979167	-47.975	1069.8
1547017	Santa Maria	-15.67	-47.9525	1433.2
1547018	Jockey Club	-15.805833	-47.998056	1671.1
1547019	Cabeça de Veado	-15.890833	-47.845556	1788.1
1547020	Barragem Paranoá	-15.796667	-47.783611	1330.9
1547032	ANA Sede	-15.789444	-47.922222	1596.4
1548005	Gama	-15.986944	-48.050278	1731.5
1548009	Jatobazinho	-15.711944	-48.0925	1402.2
1548010	Riacho Fundo gm-3	-15.885833	-48.043611	1584.8

Fonte: O Autor.

Os dados das médias calculados foram adicionados ao SIG, por uma planilha em formato .csv e transformado em dado vetorial do tipo ponto, por meio da ferramenta *Display XY Data*. A partir do arquivo vetorial, aplicou-se a *Topo to raster*, para cada média calculada, gerando três arquivos matriciais.

Em seguida, aplicou-se em cada arquivo matricial, o valor de taxa de infiltração de 12%, utilizando a ferramenta *Raster Calculator* (*Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Map Álgebra > Raster Calculator*) gerando os valores de recarga. Em seguida, os parâmetros foram

reclassificados (*Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify*). A Tabela 10 mostra os intervalos considerados para este parâmetro.

Tabela 10: Pesos e Índices para a Recarga.

Recarga (mm/ano)	Índice	Peso
< 51	1	4
51-102	3	4
102-178	6	4
178-254	8	4
> 254	9	4

Fonte: Aller et al. (1987).

A infiltração é a parcela da precipitação que contribui efetivamente para a recarga do aquífero. A estimativa da recarga foi calculada por meio da multiplicação da precipitação pela taxa de recarga de 12% obtida por Coimbra (1987) apud Campos (2004).

É patente, que quanto maior a recarga, maior o risco de ocorrer degradação do binômio solo/água subterrânea. A infiltração é a parcela da precipitação que contribui efetivamente para a recarga do aquífero.

Material do Aquífero (A)

Trata do parâmetro que considera a composição do aquífero, material consolidado ou inconsolidado, cujos valores foram atribuídos, conforme o ábaco da Figura 15, que expressa os intervalos de condutividade hidráulica com a litologia, cujos índices estão expressos na Tabela 9.

Tabela 9: Pesos e índices para o Material do Aquífero.

Material do Aquífero (A)	Índices	Pesos
Argila siltosa	3	3
Silte	6	3
Silte arenoso c/ Pedregulhos	8	3
Argila Siltosa c/ Pedregulhos	4	3
Aterro	9	3
Silte Arenoso	7	3

Fonte: O Autor.

O aspecto da granulometria do material classificado na sondagem e os intervalos da condutividade hidráulica balizaram os índices atribuídos a este parâmetro. Tomando como premissa que quanto maior a granulometria, maior será a permeabilidade e conseqüentemente maior o aporte para o acréscimo de vulnerabilidade.

Solo (S)

É a porção mais próxima da superfície, marcada por intensa atividade biológica, cuja proposta de espessura, para esta pesquisa, foi de 1 metro, em cujo intervalo ocorre uma infiltração predominantemente vertical.

Em relação à granulometria, a análise sobre processos de contaminação é similar com o que ocorre com o material do aquífero, ou seja, quanto maior a granulometria maior a permeabilidade e conseqüentemente maior facilidade de ocorrência de eventos de contaminação. Os índices para os solos são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Pesos e índices para o Solo.

Solo (S)	Índices	Pesos
Argila siltosa	3	2
Silte	6	2
Silte arenoso c/ Pedregulhos	3	2
Argila Siltosa c/ Pedregulhos	4	2
Aterro	8	2
Silte Arenoso	4	2
Silte Argiloso	7	2

Fonte: O Autor.

Ressalta-se que os valores foram ponderados, levando em consideração a relação entre granulometria de material inconsolidado e consolidado e a condutividade hidráulica, conforme o ábaco de Freeze and Cherry (1979), apresentado no item 7.2.

Topografia (T)

A topografia consiste de fato na declividade da área de estudo. O tratamento do dado primário iniciou com a correção manual do arquivo vetorial curva de nível, sobre o qual foi aplicada interpolação Topo to raster (Spatial Analyst Tools/Interpolation), gerando o Modelo Numérico do Terreno – MNT.

A declividade foi obtida e posteriormente reclassificada, com os índices estabelecidos pela metodologia DRASTIC. O procedimento para gerar o MNT é mostrado na Figura 17.

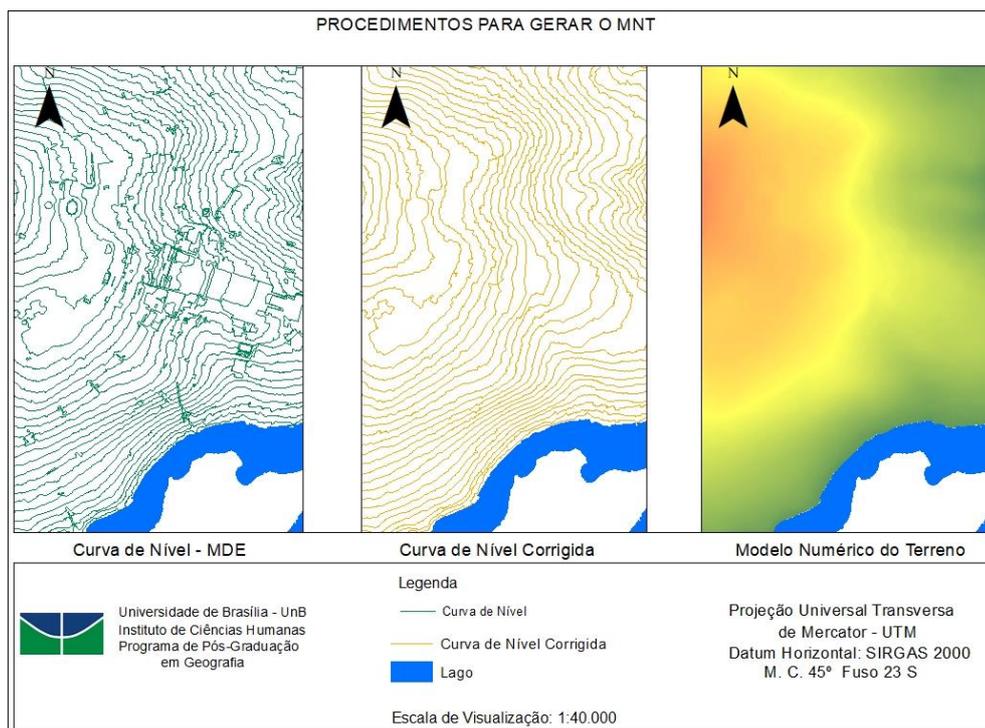


Figura 17: Procedimentos para gerar o MNT.

A Declividade assume o menor peso entre os parâmetros do método. Quanto mais plana a área, maior será o índice atribuído, pois as condições de ocorrer contaminação, por meio da recarga aumentam. Os índices estabelecidos de acordo com os intervalos de declividade estão listados na Tabela 11.

Tabela 11: Pesos e índices para a declividade.

Declividade (T)	Índice	Peso
0 – 1	10	1
1 – 6	9	1
6 – 12	5	1
12 – 18	3	1
> 18	1	1

Fonte: Aller et al. (1987).

Influência da Zona Não-saturada (I)

A classificação dos intervalos seguiu o mesmo padrão de avaliação que o Material do aquífero e Solos, mostrada na Tabela 12, considerando a granulometria e a condutividade que esta proporciona aos fenômenos que envolvem o transporte de contaminantes neste parâmetro, que funciona como o principal filtro de propagação da contaminação.

Tabela 12: Pesos e Índices para Influência da Zona não- saturada (I).

Influência da Zona Não-saturada (I)	Índices	Pesos
Argila siltosa	5	5
Silte	6	5
Silte arenoso c/ Pedregulhos	9	5
Argila Siltosa c/ Pedregulhos	7	5
Aterro	9	5
Silte Arenoso	8	5
Silte Argiloso	6	5

Fonte: O Autor

A influência da zona não-satura recebe o maior peso da metodologia, juntamente com o nível freático. Compreende a camada entre a superfície freática e a parte inferior do solo, que no caso em questão, é de 1 metro. Dependendo da natureza da zona não-saturada, os eventos de contaminação podem sofrer processos de atenuação natural ou de espalhamento da contaminação.

Condutividade hidráulica (C)

A condutividade hidráulica expressa o fluxo (velocidade) que água se movimenta no interior do aquífero. Fica evidente que os contaminantes possuem grandezas distintas das propriedades hidroquímicas da água, porém, num primeiro momento, quanto maior for a condutividade, maior será a taxa de transporte do contaminante no aquífero.

Este parâmetro tem um valor significativo, pois está relacionado ao fluxo horizontal e vertical da formação aquífera, determinando a maior ou menor facilidade de deslocamento do contaminante (SANTOS, 2010).

Nesta pesquisa adotou-se o valor da condutividade em torno de $0,7 \times 10^{-5}$ a $2,8 \times 10^{-6}$ m/s, considerando que o sítio estudado está sobre o Sistema P1. (Gonçalves, 2016).

7.2.2. GOD

A aplicação da metodologia GOD seguiu os padrões estabelecidos pelo método de referência não ocorrendo ajustes ou adaptações dos parâmetros.

Para o parâmetro **G** adotou-se o índice 0,6 devido ao grau de confinamento do aquífero de toda área de estudo ser caracterizada por não confinado (com cobertura). O parâmetro **O**

recebeu o valor de 0,4 devido a área do CUB ser caracterizada por latossolo vermelho (residual). O valor **D** foram reclassificados conforme os valores propostos pela metodologia.

A utilização da ferramenta *Raster Calculator* possibilitou a estimativa do Índice GOD empregando a equação: $IG = G \times O \times D$. No caso em questão os valores foram os seguintes:

- G - Grau de Confinamento - Caracterização do confinamento da zona saturada, com cobertura reclassificação para uma escala de 0,0 a 1,0. No caso em questão, adotou-se o índice 0,6, conferido um grau de não confinamento com cobertura;
- O – Ocorrência da zona não saturada - Análise em termos de consolidação do estrato de cobertura, cujos valores variam de 0,4 a 1. Adotou-se para este parâmetro o índice 0,4, caracterizando a cobertura como um sedimento não consolidado e residual;
- D – Nível freático - Estimativa da profundidade até o lençol para os aquíferos não confinados, com posterior classificação para intervalo, adotado pelo método que de 0,6 a 1. A reclassificação para a poligonal de estudo ficou entre os valores de 0,7 a 0,9, cujas profundidades estão entre os intervalos de 0 a 5 metros, de 5 a 20 metros, e profundidades maiores que 20 metros.

7.2.3. DRASTIC PAC

A metodologia DRASTIC – PAC surgiu da necessidade de avaliar a vulnerabilidade a concentração de postos de abastecimento de combustíveis e sua proximidade com poços de captação de água subterrânea, em ambiente urbano consolidado, sobre os resultados da metodologia DRASTIC.

Segundo Lopes (2017), o método DRASTIC demonstrou possuir alguns problemas aplicativos, devido à redundância de parâmetros e a um regime de ponderação arbitrário. Além disso, normalmente os índices de vulnerabilidade têm uma maior capacidade de avaliação quando incorporam informação sobre a ocupação do solo e/ou as atividades antrópicas associadas.

Seguindo tal premissa, a distribuição (densidade) de PACS e a proximidade entre PACs poços de captação de água, considerados fenômenos pontuais nessa escala de investigação, serão avaliados pela *kernel Density e Near*.

Os parâmetros do DRASTIC foram mantidos, bem como a escala do método original. Apenas serão acrescidos a soma dos parâmetros densidade de Kernel e proximidade ao Índice final DRASTI – PAC, comentados a seguir.

Densidade de Kernel

A densidade ou índice de Kernel não utiliza média ou desvio-padrão como parâmetros, portanto não apresentando elementos ou subsídios que possa afirmar se tratar de uma distribuição normal, por este fato é considerado um estimador probabilístico não-paramétrico.

O foco da análise sobre os postos de abastecimento de combustíveis, com a aplicação da Densidade de Kernel será sobre os efeitos de primeira ordem que caracterizam um processo estocástico, medindo a intensidade do processo, ou seja, o número de eventos por unidade de área.

De acordo com Monteiro et al (2004) a Densidade de Kernel é estimada tomando uma série de ocorrência m eventos $\{u_i, \dots, u_{i+m-1}\}$ contidos num raio de tamanho τ em torno de u e da distância d entre a posição e a i -ésima amostra, a partir de funções cuja forma geral é apresentada na Equação 2.

$$\hat{\lambda}_\tau(u) = \frac{1}{\tau^2} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{d(u_i, u)}{\tau}\right), \quad d(u_i, u) \leq \tau \quad \text{Equação 2}$$

Outro ponto ressaltado por Monteiro et al (2004) é a função de estimação do fenômeno que contribui para a suavização da superfície gerada, juntamente com o raio de influência utilizado, que define a vizinhança do ponto a ser interpolado.

Conceitualmente, o valor máximo é sobre o ponto central, que vai decrescendo à medida que a distância a este ponto de referência aumenta, chegando a zero quando é alcançado o raio de busca circular. A densidade em cada célula de saída é calculada adicionando os valores de todas as superfícies do kernel onde elas se sobrepõem, em formato *raster*.

Um fator determinante que levou por optar por o uso da Densidade de Kernel, no lugar de avaliar a distância entre os PACs, foi a incerteza que permeia a estimativa da distância entre os PACs, sem avaliar a forma urbana. Acrescenta-se a este fato, o princípio constitucional da livre iniciativa, em que prevalece a lei da oferta e demanda, o que impede estabelecer uma distância mínima entre PACs. Por fim, a aplicação do raio de busca de 564,19m foi resultante de uma estimativa estocástica de se calcular a densidade numa área de 1km². Os procedimentos da Densidade de Kernel estão ilustrados na Figura 18.

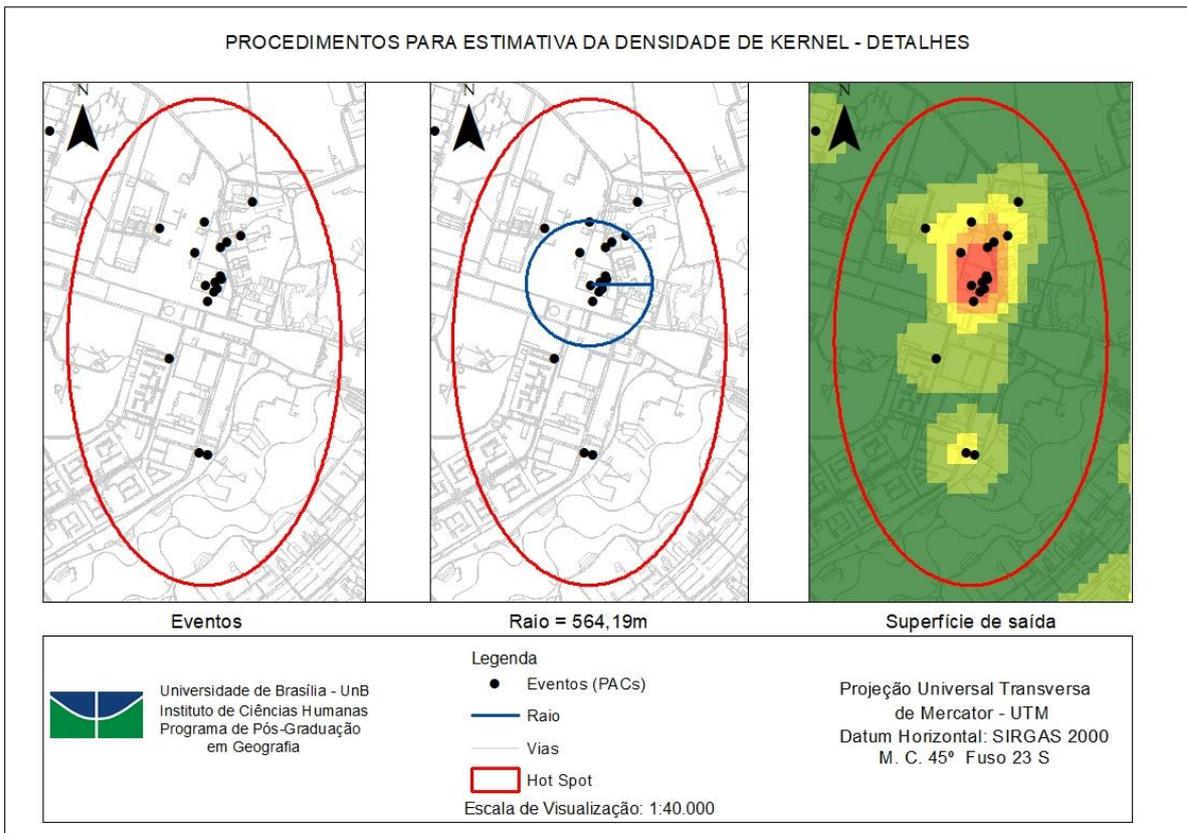


Figura 18: Procedimentos para estimativa da Densidade de Kernel.

A inclusão da Densidade de kernel foi parametrizada, nos moldes dos parâmetros DRASTIC, com os índices dos parâmetros variando de 1 a 10, e peso 5, máxima pontuação do DRASTIC, concedida aos parâmetros nível freático e Impacto da Zona não saturada. Os pesos e índices para a densidade de kernel estão listados na Tabela 13.

Tabela 13: Pesos e índices para a Densidade de Kernel.

Densidade de Kernel	Índice	Peso
0 – 1	1	5
1 – 5	2	5
5 – 10	4	5
10 – 15	6	5
15 – 20	8	5
20 – 22	10	5

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Aller et al. (1987).

Análise de Proximidade (Distância)

A análise de proximidade entre PACs e poços de captação de água subterrânea ocorreu com as seguintes condições: em situação que o alvo selecionado apresentar mais de uma opção, a escolha será aleatória; será considerada distância zero, quando houver intersecção parcial ou total entre os eventos, ou seja, uma coordenada pelo menos compartilhada entre os eventos.

Os índices e os pesos concedidos as distâncias encontradas entre os postos de abastecimento de combustíveis – PACs e poços de captação de água subterrânea, respeitou a parametrização do método DRASTIC. Foram atribuídos índices de 1 a 10 e o Peso 5, nos moldes do que foi estabelecido para a Densidade de kernel, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14: Peso Índices para a distância entre PACs e poços de captação de água subterrânea.

Distância (m)	Índice	Peso
> 900	1	5
800 – 900	2	5
700 – 800	3	5
600 – 700	4	5
500 – 600	5	5
400 – 500	6	5
300 – 400	7	5
200 – 300	8	5
100 - 200	9	5
< 100	10	5

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Aller et al. (1987).

As ferramentas de análise de proximidade disponíveis no software ArcGis 10.6 são *Point Distance*, *Near* e *Gerate Near Table*. Optou-se pelo uso da ferramenta *Near* pelo fato desta gerar dos dados na tabela de atributos, que permite espacialização das distâncias.

Como referência foi adotada a distância de 100 metros, entre os poços de captação de água subterrânea e postos de combustíveis conforme orienta o Art. 26, da Resolução N° 32, de 21 de dezembro de 2016 – SEMA - PR (Secretaria do Meio Ambiente do Paraná – SEMA – PR).

A escala de vulnerabilidade final do DRASTIC – PACs preservou da parametrização do método original, pelo fato dos parâmetros acrescentados não representar características físicas.

8. DISCUSSÃO E RESULTADOS DAS VULNERABILIDADES DOS MÉTODOS GOD, DRASTIC E DRASTIC – PAC

Os resultados das vulnerabilidades, a seguir, são discorridos de modo a demonstrar sua aplicabilidade na gestão territorial e nas políticas de recursos hídricos, sem negligenciar, durante o processo, as particularidades do ambiente hidrogeológico em questão.

Como parte do procedimento para validação dos resultados, via-se, até a década de 90, a necessidade de aplicar a análise de sensibilidade com base na calibração das variáveis físicas para atingir maior precisão nos estudos de vulnerabilidade, conforme propunham Napolitano e Fabri (1996). Essa proposta, contudo, foi alvo de ressalvas: como Francisco (2018) expõe, tal abordagem dos resultados mostra-se incapaz de eliminar a subjetividade dessa mensuração uma vez que se tem por objetivo uma análise qualitativa. Apoiada nesta argumentação, a pesquisa em tela julga a subjetividade fator indissociável aos métodos indexadores, não sendo necessário, portanto, levar em conta a calibração paramétrica.

Outro aspecto que merece reconhecimento é o fato de os mapas de vulnerabilidade não constituírem um documento definitivo, considerando, assim, atualizações periódicas conforme a disponibilidade de dados e refinamento dos métodos.

8.1. RESULTADO DA METODOLOGIA GOD

Os índices atribuídos aos parâmetros Grau de Confinamento do Aquífero (G) e Ocorrência dos estratos de cobertura (O) apresentam um único valor devido à homogeneidade dessas variáveis sobre a área do CUB. O nível freático do método GOD utiliza a mesma base de dados do método DRASTIC, diferenciando apenas os valores atribuídos aos intervalos da profundidade freática.

8.1.1. GRAU DE CONFINAMENTO

O aquífero no CUB trata-se do tipo livre - não-confinado - com cobertura, segundo Gonçalves (2016), recebendo, por conseguinte, o valor de 0,6 na escala adotada pelo método GOD. Sua representação é demonstrada na Figura 19.

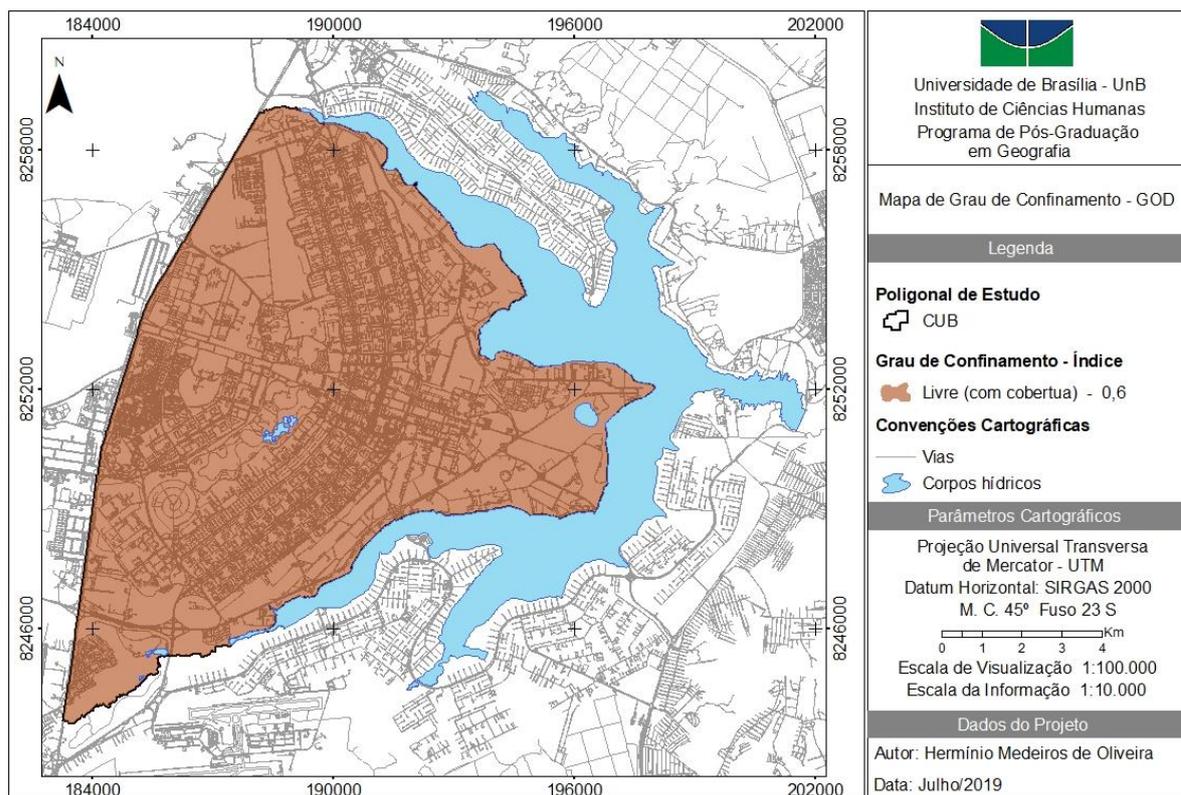


Figura 19: Mapa do Grau de Confinamento do aquífero.

A área em foco apresenta características tanto geomorfológicas quanto pedológicas que permitiram a formação de um aquífero poroso contínuo, ou seja, com feições similares, conforme indicam os mapas de solo e de sistema de aquíferos apresentados na seção 5.2 _ Caracterização do meio físico do CUB.

Sob a qualificação de 0,6, o grau de confinamento irá contribuir para o aparecimento de um índice geral baixo ou médio. A multiplicação desse fator pelos parâmetros de Ocorrência do estrato de cobertura e Nível freático subdimensiona o resultado final em, pelo menos, 40%, independentemente dos valores assumidos por eles.

8.1.2. OCORRÊNCIA DO ESTRATO DE COBERTURA

Para fins de análise, vale salientar que tal ocorrência é caracterizada como sedimento não-consolidado do tipo solo residual, o qual corresponde ao latossolo vermelho – conforme previsto pelo ZEE (2011) – e cuja qualificação é da ordem de 0,4.

Quanto à ocorrência ou não do estrato de cobertura, a variável, nesta pesquisa, segue as premissas originais do método GOD e apresenta o menor valor dentre os parâmetros avaliados, fato este que contribui para subestimar, ainda mais, o índice GOD, como pode ser visto na Figura 20.

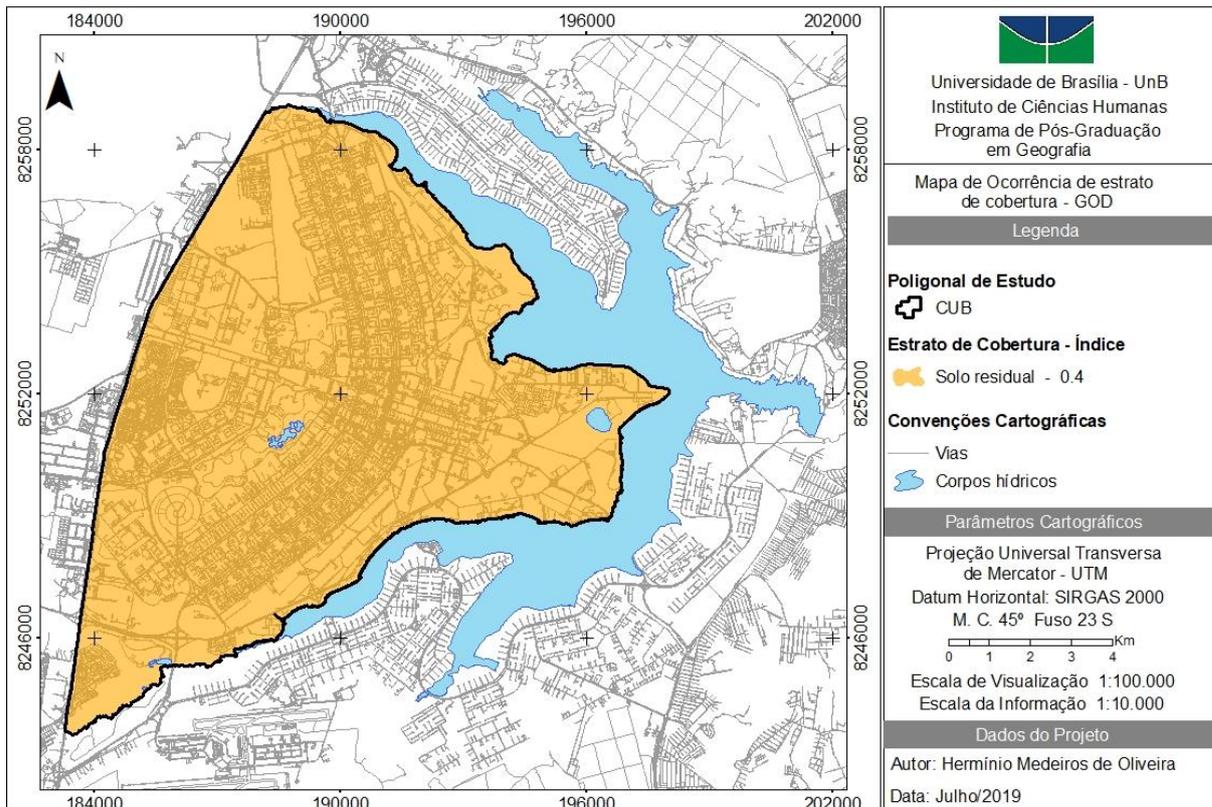


Figura 20: Mapa da ocorrência do estrato de cobertura.

Apesar da simplificação dos parâmetros da metodologia GOD gerar índices que tendem a assumir valores extremos da escala - promovendo subestimação ou superestimação de valores conforme o caso -, os resultados ainda se mostram relevantes para estudos comparativos e caracterização preliminar simplificada da vulnerabilidade natural.

8.1.3. NÍVEL FREÁTICO

O nível freático apresenta três intervalos de profundidades – a saber: menor que 5 metros, entre 5 e 20 metros, e maior que 20 metros - com distribuições espaciais distintas. Na parte Oeste e central do CUB, pode-se perceber uma zona caracterizada por uma profundidade maior que 20 metros, a qual cobre 42,97% de sua área; uma segunda zona – esta a Leste da zona central – apresenta profundidade entre 5 e 20 metros, que perfaz 20,5% da área; por último, a porção mais a Leste da anterior possui profundidade freática menor que 5 metros, correspondendo a 36,53%.

Quando se remonta à parte sul da área, é possível notar que o lençol freático aponta para níveis entre 5 a 20 metros no córrego Guará, enquanto seus níveis descem conforme se afasta do lago Paranoá para profundidades superiores a 20 metros. A Figura 20 ilustra o cenário do nível freático para o método GOD.

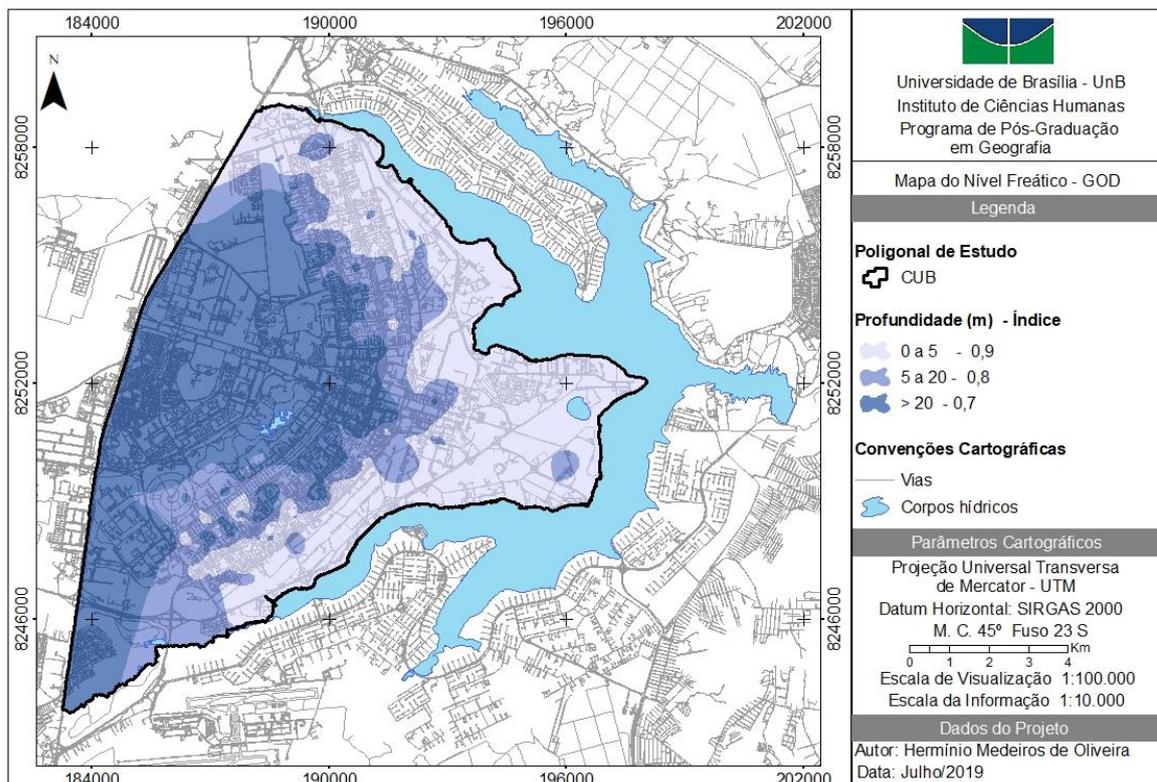


Figura 21: Mapa do nível freático GOD.

Sob um viés mais amplo, nota-se que as áreas de profundidade superior a 5 metros exibem maior representatividade na modelagem - somam 63,67% da poligonal de estudo – e, por isso, contribuem de forma significativa para a redução do índice GOD. Por outro lado, levar em conta a porção Leste – enquadrada no valor de 0,9 - é de grande importância em razão do aparecimento de vulnerabilidades mais expressivas como resultado da superfície freática ser rasa.

8.1.4 RESULTADO ÍNDICE GOD

A análise do índice GOD resulta na definição de uma classe de vulnerabilidade baixa para a área de estudo e, por conseguinte, não dá conta de delimitar as especificidades de cada

recorte. Por isso, faz-se necessário descrever os parâmetros avaliados separadamente: no que tange a Ocorrência de estrato de cobertura (O), a variável recebe o menor valor possível ao abranger o sítio do CUB; o nível freático atinge profundidade superior a 20 metros, índice este que representa 43% da área total (4.840,94 ha.); quanto ao Grau de confinamento (G), vê-se que ele participa com valor na ordem de 0,6 – insuficiente, porém, para um acréscimo do índice geral de vulnerabilidade.

É essencial destacar que, nesta modelagem, não aparecem os valores extremos da escala, que são as classes desprezível e extrema. Veja os resultados na Figura 22.

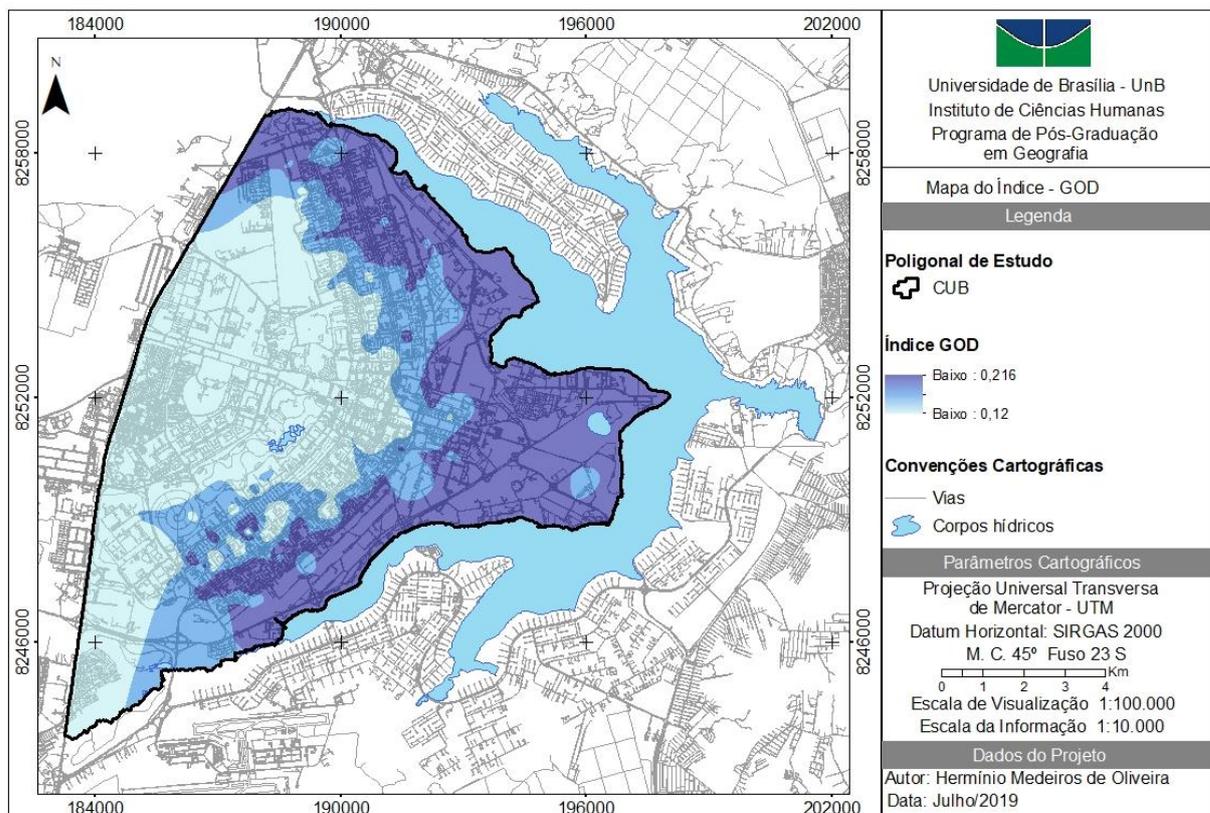


Figura 22: Mapa da vulnerabilidade GOD.

Deve-se atentar que o resultado do índice GOD é influenciado sobremaneira pelos valores de ocorrência do estrato de cobertura e dos de grau de confinamento do CUB, os quais variam em torno de 0,5, devido ao cálculo de multiplicação direta. Em abordagens de vulnerabilidade do método GOD, onde nenhum dos parâmetros assume a unidade como valor, o índice geral sempre é subdimensionado, pois este se trata do produto de uma multiplicação de três parâmetros menores que a unidade. Como consequência, a vulnerabilidade GOD expressa níveis na faixa de 0,125 – no que se refere ao nível freático acima de 20m - e 0,21 – quanto ao que se encontra abaixo de 5m.

8.2. RESULTADOS DOS PARÂMETROS E ÍNDICE DRASTIC

Os valores atribuídos aos parâmetros da metodologia DRASTIC - gerados a partir dos dados de sondagem - permitem a diversificação das classes de vulnerabilidade em áreas, em que era esperado obter resultados mais conservadores. Tais resultados são devidamente explorados em seus respectivos tópicos.

Faz-se interessante também salientar que o nível freático utilizado entra em concordância com os dados aplicados na metodologia GOD, diferenciando-se apenas nos valores atribuídos aos intervalos da profundidade freática.

8.2.1 NÍVEL FREÁTICO

No que concerne esta variável, os trechos Oeste, Sul e Centro do CUB configuram uma zona compacta cuja área de 6.251,60 ha – equivalente a 55% do total - apresenta profundidade superior a 40 metros de modo geral. Completando o diagnóstico do nível freático, a Figura 23 ilustra como ocorre essa distribuição e identifica significantes elevações na altura das Quadras 215 e 214 Sul, e rebaixamentos na região da Lagoa do Jaburu, a Leste do sítio de estudo.

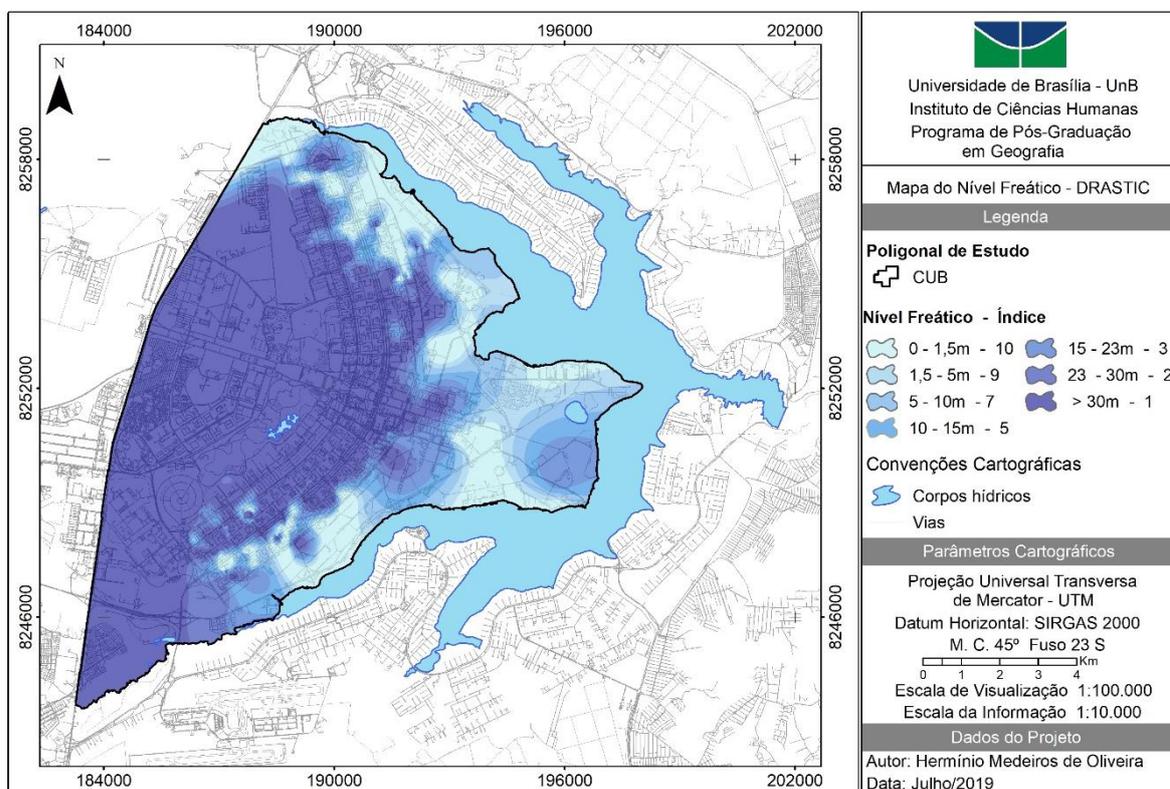


Figura 23: Mapa do nível freático – DRASTIC.

Os resultados alcançados abrangem todos os intervalos da escala para o nível freático, o que possibilita, além de alcançar resultados mais precisos, aperfeiçoar a discussão sobre a vulnerabilidade, visto que a indexação atribuída a este parâmetro apresenta maior peso e, por consequência, o panorama final do método torna-se dependente dos resultados aqui encontrados.

As áreas caracterizadas pela presença do lençol freático num nível mais raso acompanham de forma regular a orla do Lago Paranoá. Nas proximidades da Lagoa do Jaburu, contudo, o nível freático assume valores que variam de 5 a 10 metros. Este fato permite avaliar a situação - por pelo menos um primeiro momento - não como um artefato, mas como a confirmação do rebaixamento daquele setor, conforme defendido no Estudo do Rebaixamento da Lagoa do Jaburu: Causas e estratégias de recuperação e cartilha (livrete): Vida e esperança de recuperação da Lagoa do Jaburu - Brasília-DF, 2001 (CAMPOS et al., 2002).

8.2.2. RECARGA

A Recarga é o parâmetro do método que influencia no transporte e acumulação de contaminantes, por meio de processos físicos e químicos, que podem ocorrer no solo, na zona não-saturada e no próprio aquífero. O valor da recarga considerada foi a natural proveniente da pluviometria, mais precisamente a parcela efetiva que infiltra no solo, por meio da percolação, controlada pela gravidade e capilaridade.

A Recarga resultou em dois intervalos de valores 102 a 178 mm/ano, conferindo uma pontuação 6 e 8 respectivamente. As partes Sul, Oeste e Leste do CUB que compreende 80% do sítio estudado apresentou o índice igual a 8 e a porção Norte/Nordeste contribuiu com o índice 6, em 20% da área. Considerando esse cenário, o resultado para a recarga é mostrado na Figura 24

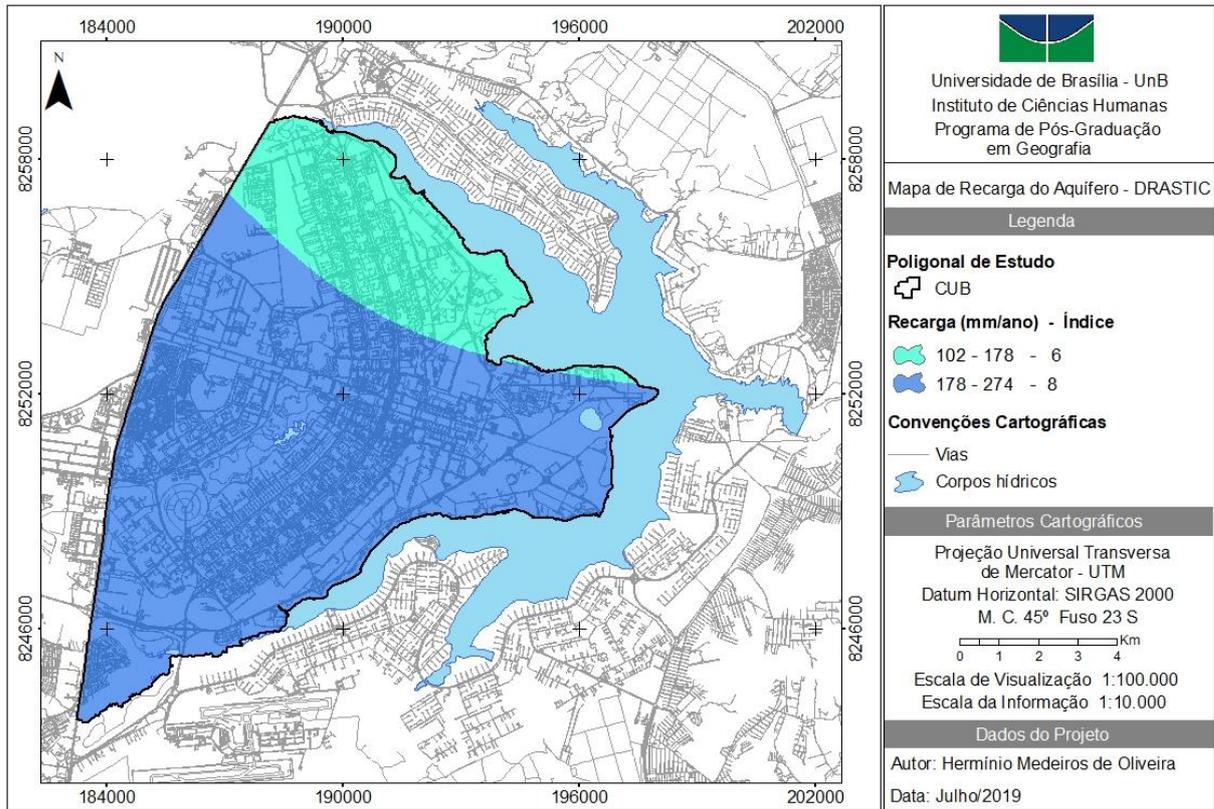


Figura 24: Mapa de recarga anual – DRASTIC.

Vale lembrar que este resultado não considera o potencial de recarga artificial, parcela resultante de contribuição de vazamentos do sistema de saneamento básico, devido a existência de extensas áreas (parques e setores com baixa ocupação) no sítio estudado, onde essas estruturas de saneamento não se fazem presente ou apresentam baixa densidade.

Exibir valores elevados de recarga não pressupõe inconveniência, pois da mesma forma que pode contribuir para o espalhamento da contaminação, pode promover uma atenuação natural da contaminação, por meio da diluição de poluentes, por exemplo

O cenário de uma recarga elevada nem sempre é inconveniente pois, dependendo do tipo de contaminação, contribui para diluição e/ou dispersão da contaminação (Vermeulen et al., 1994).

8.2.3. SOLOS

Neste quesito, os resultados da distribuição espacial variam de uma textura de argila/siltosa a silte/arenosa, predominando o primeiro tipo na parte central do CUB (66,5%),

com zonas descontínuas de argila com pedregulhos e de silte com areia. A distribuição espacial das texturas do solo está representada na Tabela 15.

Tabela 15: Representatividade da textura do solo na área de estudo.

Tipo de Textura	Área (ha)	%
Argila/Silte	7.465,18	66,31
Argila/Pedregulhos	2.647,88	23,52
Silte/Arenoso	900,64	8,00
Aterro Argiloso	236,41	2,10
Aterro	7,88	0,07

Fonte: O Autor.

Nas regiões da UnB e do Setor de Clubes Norte, observou-se uma gradação nítida das texturas: primeiro, inicia-se nas cotas mais altas com o padrão de argila/siltosa; em seguida, exibe-se uma estreita faixa de argila com pedregulhos; e, por último, um trecho de textura silte/arenosa nas proximidades da borda do lago.

Quanto à parte leste da poligonal de estudo, a gradação se repete com intervalos mais bem definidos. Duas faixas de aterros foram identificadas na UnB e no Setor de Hotéis de Turismo Norte, conforme ilustra a Figura 25.

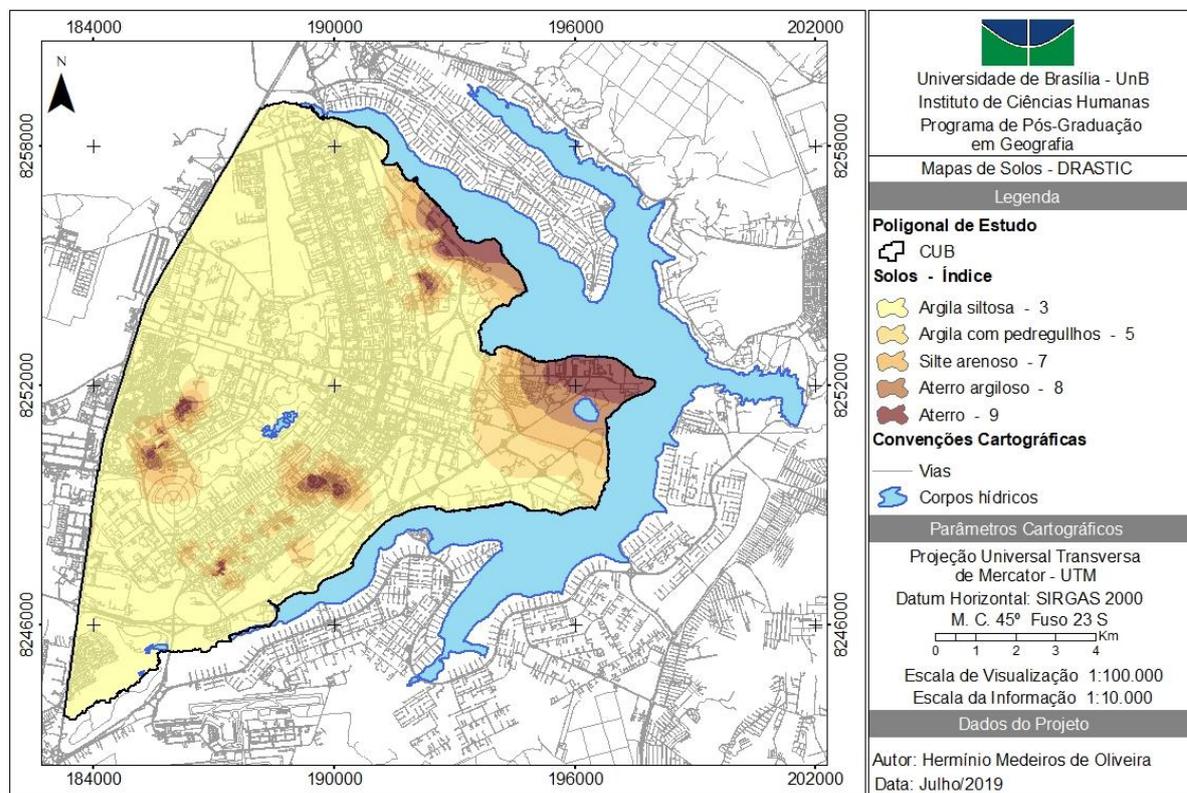


Figura 25: Mapa de solos – DRASTIC.

São identificadas no mapa as áreas onde há maior perigo de contaminação; nelas, os solos apresentam maior condutividade por conta do material identificado: mais precisamente o grupo de solos com predominância do material silte/arenoso (índice 7), aterro argiloso (índice 8) e aterro (índice 9). As regiões com tal perfil possuem fortes indícios para favorecer o surgimento de zonas de vulnerabilidades mais elevadas.

8.2.4. IMPACTO NA ZONA NÃO SATURADA

A zona não saturada variou da textura de silte/argilosa, de granulometria mais fina, chegando a uma textura com granulometria de um silte arenoso com pedregulhos e aterro. Em comparação com o solo, o resultado deste parâmetro não apresenta tantos detalhes quanto àquele, em contrapartida, o solo tem peso 2 (dois) e o impacto da zona não saturada peso (5). A distribuição espacial da zona não saturada é apresentada Tabela 16.

Tabela 16: Representatividade da textura da zona não saturada.

Tipo de Textura	Área (ha)	%
Argila Siltosa/Silte argiloso	9.655,97	85,77
Silte	990,70	8,80
Argila Siltosa com pedregulhos	400,78	3,56
Silte arenoso	138,47	1,23
Silte arenoso com pedregulhos/Aterro	60,79	0,54

Fonte: O Autor.

A textura silte/argilosa e argila/siltosa predomina em 85,77% da área do CUB. As descontinuidades desta textura com pedregulhos, silte arenoso, silte arenoso com pedregulhos e aterros estão destacadas na Figura 26, mais precisamente, nos seguintes trechos: orla do Lago Paranoá, na UnB, no Setor Sudoeste, na Octogonal e no Cruzeiro Novo – todos pertencentes às áreas central e final da Asa Sul.

No que se refere, em especial, ao impacto da zona não-saturada, percebe-se que a distribuição espacial se faz de maneira consideravelmente uniforme, cobre 85,77% da área do CUB e constitui-se de um material argilo/siltoso, este com índice 4.

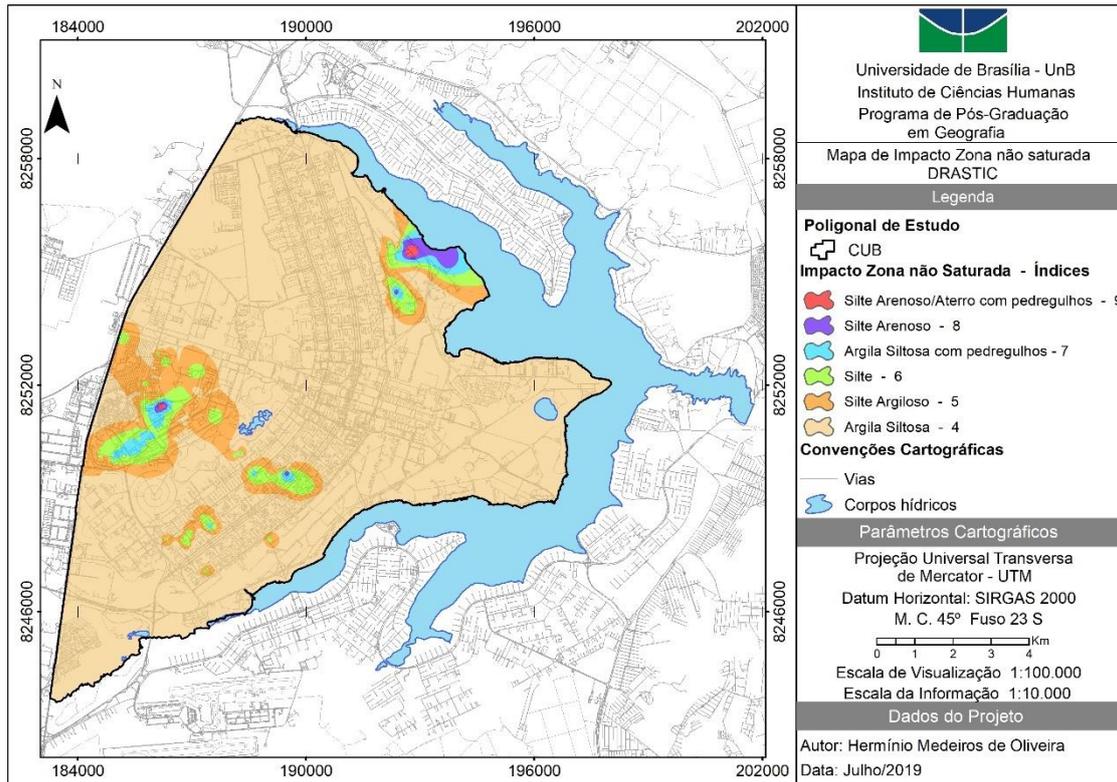


Figura 26: Mapa de Impacto da Zona não saturada – DRASTIC.

Embora o peso deste parâmetro esteja entre os mais representativos – juntamente ao nível freático -, a verificação de índice 4 em mais de 85% da área impede que seu valor seja decisivo para o refinamento do índice geral DRASTIC, mesmo sendo, junto com o nível freático, o parâmetro de maior peso, pois é nesse estrato que ocorre, de forma mais decisiva, a atenuação e/ou propagação da contaminação.

8.2.5. MATERIAL DO AQUIFERO

O material do aquífero avalia os poluentes quanto à sua mobilidade, podendo influenciar tanto em sua diluição, quando estes apresentarem baixa mobilidade e em sua propagação, quando as propriedades hidroquímicas da água subterrânea e a natureza do contaminante apresentar uma combinação que permita o espalhamento da contaminação.

Assim sendo, os resultados apresentam zonas com material de textura arenosa com pedregulhos, favorecendo a mobilidade dos contaminantes, nos seguintes trechos: extremidade leste do CUB, a orla do Lago Norte, UnB, Setor de Clubes Norte e na parte central da Asa Sul. Na maior parte do CUB, a textura do material do aquífero é predominantemente de argila siltosa que propicia, num primeiro momento, uma menor mobilidade de contaminação. A composição do aquífero possui a distribuição espacial mostrada na Tabela 17.

Tabela 17: Representatividade da textura do material do aquífero.

Tipo de Textura	Área (ha)	%
Argila Siltosa	7.817,56	69,44
Argila Siltosa/Silte	2.294,38	20,38
Argila Siltosa com pedregulhos	946,80	8,41
Siltosa/Arenosa	154,23	1,37
Siltosa arenosa com pedregulhos	45,03	0,40

Fonte: O Autor.

A textura do material do aquífero oscila da textura argilosa/siltosa à siltosa/arenosa com pedregulhos, com pico de representatividade para a primeira, a qual perfaz aproximadamente 70% da área da poligonal. Tal padrão de disposição espacial assemelha-se ao parâmetro textura dos solos. Confirma o padrão de distribuição do material do aquífero na Figura 27.

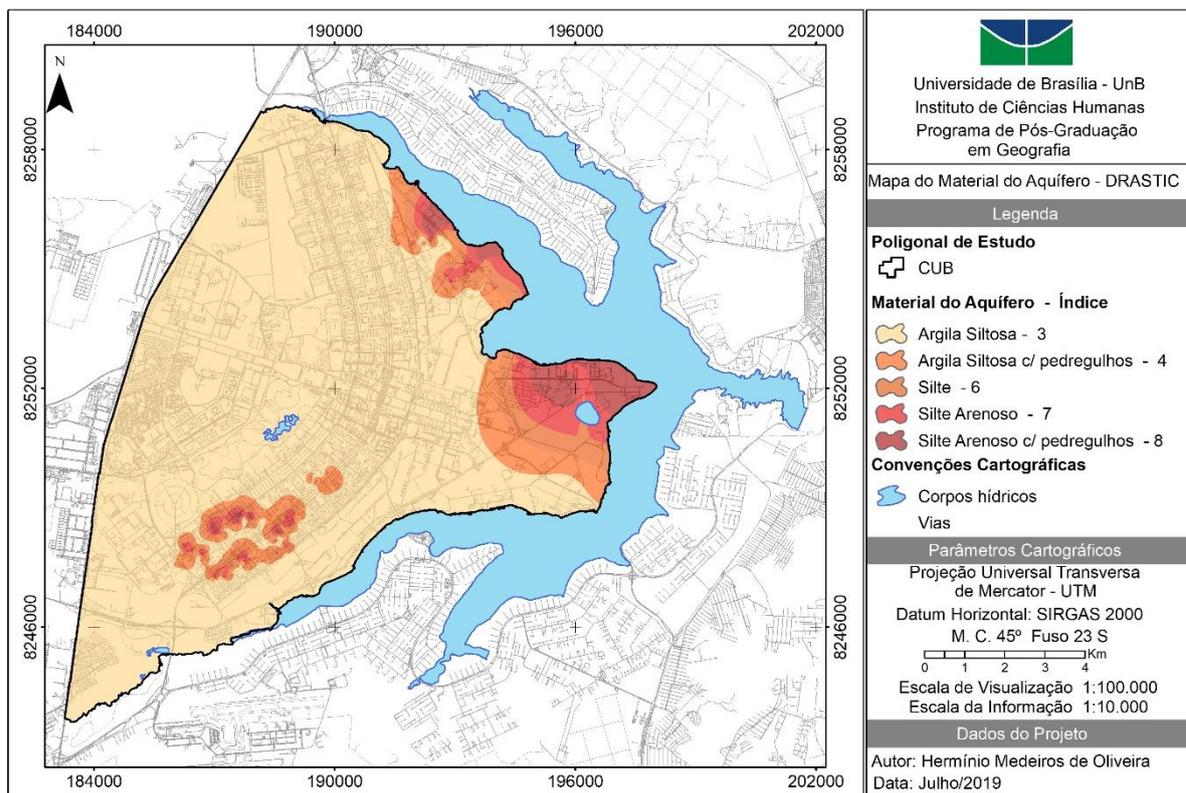


Figura 27: Mapa do Material do Aquífero - DRASTIC

Apesar da atribuição de índice 3 – indicador de um valor mediano – e o domínio de uma textura que induz a uma baixa mobilidade de contaminação em aproximadamente 70% do sítio, o material do aquífero não pode ser encarado como fator determinante na subestimação ou superestimação do índice geral DRASTIC, pois ocorreu um balanceamento entre peso e índice em grande parte da área.

8.2.6. TOPOGRAFIA

O resultado desta variável vai ao encontro das considerações sobre a geomorfologia descrita na caracterização da área. Após a correção das curvas de nível – mais especificamente, dos intervalos altimétricos de 5 metros -, verifica-se que a declividade oscila de 0 a 12%. As áreas mais declivosas estão presentes na cava do córrego do Guará, na parte sul do CUB.

A análise da declividade apresenta apenas 3 classes de categorização, todas com valores distintos, porém, com seus índices máximos. Em contrapartida, ao parâmetro, é atribuído o menor peso do método uma vez que ele pouco colabora o aumento da vulnerabilidade. Nas áreas mais planas, atribuem-se índices maiores visto que o terreno facilita a contaminação por infiltração de poluentes na superfície. As regiões mais declivosas, por outro lado, propiciam o escoamento devido a suas irregularidades topográficas, dificultando os processos de contaminação. Veja os resultados na Figura 28.

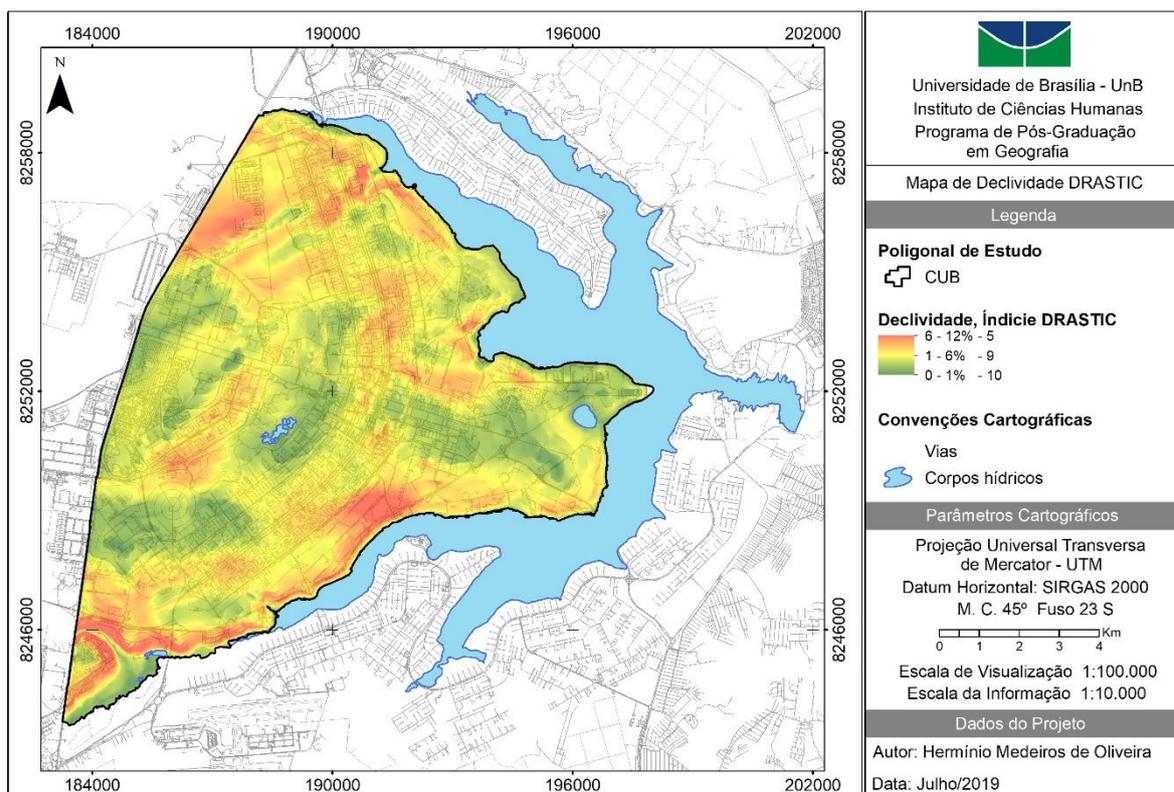


Figura 28: Mapa de Declividade – DRASTIC.

Dos sete parâmetros avaliados pelo método, este foi o que apresentou os maiores índices, todavia é o parâmetro de menor peso. A declividade guarda estreita relação com a recarga, pois quanto maior a declividade, menor a recarga, o contrário também se faz verdade.

Mesmo guardando tais relações, para este caso em particular, eles são considerados parâmetros independentes, pois uma área pode ser plana e apresentar baixa permeabilidade.

8.2.7 CONDUTIVIDADE

A condutividade é a propriedade hidrogeológica que determina quantitativamente e qualitativamente a movimentação de água no solo, guarda relações com vários parâmetros hidrogeológicos, especialmente com a porosidade, considerando que quanto maior a permeabilidade do material maior será a mobilidade dos contaminantes.

O resultado deste parâmetro indica o valor médio da condutividade hidráulica do aquífero, sendo este na ordem de 0,12m/dia. Deve-se ressaltar que seu intervalo de valor recebe índice 1 para toda a área do CUB. A Figura 29 ilustra o parâmetro.

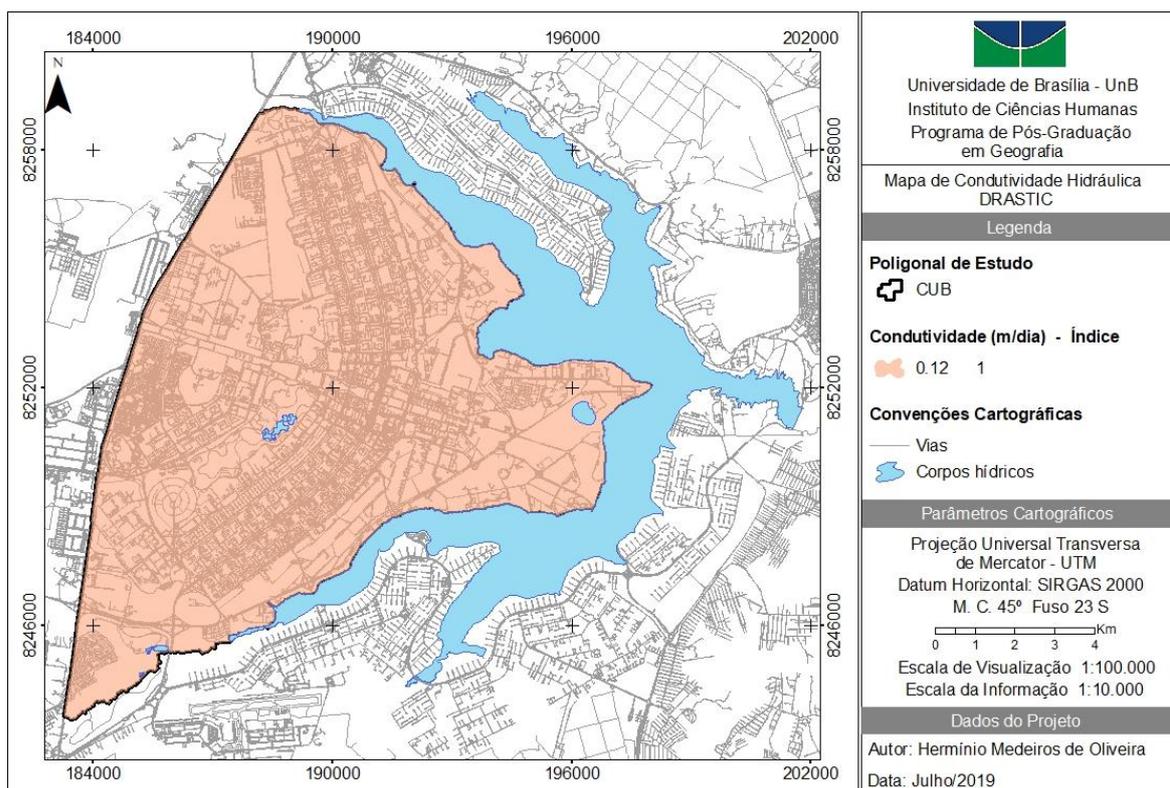


Figura 29: Mapa de Condutividade – DRASTIC.

Num primeiro momento houve ressalvas em considerar um índice único de condutividade para todo o sítio, porém após avaliar as interferências de estruturas subterrâneas como o Metrô, trincheiras para aberturas de vias e acessos, implantação de equipamentos urbanos subterrâneos (rede de água, esgoto e energia) e fundações de estruturas como viadutos,

pontes e edifícios de grande porte, a utilização do dado de literatura tornou-se como opção mais adequada a escala e dimensão da área de estudo.

8.2.8. RESULTADO DA VULNERABILIDADE DRASTIC

O índice geral de vulnerabilidade DRASTIC apresenta as classes de vulnerabilidade baixa, média e alta. Os parâmetros nível freático, solos e material do aquífero contribuem para a definição das classes de vulnerabilidade alta, concentradas nas imediações do Setor de Hotéis de Turismo Norte e das Quadras 215 e 216 Sul. Os resultados não apontam classes de vulnerabilidade extremas - muito alta ou baixa -, há, por outro lado, uma tendência em aumentar os valores para a classe média que cobre 83,73% da área, conforme Figura 30.

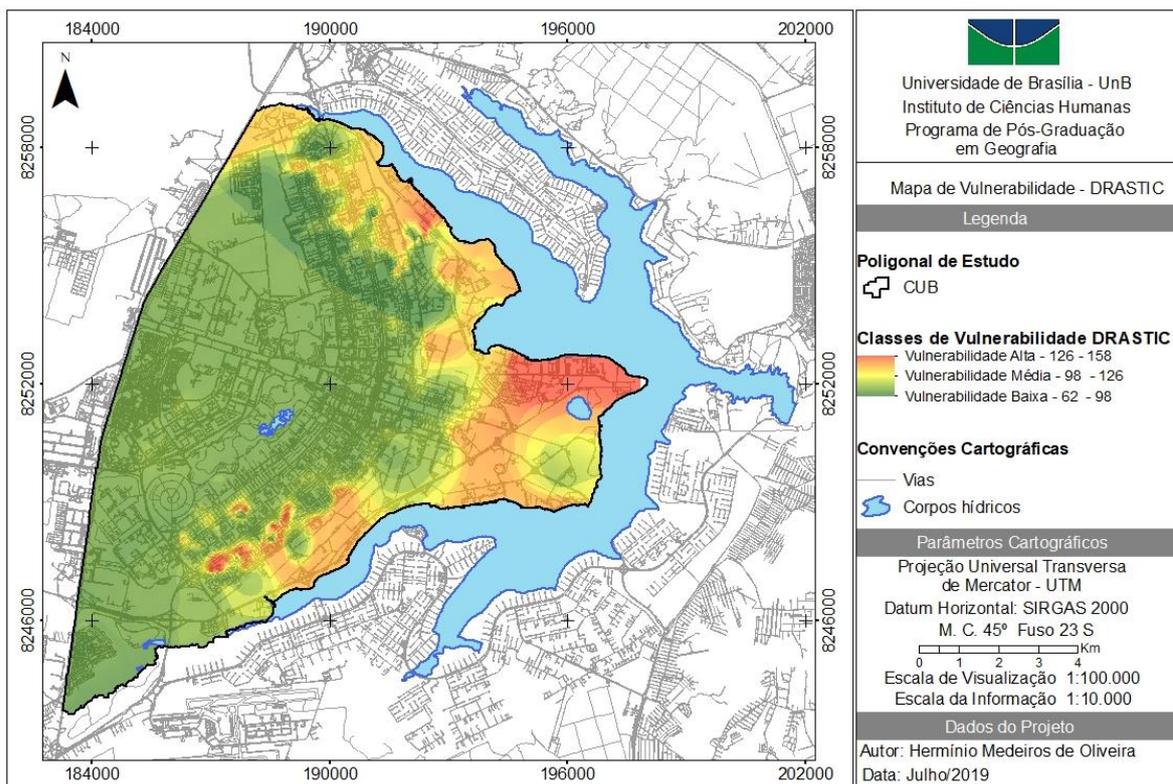


Figura 30: Mapa Índice DRASTIC.

A Tabela 18 exibe um panorama sobre a distribuição de vulnerabilidade no CUB, enfocando a distribuição de PACs e poços de outorgas das águas subterrâneas em suas respectivas zonas de vulnerabilidade. Os postos que apresentam inconformidades ambientais - sejam por inadequações verificadas em suas instalações ou por históricos de contaminações -

estão identificados com PAC – TC (postos de abastecimento de combustíveis com Termo de Compromisso).

Tabela 18: Distribuição postos de abastecimento (PAC) e poços de captação de água subterrânea. DRASTIC.

Vulnerabilidade	Poços	PAC	PAC – TC*	Áreas
Baixa	11	14	5	Parte Sul, Centro/Nordeste (1.389,82 ha. - 12,37%).
Média	91	82	19	Parte Leste e Central (9.426,32 ha. - 83,73%).
Alta	6	2	1	Setor de Hotéis de Turismo Norte (437,70 ha. – 3,90%).
Total	108	98	25	

Fonte: O Autor.

Os resultados revelam vulnerabilidade média para o Cemitério Campo da Esperança e alta para o Setores de Clube Norte/Sul. Neste último, seis captações de água subterrânea e dois PACs são identificados, sendo um dos quais, localizado, mais precisamente, no Setor de Hotéis de Turismo Norte com inconformidade ambiental.

Merece destaque também a zona de alta vulnerabilidade entre as quadras 215/214 Sul, sobre a qual estão localizados 4 PACs, colaborando para maiores riscos de contaminação.

8.3. RESULTADO DO DRASTI PAC

O Índice DRASTIC – PAC verifica a densidade de postos de combustíveis e a proximidade destes com poços de captação de água subterrânea, corrigindo uma provável subestimação do DRASTIC devido à uniformidade de alguns parâmetros aplicados ao método.

8.3.1. DENSIDADE DE KERNEL

A estimativa da densidade de Kernel revela uma distribuição concentrada na área central do CUB, ao longo das vias (Eixos W e L) das Asas Norte e Sul e em dois pontos ao longo do Eixo Monumental (EMO). Três agrupamentos de densidades máximas são detectados na EPIA - próximos à Candangolândia -, em torno do Palácio do Buriti, e em uma zona central compacta na extensão dos Eixos Rodoviários Norte/Sul. A espacialização da Densidade de kernel é mostrada na Figura 31.

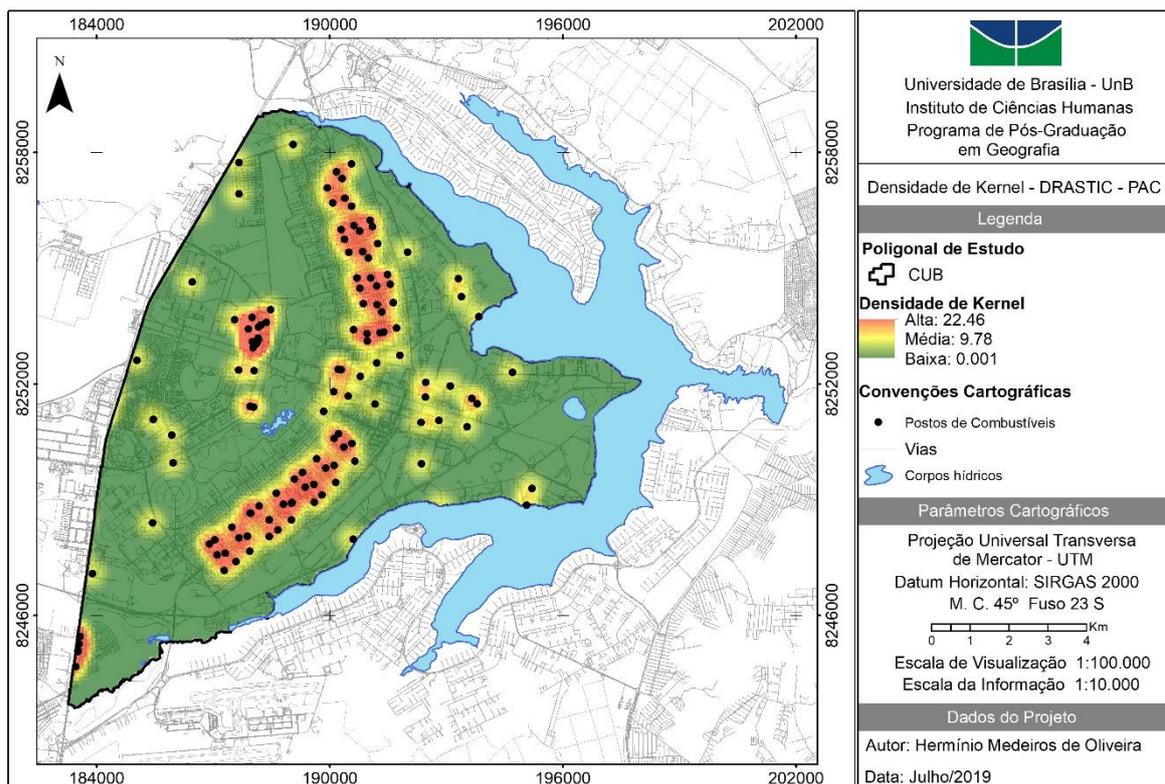


Figura 31: Mapa da densidade de Kernel

Nessa figura, constatam-se zonas onde não ocorrem agrupamentos de densidades de PACs. Elas somam aproximadamente 7.940,77 ha. e abrangem setores considerados como alternativas locais para a implantação de novos PACs, as quais, em sua maioria, estão entre zonas estritamente residenciais.

Os Postos de abastecimento de combustíveis não possuem uma distribuição espacial baseada em critérios técnicos, ponderando fragilidades do meio físico ou de logística da atividade. O que impera no setor é a livre concorrência, pois quando o Poder Público municipal tenta estabelecer uma distância mínima entre as atividades, a medida é considerada inconstitucional por regular uma atividade de livre concorrência.

Com tal posicionamento, o licenciamento ambiental fica compelido de avaliar alternativa locacional de uma atividade que, de antemão, não oferece risco de contaminação. No entanto, não apenas o risco de contaminação do binômio deve ser avaliado, mas sim a exposição contínua a compostos orgânicos voláteis, para moradores e trabalhadores do setor.

8.3.2. ANÁLISE DE PROXIMIDADE

A análise de proximidade resulta em dez categorias e considera as distâncias entre PACs e poços de outorgas de captação de água subterrânea. As áreas que apresentam as menores distâncias entre os eventos coincidem, em parte, com as zonas de maior densidade de kernel uma vez que as atividades de revenda de combustível e lava-jato ocorrem concomitantemente, propiciando o surgimento de *hot-spots*.

Compreender essa proporcionalidade entre distância e densidade de kernel mostra-se eficiente e compensatória visto que, em áreas onde essa densidade apresenta resultados próximos a zero, os índices de proximidade assumem valores altos - entre 8 e 10 - mais precisamente no Setor de Clubes Norte/Sul, Setor de Embaixadas Norte/Sul, Setor de Hotéis de Turismo Norte, Vila Planalto e Candangolândia, o que compensa o parâmetro relativo à densidade, como pode ser percebido na Figura 32.

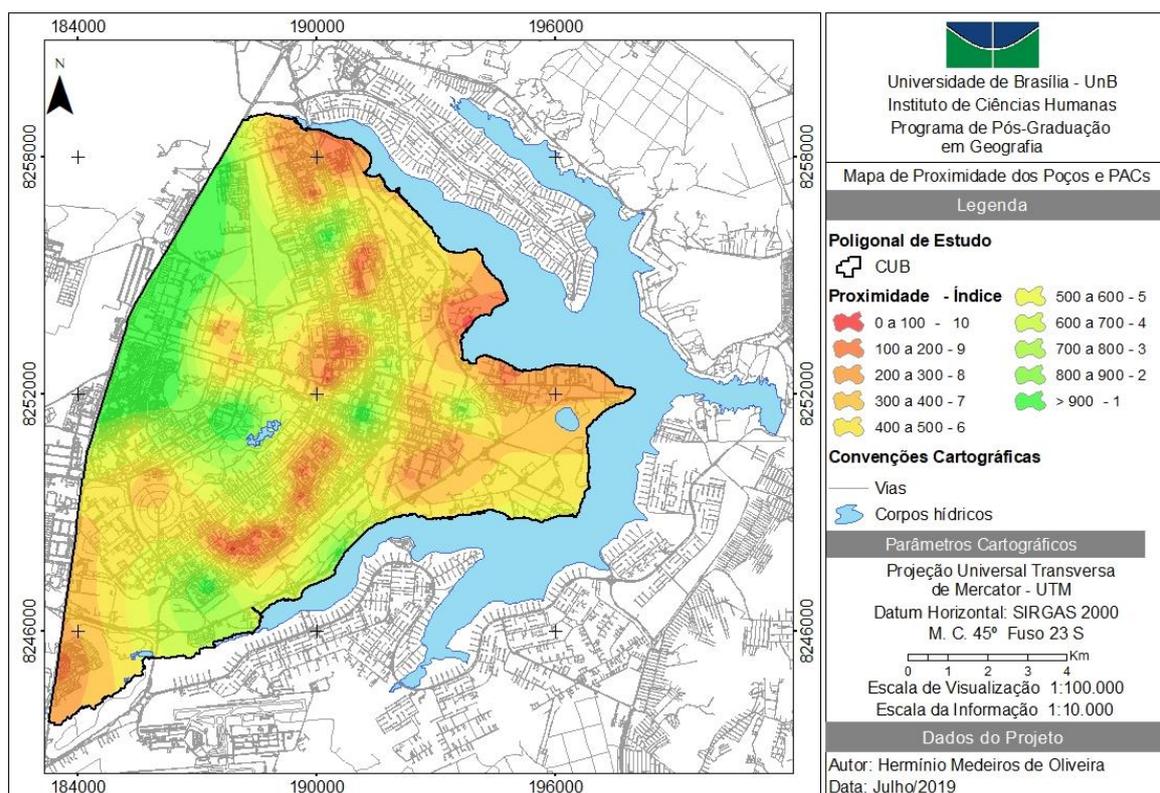


Figura 32: Mapa de proximidade – PACs e poços de outorga de água subterrânea.

É importante salientar a existência de conflitos das atividades de postos de abastecimento de combustível e a de captação de água subterrânea para fins comerciais/industriais. Do ponto de vista econômico, são consideradas atividades

complementares, porém políticas de saúde pública defendem a existência de estabelecimentos distintos para tais atividades, sem prejuízo comercial. Isso fica claro quando se analisa o gerenciamento de áreas contaminadas face à existência do poços de captação de água subterrânea com postos de abastecimento de combustível.

Em caso de eventual contaminação, o uso da água para fins industriais/comerciais não diminui o risco de contaminação, pois se deve levar em conta o fato do contato dérmico ser considerado uma das vias de ingresso do contaminante no trabalhador ou em eventuais usuários, segundo o Modelo Conceitual de Exposição, adotado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB.

8.3.3. ÍNDICE DRASTIC – PAC

Os resultados do DRASTIC – PAC aumentam consideravelmente a vulnerabilidade no sítio estudado. Os dois parâmetros relativos às análises espaciais colaboram para uma maior significância dos usos com potencial poluidor - postos de combustíveis e poços de captação de água subterrânea -, os quais em casos de contaminação do binômio solo/água subterrânea tornam-se caminhos preferenciais para a propagação do poluente.

O índice geral de vulnerabilidade DRASTIC - PAC exhibe três classes de vulnerabilidade, a saber: média, alta e muito alta. Comparando os resultados do DRASTIC e DRASTIC – PAC, é patente a influência dos parâmetros adicionados ao método tradicional.

No cenário expresso pelo DRASTIC – PAC, a vulnerabilidade média continua sendo dominante, em contraste com a baixa, a qual não se faz presente. No tocante dos valores de alta vulnerabilidade, vê-se um aumento de 3,90% para 17,43% na região central; já, num pequeno trecho nas proximidades da 215 sul, verifica-se índices muito altos – de 0,01% da área. Veja os resultados na Figura 33.

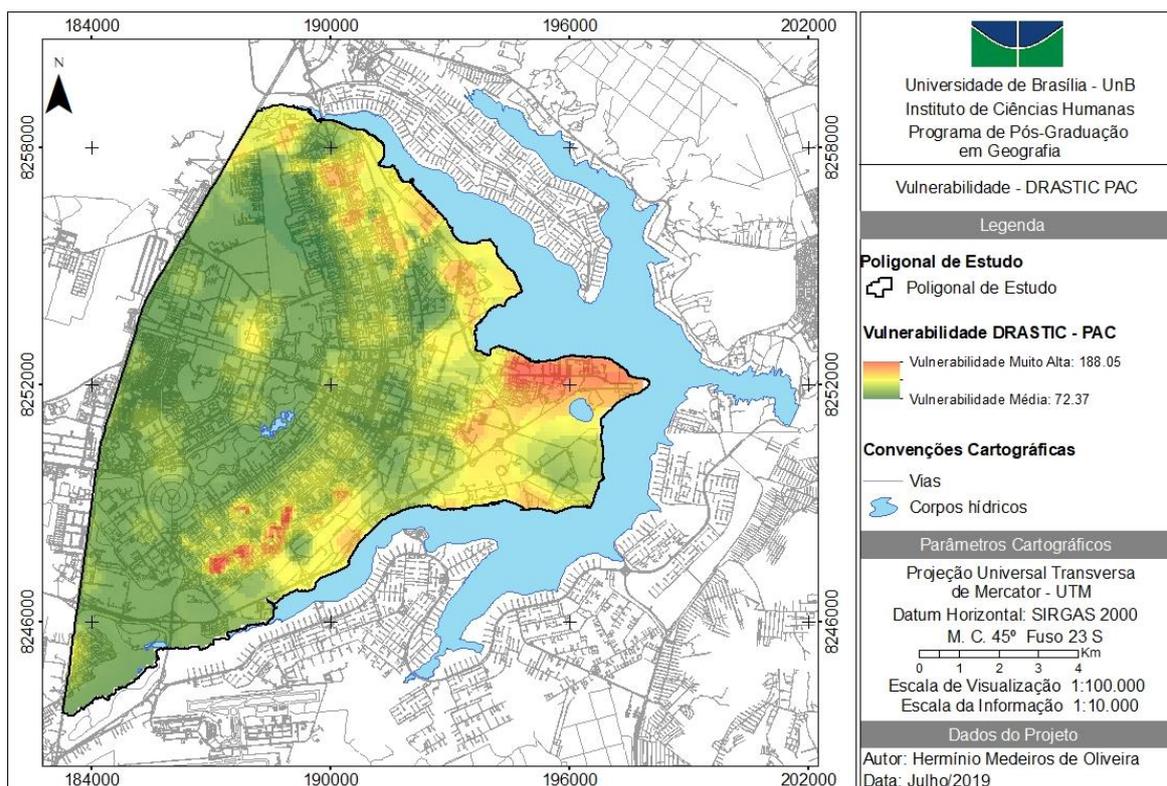


Figura 33: Mapa Vulnerabilidade DRASTIC – PAC.

Seguindo o modelo de apresentação dos resultados do método DRASTIC, a metodologia DRASTIC – PAC apresenta um quadro de distribuição de PACs e poços de captação de água subterrânea para fins de comparação e proposição de diretrizes para mitigar a existência de zonas saturadas em termos de usos de PACs. A Tabela 19 disponibiliza a distribuição dessas atividades em suas respectivas zonas de vulnerabilidade.

Tabela 19: Distribuição postos de abastecimento (PAC) e poços de captação de água subterrânea. DRASTIC - PAC.

Vulnerabilidade	Poços	PAC	PAC-TC*	Áreas
Média	75	65	21	Parte Leste e Central do CUB (9.294,60 ha-82,56%).
Alta	33	33	4	Eixo Rodoviário N/S e Orla do Lago(1.962,27 ha-17,43%).
Total	108	98	25	

Fonte: O Autor.

Para fins de resultados mais precisos, os valores das metodologias DRASTIC e DRASTIC – PAC são comparados por meio de uma tabela cruzada, aplicando a ferramenta *Tabulate Area (Spatial Analyst > zonal)*, conforme a Tabela 20.

Tabela 20: Resultado da tabulação das vulnerabilidades dos métodos DRASTIC e DRASTIC – PAC.

DRASTIC \ DRASTIC – PAC	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
BAIXA	13567650	231250	0
MÉDIA	61053750	32345500	0
ALTA	1000	4550475	9750

Fonte: O Autor.

A partir da tabela, conclui-se que as zonas de vulnerabilidade DRASTIC são distribuídas para classes de vulnerabilidade superior no cenário do DRASTIC – PAC. As vulnerabilidades baixas encontradas no DRASTIC migram mais de 50% para a vulnerabilidade média no DRASTIC –PAC, e as médias deslocam-se para níveis altos. A zona do DRASTIC – PAC sob o rótulo de muito alta é detectada em uma área de aproximadamente 1 ha., entre as Quadras 214/215 Sul.

9. CONCLUSÃO

A gestão do território, no tocante às fragilidades dos horizontes de subsuperfície, contempla necessariamente duas vertentes de eventos: a vulnerabilidade de aquíferos – a qual se caracteriza pela inflexibilidade ou rigidez locacional -, e as ocupações e usos que poderão se adequar aos resultados da análise do primeiro.

O objetivo precípua da pesquisa é integrar a determinação de vulnerabilidade do aquífero sob o Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB) às análises espaciais frente a usos e ocupações atuais para nortear futuros planejamentos da área. Essas análises focam em ferramentas de densidades e proximidades entre os poços de captação de água subterrânea e os postos de abastecimento de combustíveis (PACs), proporcionando uma nova abordagem metodológica de vulnerabilidade em ambiente urbano consolidado.

A aplicação de métodos indexadores para essa avaliação mostra-se eficiente pela possibilidade de comparação dos resultados. A princípio, a pesquisa atinha-se às metodologias GOD e DRASTIC, no entanto, viu-se a necessidade de acrescentar aos resultados dados que refletissem a potencialidade de contaminação por PACs, levando à proposição de uma nova metodologia: DRASTIC - PAC.

Nota-se, no decorrer da investigação, que o índice GOD é subestimado e seu resultado apresenta apenas a classe de vulnerabilidade baixa, revelando que o método é eficaz para áreas extensas e com poucos dados – análise mais genérica -, pois a ausência destes faz com que os parâmetros assumam índices mais elevados e consequentemente vulnerabilidade mais conservadora.

O DRASTIC, por outro lado, propicia um detalhamento maior das classes de vulnerabilidade – ao levar em conta a contribuição de um maior número de parâmetros -, o que permite reconhecer o seguinte padrão de distribuição de zonas de vulnerabilidade na área do CUB: baixa em 12,37% (Sul e Centro/Nordeste), média em 83,73% (Leste e Centro do CUB) e alta em 3,90% (Leste – Setor de Hotéis de Turismo Norte).

Embora o DRASTIC - PAC tenha reduzido o montante de três classes do DRASTIC para duas somente, pois a zona de muito alta vulnerabilidade perfaz apenas 1 ha., as zonas de vulnerabilidade considerando o uso do solo -, os resultados refletem a real susceptibilidade da ocupação por fontes com potencial de contaminação. Enquanto as regiões do Leste e Centro do CUB – que correspondem a 82,56% deste – apontam vulnerabilidade média, o Eixo Rodoviário Norte/Sul e Orla do Lago Paranoá – os quais cobrem o restante da área – indicam

vulnerabilidade alta, resultado não detectado pelas metodologias anteriores. Dessa forma, é possível identificar proporcionalidade entre a alta densidade de PACs e as proximidades destes com os poços de captação de água subterrânea, e as alterações encontradas nas classes de vulnerabilidade.

O fato de duas zonas de alta vulnerabilidade coincidirem na aplicação dos dois últimos métodos – regiões que abarcam o final do Eixo Rodoviário Sul, e o Setor de Hotéis e Turismo Norte e Vila Planalto - serve de alerta para uma ocupação com maior acuidade no uso do subsolo, principalmente no que se refere ao uso do subsolo no Setor de Hotéis e Turismo Norte, pois além da alta vulnerabilidade, este apresenta o nível freático abaixo de 5 metros.

Outro ponto significativo para a pesquisa é a utilização de ferramentas que usam interpoladores de natureza geoestatística para o tratamento de dados. Como Civita et al (2007) apontam, o tratamento matemático dos dados eficiente exige uma abordagem probabilística capaz de considerar as vicissitudes das grandezas hidrogeológicas contempladas em estudos de vulnerabilidade.

A utilização de informações de sondagem para integrar parâmetros do método DRASTIC e DRASTIC – PAC, mostra resultados representativos principalmente pela quantidade de amostras consideradas na área estudada, evidenciando uma escala de 1:10.000 para os parâmetros 4 (quatro) dos 7 parâmetros da metodologia original. Acrescenta-se também que os dados de sondagem foram derivados de uma única fonte de informação, diminuindo as chances de avaliações divergentes, quando estes parâmetros são provenientes de fontes distintas.

A posse desses dados mais apurados resulta na elaboração de mapas de vulnerabilidade mais bem delimitados, que permitem, por sua vez, propor uma reavaliação das normas de ocupação das unidades imobiliárias destinadas aos PACs com vista às zonas de alta vulnerabilidade. Ademais, é necessário atentar-se à atualização desses mapas uma vez que estes constituem ferramentas sujeitas a revisões periódicas sempre que novos dados forem disponibilizados e métodos mais robustos forem propostos.

Atenta-se que o uso do DRASTIC – PAC é voltado apenas para avaliação da vulnerabilidade sobre PACs, portanto sua utilização precípua é balizar estudos que visem a ocupação de unidades imobiliárias remanescentes ou criação de novas áreas para o sistema retalhista de combustíveis.

Por fim, considerar as ferramentas de análises espaciais como instrumento apropriado para imprimir à cidade um padrão mais próximo do sustentável é de suma importância, levando

em conta a vulnerabilidade de aquíferos, a potencialidade de contaminação e outros aspectos que impactam diretamente a saúde pública e consequentemente a economicidade das cidades.

10. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Por se tratar de um tema multidisciplinar, trabalhos futuros podem ser continuados no que se refere os seguintes tópicos:

- Desenvolvimento de diagnósticos de infraestrutura urbana subterrânea (rede de esgoto, gasodutos e tanques subterrâneos de armazenamento de substâncias poluentes), e consequente avaliação de distâncias de segurança e densidades considerando a proximidade com a rede de distribuição de água;

- Compilação de um banco de dados que considere as fontes com potencial e histórico de contaminação para gerenciamento de áreas contaminadas;

- Aplicação de sazonalidade para os parâmetros, ante a disponibilidade da informação, para cálculo de vulnerabilidade intrínseca;

- Avaliação de zonas de alta vulnerabilidade, do Cemitério Campo da Esperança e da área de contribuição da Lagoa do Jaburu dos aquíferos por meio de métodos estatísticos e determinísticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, B. & FOSTER, S. (1992). Land-surface zoning for groundwater protection. *Journal Institution of Water and Environmental Management*, n.6, 312-320p.
- ALBINET, M. & MARGAT, J. (1970). Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull BRGM 2me Series* 3(4):13-22.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H. & PETTY, R. J. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/2-85/018. pg. 29.
- ARTUSO, E.; OLIVEIRA, M. M. & LOBO FERREIRA, J. P. (2002). Assessment of groundwater vulnerability to pollution using six different methods: AVI, GOD, DRASTIC, SI, EPPNA and SINTACS. Application to the Évora Aquifer, LNEC, Rel. 184/02-GIAS.
- BRASIL. (2001). Lei nº 10.257, de 10 de Julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
- _____. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 396/2008, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
- _____. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 420/2009, de 28 de dezembro de 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.
- _____. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 460/2013, de 30 de dezembro de 2013. Altera a Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. (altera o prazo do art. 8º, e acrescenta novo parágrafo).
- BRINDHA, Karthikeyan; ELANGO, L. (2015). Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 597-613.
- CAMPOS, J.E.G. (2004). Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. Brasil: *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1): 41-48.

- CAMPOS, J. E. G.; MATOS, E. M.; GONÇALVES, T. D. (2002). Estudo do Rebaixamento da Lagoa do Jaburu: Causas e Estratégias de Recuperação e Cartilha (Livrete): Vida e Esperança de Recuperação da Lagoa do Jaburu-Brasília – DF.
- CAMPOS, J.E.G., GONÇALVES, T.D. (2015). Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no distrito federal. Relatório técnico, ADASA, Brasília, Distrito Federal 70 p.
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A., FREITAS-SILVA, F.H., MARTINS-FERREIRA, M.A.C. (2013). The Paranoá Group geology at the external portion of the Brasília Belt. *Braz.J. Geol.*, São Paulo, 43(3): 461-476.
- CAMPOS, J.E.G. (2011). ZONEAMENTO ECOLÓGICO E ECONÔMICO DO DISTRITO FEDERAL. Etapa 1, subporduto 3.5 Disponível em: http://www.zee.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/ZEEDF_CT01_Matriz-Ecologica.pdf
- CHRISPIM, Zelia Maria Peixoto. (2016). Análise da vulnerabilidade e caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos livres rasos da parte emersa da Bacia Sedimentar de Campos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes,. 320 f.
- CIVITA, M. (1994). *Le Carte della vulnerabilità degli acquiferi all inquinamento: Teoria e pratica*. Pitágora Editrice, Bologna.
- CIVITA, M. e De Maio, M., (1997). *SINTACS: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: metodologia e automatizzazione*. Pitágora Ed., Bologna.
- COSTA, G. G.; MEDEIROS, V.. (2011). A cartografia nos planos diretores do Distrito Federal. Paraty: Anais do I Simpósio Brasileiro de Cartografia Histórica. Disponível em: https://www.ufmg.br/rededemuseus/crch/simposio/COSTA_GRACIETE_G_1.pdf. Acesso em 19 de agosto de 2019.
- CORTÉS BRACHO, J. J. et al. (2006). Vulnerabilidad de aquíferos a la contaminación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Riego y Drenaje. Buenos Aires.
- DESCOVI FILHO, Leonidas Luiz Volcato. (2009). Subsídios para gestão das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Santa Maria/RS. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- DOERFLIGER N.; ZWAHLEN, F. (1997). EPIK: new method for outlining of protection areas

in karstic environments. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND FIELD SEMINAR ON KARST WATERS AND ENVIRONMENTAL IMPACTS, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 117-123.

DISTRITO FEDERAL (Brasil). Decreto nº 4.409, de 10 de janeiro de 1977. Aprova o Plano Estrutural de Organização Territorial do Distrito Federal – PEOT, e dá outras providências.

_____. Decreto nº 10.829, de 14 de outubro de 1987. Regulamenta o art. 38 da Lei nº 3.751, de 13 de abril de 1960, no que se refere à preservação da concepção urbanística de Brasília.

_____. Decreto nº 12.898, de 13 de dezembro de 1990. Dispõe sobre a Ocupação e Uso do Solo do Distrito Federal, e dá outras providências.

_____. Lei nº 212, de 20 de dezembro de 1991. Estabelece Normas Gerais para ordenamento territorial do DF, e dá outras providências.

_____. Lei Complementar nº 353, de 18 de novembro de 1992. Aprova o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal, institui o Sistema de Planejamento Territorial e Urbano do Distrito Federal, e dá outras providências.

_____. Lei Orgânica do Distrito Federal, promulgada em 08 de junho de 1993.

_____. TERRACAP - Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal. Plano de Manejo da APA do Lago Paranoá. Technum Consultoria SS. Brasília – DF, 2011. Produto 4. 196 p.

ELÇI, Alper. (2017). Calibration of groundwater vulnerability mapping using the generalized reduced gradient method. *Journal of contaminant hydrology*, v. 207, p. 39-49.

EMBRAPA - SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS (Rio de Janeiro, RJ). (1978). Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim Técnico, 53), 455 p

FOSTER, S. (1987). Fundamental concept in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc. Intl. Conf. “Vulnerability of soil and groundwater to pollution” (Nordwijk, The Netherlands, April 1987).

FOSTER, S.; HIRATA, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO/PAHO/HPECEPIS, Lima, 81 p. (Relatório Técnico).

FOSTER, S.; HIRATA R., ANDREO, B. (2002). Groundwater quality protection. A guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. GW-Mate, The World Bank, Washington.

FRANCÉS, A., PARALTA, E., FERNANDES J. & RIBEIRO, L. (2001). Development and

application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: The Susceptibility Index. Lisboa, Geosystem Center IST, Third International Conference on Future Groundwater Resources at Risk.

- FRANCISCO, Richard Fonseca. (2018). Contribuição metodológica à estimativa da vulnerabilidade natural e perigo de contaminação de aquíferos livres granulares. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro. Tese (Doutorado). 175 f.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, John A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
- FREITAS-SILVA F.H. & CAMPOS J.E.G. (1998). Geologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília, SEMARH, v. 1, p. 1-86.
- GONÇALVES, M. (2016). Diagnóstico e Proposta de Gestão das Reservas e Disponibilidades das Águas Subterrâneas no Distrito Federal, Considerando as Diferentes Regiões Administrativas e a Situação Atual de Uso e Ocupação do Solo. Relatório técnico, Adasa, Brasília, Distrito Federal, 99 p.
- GOGU, R. C.; DASSARGUES, Alain. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental geology, v. 39, n. 6, p. 549-559.
- GUIGUER, Nilson; KOHNKE, Michael Wolfgang. (2002.). Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. Águas Subterrâneas, n. 1.
- JAMRAH, Ahmad et al. (2008). Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. Environmental monitoring and assessment, v. 147, n. 1-3, p. 125-138.
- KUMAR, Prashant et al. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: a critical evaluation. Environmental Impact Assessment Review, v. 51, p. 38-49.
- LASAGNA, Manuela; DE LUCA, Domenico Antonio; FRANCHINO, Elisa. (2018). Intrinsic groundwater vulnerability assessment: issues, comparison of different methodologies and correlation with nitrate concentrations in NW Italy. Environmental earth sciences, v. 77, n. 7, p. 277.
- LE GRAND, H. (1964). System for evaluating contamination potential for some waste sites. American Water Works Association Journal, 56(8): 959-974.

- LIGGETT, Jessica E.; TALWAR, Sonia. (2009). Groundwater vulnerability assessments and integrated water resource management. *Watershed Manag Bull*, v. 13, n. 1, p. 18-29.
- LOBO FERREIRA, J. P. & OLIVEIRA, M. M. (2004). Groundwater vulnerability assessment in Portugal. *Geofísica Internacional*. Vol. 43, n. 4, pp. 541-550.
- LOPES, Diana Filipa Belixa. (2017). Modelação da concentração de poluentes agrícolas em aquíferos. Dissertação (mestrado). Universidade de Lisboa. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Lisboa. 188 f.
- MACHDAR, I. et al. (2018). Assessment of groundwater vulnerability using DRASTIC Model and GIS: A case study of two sub-districts in Banda Aceh city, Indonesia. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing.
- MACHIWAL, Deepesh et al. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 901-927.
- MARQUEZ, Mara Souto. (2007). A escala monumental do Plano Piloto de Brasília. Dissertação (mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. Brasília. 327 f.
- MARTINS, E.S. & BAPTISTA, G.M.M. (1998). Compartimentação Geomorfológica e Sistemas Morfodinâmicos do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília: IEMA/ SEMATEC/UnB. Vol.I, p.89-137.
- MELO JUNIOR, H. R. (2008). Método DRASTIC: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade. *Revista Águas Subterrâneas*. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - CABAS. Natal, R.N. CD-ROM.
- MFONKA, Z. et al. (2018). A GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Foumban (Western-Cameroon). *Groundwater for Sustainable Development*, v. 7, p. 250-264.
- MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira et al. (2004). Análise espacial de dados geográficos. Brasília: Embrapa.
- MUHAMMAD, Akhtar Malik et al. (2015). Evaluation of local groundwater vulnerability based on DRASTIC index method in Lahore, Pakistan. *Geofísica internacional*, v. 54, n. 1, p. 67-81.
- NAPOLITANO, P.; FABBRI, A. G. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, n.

235, p. 559- 566.

- NEH, Akenji Victorine et al. (2015). DRASTIC-GIS model for assessing vulnerability to pollution of the phreatic aquiferous formations in Douala–Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, v. 102, p. 180-190.
- NOVAES PINTO, M. (1994). Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: Novaes pinto, M., org. *Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília, Universidade de Brasília / SEMATEC, p.285-344.
- NRC (National Research Council). (1993). *Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- PANAGOPOULOS, G. P.; ANTONAKOS, A. K.; LAMBRAKIS, N. J. (2006). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, v. 14, n. 6, p. 894-911.
- PARANÁ. (Brasil). Resolução Nº 32, de 21 de dezembro de 2016 – SEMA – PR. Dispõe sobre o Licenciamento Ambiental, estabelece condições e critérios para Posto Revendedor, Posto de Abastecimento, Instalação de Sistema Retalhista de Combustível - TRR, Posto Flutuante e dá outras providências.
- 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*, v. 29, n. 2, p. 129-145.
- REATTO, A., MARTINS, E.S., FARIAS, M.F.R., SILVA, A.V., CARVALHO JÚNIOR, O.A. (2004). Mapa pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Planaltina: Embrapa Cerrados, 31 p.
- RIBEIRO, L.F.T. (2005). Um novo índice vulnerabilidade específico de aquíferos: formulação e aplicações. *Anais do Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA)*, v. 7, p. 16.
- SAHOO, Madhumita et al. (2016). Effectiveness evaluation of objective and subjective weighting methods for aquifer vulnerability assessment in urban context. *Journal of hydrology*, v. 541, p. 1303-1315.
- SANTOS, Paulo Roberto Penalva. (2010). Estudo da vulnerabilidade à poluição do aquífero Marizal na região de influência do Pólo Industrial de Camaçari (PIC). Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador. 127f.
- _____. (2016). Metodologia para tomada de decisão sobre utilização de água subterrânea no

- abastecimento público no entorno de áreas urbanas industrializadas. Tese de Doutorado. Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 335 f.
- SILVA, C. P. L.. (2007). Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso de Brasília – Área Tombada pela Unesco. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265 f.
- SILVA, W. F. (2013). Análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Maceió. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, AL. 158f.
- STEMPVOORT, Dale Van; EWERT, Lee; WASSENAAR, Leonard. AVI: (1992). A method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada. Prairie Provinces Water Board.
- _____. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. Canadian Water Resources Journal, v. 18, n. 1, p. 25-37.
- TALTASSE, P. (1972). Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Publicação Avulsa, n. 1, 4 mapas, 12 p.
- VERMEULEN, H.; LOBO FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M.(1994). A method for estimating aquifer recharge in DRASTIC vulnerability mapping. In: Proceedings of the second European conference on advances in water resources technology and management. Lisbon. 1994.
- VÍAS, J. M. et al. (200). A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. Environmental Geology, v. 47, n. 4, p. 586-595.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists. Verlag Heinz Heise, v.16. 131p.
- ZEE - ZONEAMENTO ECOLÓGICO E ECONÔMICO DO DISTRITO FEDERAL. (2011). Caderno Técnico, Matriz Ecológica, Brasília, 174 p. Disponível em:http://www.zee.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/ZEEDF_CT01_Matriz-Ecológica.pdf . Acesso em 10 de julho de 2019.