



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

SÉRGIO HENRIQUE DE MOURA NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DO RISCO À PERDA DA QUALIDADE AMBIENTAL DO AQUÍFERO
FREÁTICO NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Goiânia
2017**

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

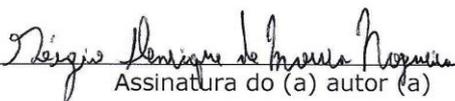
Nome completo do autor: Sérgio Henrique de Moura Nogueira

Título do trabalho: Avaliação do risco à perda da qualidade ambiental do aquífero freático na Região Metropolitana de Goiânia

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor (a)

Data: 20 / 02 / 2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

SERGIO HERIQUE DE MOURA NOGUEIRA

**AVALIAÇÃO DO RISCO À PERDA DA QUALIDADE AMBIENTAL DO AQUÍFERO
FREÁTICO NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Pró-Reitoria de Pós-graduação da Universidade Federal de Goiás, como requisito ao título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Clementino
Ferreira

GOIÂNIA - GO

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Nogueira, Sérgio Henrique de Moura

Avaliação do risco à perda da qualidade ambiental do aquífero freático na Região Metropolitana de Goiânia [manuscrito] / Sérgio Henrique de Moura Nogueira. - 2017.

76 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2017.

Bibliografia.

Inclui mapas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Águas subterrâneas. 2. Vulnerabilidade. 3. Lençol freático. 4. Região Metropolitana de Goiânia. 5. SIG. I. Ferreira, Nilson Clementino, orient. II. Título.

CDU 502/504



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ATA DA DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO Nº 003/2017

Aos vinte dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e dezessete, às 09:00, reuniu-se na sala Aqua do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG/UFG, a Banca Examinadora composta pelos: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira – CIAMB, o Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior – CIAMB, e o Prof. Dr. Maximiliano Bayer – IESA/UFG, para, sob a presidência do primeiro, proceder a defesa da Dissertação intitulada: “**Avaliação do risco à perda da qualidade ambiental do aquífero freático na Região Metropolitana de Goiânia**”, de autoria de Sérgio Henrique de Moura Nogueira, discente de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB), área de concentração em Estrutura e Dinâmica Ambiental. Foi realizada a avaliação oral no sistema de apresentação e defesa de dissertação de autoria do discente. Terminada a avaliação oral, a Banca Examinadora reuniu-se emitindo os seguintes pareceres mediante as justificativas e sugestões abaixo:

Membro da Banca	Parecer (Aprovado/Reprovado)	Assinatura
Dr. Nilson Clementino Ferreira	Aprovado	
Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior	Aprovado	
Dr. Maximiliano Bayer	Aprovado	

JUSTIFICATIVAS e SUGESTÕES:

Após a avaliação, o referido candidato foi considerado Aprovado na defesa de dissertação. Às 10:30 horas, o Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira, Presidente da Banca Examinadora, deu por encerrada a sessão e, para constar, lavrou-se a presente Ata.

Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior
Membro Titular

Prof. Dr. Maximiliano Bayer
Membro Titular

Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira
Presidente

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que em algum momento acreditaram no meu trabalho.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais, Maria Antonia e Sérgio Guilherme, pelo esforço que fizeram para que eu pudesse ter uma boa educação. Agradeço também aos meu orientador de trabalho final de curso de graduação, prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira, que propiciou os meus primeiros contatos com pesquisa na área de geotecnologias e abriu caminhos para que eu pudesse seguir atuando nesta área.

Agradeço a Systema Naturae Consultoria Ambiental, tanto como estagiário e posteriormente como funcionário e ao Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG-UFG), tanto pelo apoio técnico quanto pelas oportunidades que me foram concedidas.

Agradeço a todas as pessoas que em algum momento colaboraram com o desenvolvimento desta dissertação, em especial ao meu orientador, prof. Dr. Nilson Clemenino Ferreira, por toda a sua disposição e atenção durante a realização deste trabalho.

Agradeço a equipe docente do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás (CIAMB-UFG). Ao professores Dr. Laerte Guimarães Ferreira Jr., Dra. Karla Maria Silva de Faria, Dr. Maximiliano Bayer, Dra. Selma Simões de Castro, Dr. Fausto Miziara, Dr. Denilson Teixeira, Dra. Patricia de Araújo Romão, aos colegas Lucas Espíndola Rosa, Janete Rego Silva, Lindolfo Caetano Pereira Jr., Luiz Eduardo Machado, Fernando Moreira de Araújo, Adriano Silva de Faria e Leandro Leal Parente, tanto por sugestões, críticas ou pela disponibilização de dados.

Por fim, agradeço à Aline por todo apoio, companheirismo e incentivo. Agradeço também aos meus amigos e colegas que sempre me apoiaram antes e durante a realização desta dissertação.

RESUMO

Dentre os impactos causados na natureza pela sociedade humana, a urbanização é considerada uma das mais agressivas, podendo em muitos casos ser irreversível. Nas últimas décadas, a maioria da população global, passou a residir em áreas urbanizadas, gerando megacidades e regiões metropolitanas com alta densidade demográfica, onde se intensificaram várias atividades que podem ameaçar o ambiente com um todo, inclusive os aquíferos. A perda da qualidade ambiental dos aquíferos freáticos é um problema comum nas metrópoles brasileiras. A elaboração de estudos que abordam a espacialização de impactos provenientes da exposição a cargas contaminantes de diferentes naturezas são importantes instrumentos para o direcionamento de ações voltadas à conservação dos recursos hídricos nestes grandes centros urbanos. Neste estudo, a partir do processamento de múltiplas variáveis, foi possível elaborar um mapa da estimativa da profundidade do freático, em seguida foi elaborada uma avaliação de sua vulnerabilidade ambiental, e a partir da categorização do uso do solo, foi possível obter um mapa de classificação do risco geral de perda da qualidade ambiental das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Goiânia. O mapa resultante apresenta os locais da área de estudo onde os riscos são altos e muito altos, coincidentes com as áreas urbanizadas, devido a intensidade de atividades que ameaçam o recurso natural. No entanto é possível perceber que nas áreas não urbanizada há locais de risco moderado, devido ao desenvolvimento de atividades agrícolas e também de pecuária onde o freático se encontra próximo a superfície.

Palavras-chave: Águas subterrâneas, vulnerabilidade, lençol freático, perda da qualidade ambiental, Região Metropolitana de Goiânia, SIG

ABSTRACT

Among the impacts caused in nature by human society, urbanization is considered one of the most aggressive, and in many cases may be irreversible. In the last decades, the majority of the global population has been living in urbanized areas, generating megacities and metropolitan areas with high demographic density, where several activities have intensified and can threaten the environment as a whole, including aquifers. The loss of the environmental quality of groundwater is a common problem in Brazilian urban centers. Studies that approaches the spatialisation of impacts from exposure to pollutant loads of different natures, are important instruments for directing actions aimed at the conservation of water resources in these large urban centers. In this study, a map of water table's depth was elaborated from the processing of multiple variables. Then, an environmental vulnerability assessment was elaborated, and from the categorization of the land use, it was possible to obtain a classification map of the general risk of loss of the environmental quality of the groundwater of the metropolitan region of Goiânia. The resulting map shows the places where the risks are high and very high, coinciding with the urbanized areas, explained by the intensity of activities that threaten the natural resource. In the non-urbanized areas there are places of moderate risk, explained by the establishment of agricultural and livestock activities where the water table is near the surface.

Keywords: Groundwater, vulnerability, water table, loss of environmental quality, Metropolitan Region of Goiânia, GIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um modelo digital de elevação	17
Figura 2 – Tipos de curvatura	18
Figura 3 – Representação do ciclo hidrológico, mostrando o grau dos impactos nos pontos de interferência humana (DREW, 1983).	24
Figura 4 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação	27
Figura 5 – Mapa dos municípios constituintes da Região Metropolitana de Goiânia	29
Figura 6 – Relação entre precipitação x evapotranspiração real na RMG	30
Figura 7 – Mapa de declividade (Região Metropolitana de Goiânia)	31
Figura 8 – Mapa de solos. Fonte: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás (Macro ZAAE-GO)	32
Figura 9 – Abastecimento público na RMG	33
Figura 10 – Seleção dos parâmetros morfométricos para aplicação em regressão linear	35
Figura 11 – Correlação entre os modelos aplicados e os valores observados em poços e mini-poços outorgados	36
Figura 12 – Formas de relevo, para a Região Metropolitana de Goiânia, geradas pelo algoritmo proposto por Weiss (2000)	39
Figura 13 – Exemplo de área segmentada	40
Figura 14 – Refinamento do mapa de solos correspondente à Região Metropolitana de Goiânia	46
Figura 15 – Estimativa da profundidade do freático com base no nível estático (NE) dos poços localizados na Região Metropolitana de Goiânia	48
Figura 16 – Mapa de vulnerabilidade do aquífero freático	50
Figura 17 – Mapa de uso e cobertura da terra	52
Figura 18 – Mapa de risco geral de perda da qualidade ambiental	54
Figura 19 – Localização de mini-poços, cisternas e poços tubulares profundos nas classes referentes ao risco geral de perda da qualidade ambiental	60
Figura 21 – Distribuição de atividades potencialmente poluidoras por profundidades.....	62
Figura 22 – Densidade de atividades potencialmente poluidoras.....	65
Figura 23 – Mapa de risco de contaminação por atividades específicas.....	66
Figura 24 – Distância entre mini-poços/cisternas e atividades específicas.....	67
Figura 25 – Localização de mini-poços, cisternas e poços tubulares profundos nas classes referentes ao risco de contaminação específico	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre áreas edificadas dos municípios pertencentes a Região Metropolitana e Goiânia e as respectivas médias de profundidade de lençol freático	49
Tabela 2 – Área (ha) correspondente às classes de vulnerabilidade	51
Tabela 3 – Vulnerabilidade, potencial de risco e risco geral da perda da qualidade ambiental por classes de uso	55
Tabela 4 – Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de vulnerabilidade	58
Tabela 5 – Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de uso	58
Tabela 6 – Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de risco geral de perda da qualidade ambiental	59
Tabela 7 – Quantidade de poços tubulares profundos por classe de vulnerabilidade	59
Tabela 8 – Quantidade de poços tubulares profundos por classe de uso	59
Tabela 9 – Quantidade de poços tubulares profundos por classe de risco geral de perda da qualidade ambiental	59
Tabela 10 – Distribuição de atividades potencialmente poluidoras por classes de vulnerabilidade	62
Tabela 11 – Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de risco específico	67
Tabela 12 – Atividades com maior proximidade em relação a mini-poços ou cisternas	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Contaminantes comuns da água subterrânea e fontes de poluição	28
Quadro 2 – Relação dos parâmetros morfométricos previamente selecionados	35
Quadro 3 – Categorização da vulnerabilidade e do potencial de risco para determinação do risco geral de perda da qualidade ambiental do freático	44
Quadro 4 – Cruzamento entre densidade de atividade e vulnerabilidade para a obtenção de um risco de contaminação por atividades específicas	45

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAIAG	Distrito Agroindustrial de Aparecida de Goiânia
DASC	Distrito Agroindustrial de Senador Canedo
DIMAG	Distrito Industrial do Município de Aparecida de Goiânia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GO	Goiás
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighting
LS	Length / Slope
Macro ZAEE-GO	Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NE	Nível Estático do Freático
OLI	Operational Land Imager
RMG	Região Metropolitana de Goiânia
RS	Rio Grande do Sul
SECIMA	Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos
SGM	Superintendência de Geologia e Mineração
SIAGAS	Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas
SIEG	Sistema Estadual de Geoinformação
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWI	SAGA Wetness Index
SWIR	Shortwave Infrared

TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TWI	Topographic Wetness Index
UFG	Universidade Federal de Goiás
VDCN	Vertical Distance to Channel Network

SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. Fundamentação teórica	15
2.1. Ciclo hidrológico e recarga de aquíferos	15
2.2. Geomorfometria	16
2.3. Mapeamento da profundidade do lençol freático	19
2.4. Mapeamento de solos	21
2.5. Avaliação de riscos	24
3. Desenvolvimento	29
3.1. Área de estudo	29
3.2. Mapeamento da profundidade do lençol freático	34
3.3. Mapeamento dos solos	37
3.4. Mapeamento do uso do solo e de usos específicos	41
3.5. Avaliação de riscos	42
4. Resultados e discussão	46
4.1. Solos	46
4.2. Profundidade do lençol freático	48
4.3. Vulnerabilidade ambiental	50
4.4. Uso e ocupação do solo	51
4.5. Risco geral de perda da qualidade ambiental	53
4.6. Risco de perda da qual. amb. por atividades específicas	61
5. Conclusões	69
Referências bibliográficas	70

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização brasileiro nas últimas décadas vem acompanhado do crescimento das chamadas regiões metropolitanas. Estas áreas, caracterizadas por uma elevada densidade demográfica, são instituídas pela necessidade de fortalecimento de políticas públicas e ações integradoras entre os seus respectivos municípios constituintes.

Tal processo, entretanto, vem corroborando em componentes de insustentabilidade associados aos processos de expansão da área urbana e de modernização dos espaços intra-urbanos (GROSTEIN, 2001). O aumento do número de indústrias, de atividades comerciais, e de serviços, tem sido acompanhado do incremento da quantidade e da variedade de cargas contaminantes em áreas que em muitas vezes carecem de infraestrutura adequada.

Neste contexto, os recursos hídricos vêm vivenciando um forte abatimento decorrente da má ordenação dos fatores que interferem tanto na manutenção da qualidade ambiental de mananciais superficiais quanto de aquíferos subterrâneos. Villar (2016) ainda afirma que a falta de governança e o uso irregular de tais recursos constituem-se de uma ameaça real para a segurança hídrica do abastecimento público.

Desta forma, questões referentes à contaminação da água subterrânea vêm se tornando evidentes. No âmbito dos estudos referentes a qualidade ambiental das reservas hídricas subterrâneas, alguns métodos referentes a avaliação da vulnerabilidade e do perigo de contaminação já foram propostos e testados em diferentes circunstâncias (FOSTER et al., 2002).

Tais estudos são importantes subsídios a um ordenamento territorial ambientalmente sustentado. São capazes de identificar as sensibilidades da paisagem e permitir que um planejamento urbano e regional seja aplicado de forma a minimizar os impactos promovidos em áreas que passam pelo crescente processo de urbanização.

Este estudo tem por objetivo avaliar a distribuição espacial do risco de perda da qualidade ambiental do freático por meio de mapas de uso e ocupação e de

atividades potencialmente poluidoras nos limites da Região Metropolitana de Goiânia (RMG).

Buscou-se neste estudo utilizar dados provenientes de bases já existentes, utilizando como ferramenta de análise o sensoriamento remoto e os sistemas de informações geográficas.

Criada por meio da Lei Complementar nº 27 de 30 de dezembro de 1999, esta região metropolitana atualmente engloba 20 municípios (Figura 1), sendo eles: Abadia de Goiás, Aparecida de Goiânia, Aragoiânia, Bela Vista de Goiás, Bonfinópolis, Brazabranes, Caldasinha, Caturai, Goiânia, Goianópolis, Goianira, Guapó, Hidrolândia, Inhumas, Nerópolis, Nova Veneza, Santo Antônio de Goiás, Senador Canedo, Terezópolis de Goiás e Trindade.

A sua área total corresponde a 7.397,203 km², com uma população de 2.384.560 habitantes e uma densidade demográfica de 325,98 habitantes por km² (BRASIL, 2014). Conforme os dados divulgados pelo Censo 2010 (BRASIL, 2010), a taxa geométrica de crescimento populacional da metrópole goiana na última década foi de 2,23% ao ano, ante a 1,84% do estado e 1,17 da média nacional.

Este crescimento populacional contribuiu ao longo dos anos para uma intensificação do processo de ocupação de áreas ambientalmente frágeis, tais como nascentes, encostas e fundos de vale.

Dentro deste contexto, o estabelecimento de atividades poluidoras, somado às deficiências nas coletas de esgoto e de resíduos sólidos, vem provocando uma perda da qualidade ambiental das águas subterrâneas decorrente principalmente da lixiviação de cargas contaminantes como hidrocarbonetos, metais pesados, microrganismos patógenos e amônio (FOSTER et al., 2002).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CICLO HIDROLÓGICO E RECARGA DE AQUÍFEROS

A forma de entrada de água em um sistema hídrico se dá por meio da precipitação, sendo a chuva o seu principal tipo. Ao se precipitar sobre superfícies vegetadas, a água se deposita em folhas e caules, de onde evapora. O processo de evaporação aliado ao de transpiração de uma planta é denominado evapotranspiração.

Ao atingir o solo, a água pode seguir diferentes caminhos. O escoamento superficial se constitui no segmento do ciclo hidrológico caracterizado pelo deslocamento da água em superfície e nos cursos d'água. Ele se forma após a intensidade da precipitação superar a capacidade de infiltração do solo e depois de serem preenchidas as depressões armazenadoras da superfície.

Já a infiltração é o processo de passagem da água de superfície para o interior do solo. A água penetra por gravidade no solo até atingir as zonas saturadas, que constituem o reservatório de água subterrânea, também denominados de lençóis aquíferos ou simplesmente aquíferos (PIRES, 2009). Os afloramentos destes em superfície resultam em nascentes, originando assim os cursos d'água.

As nascentes, quanto às origens, podem ser formadas tanto por lençóis freáticos (depositados sobre as camadas impermeáveis) quanto aquíferos artesianos (confinados entre duas camadas impermeáveis), podendo surgir por contatos das camadas impermeáveis com a superfície, por afloramento dos lençóis em depressões de terreno, por falhas geológicas ou por canais cársticos (VALENTE & GOMES, 2005).

Alguns fatores que influenciam o armazenamento da água subterrânea são: a declividade, o tipo de solo e o uso da terra (PINTO et al., 2004). Estas áreas atuam no abastecimento do lençol freático para que este possibilite a existência de rios e córregos perenes durante a estiagem.

As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos não confinados (REBOUÇAS et al., 2002). A recarga natural de um aquífero pode ser considerada como a quantidade de água, proveniente da precipitação, que alcança a parte saturada do aquífero e fica disponível, por longos períodos, para aproveitamento (ARANTES, 2003). Em regiões de relevo acidentado,

sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de forma limitada.

Além do relevo e do tipo de uso ou cobertura vegetal, outros importantes fatores que influenciam a recarga de um aquífero são o tipo de solo, a pluviosidade, a litologia e a ocorrência e respectiva continuidade de fraturas no caso de rochas ígneas e metamórficas.

2.2. GEOMORFOMETRIA

O relevo é um dos muitos fatores que controlam os diferentes processos que ocorrem na superfície terrestre. O estudo do terreno é capaz de subsidiar análises que envolvem desde o substrato rochoso até os tipos dos solos e da vegetação presente em uma determinada área. Neste contexto, elementos morfométricos do relevo, tais como a altitude, a declividade, a curvatura e a orientação das vertentes são importantes subsídios a serem considerados na análise da paisagem.

Desta forma, a quantificação destes elementos topográficos assume importância na identificação de situações que favoreçam, ou não, a ocorrência de determinados processos ambientais. Esta quantificação também passa a desempenhar um importante papel em diferentes tipos de modelagens (hidrológicas, geomorfológicas, ecológicas, pedológicas, etc.).

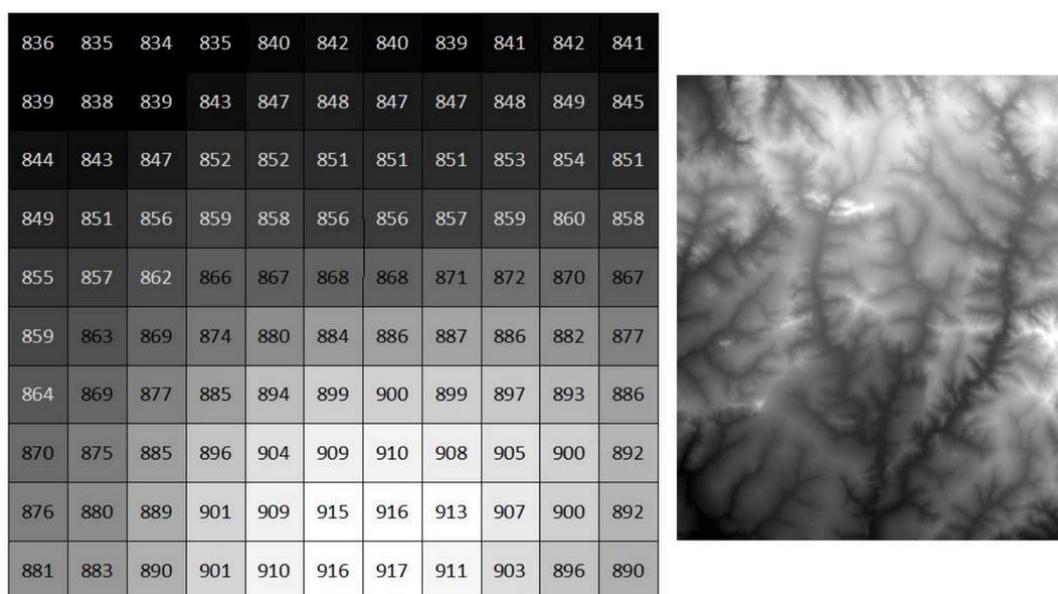
À este estudo quantitativo das formas do terreno encontradas na superfície terrestre atribuiu-se o nome da geomorfometria. Este campo está em constante evolução, envolvendo diferentes disciplinas, tais como, geomorfologia, matemática, pedologia, e mais recentemente, ciências da computação (PIKE et al., 2009).

Antes da década de 1990 os mapas topográficos eram a principal fonte destas informações quantitativas sobre o terreno. Por meio de técnicas geravam-se manualmente variáveis morfométricas como, por exemplo, declividade, densidade de drenagem e tipos de curvaturas (PIKE, 2000).

Avanços recentes em áreas como o sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas, tecnologias geoespaciais, assim também como o desenvolvimento de modelos para a representação de processos superficiais, propiciaram o desenvolvimento de novas técnicas e ferramentas voltadas para a quantificação de diferentes variáveis topográficas (BISHOP et al., 2012).

Nas últimas décadas, destaca-se o uso de modelos digitais de elevação (MDE) em formatos matriciais (Figura 1) gerados a partir de bases cartográficas já existentes ou de dados satelitários. Nestes MDEs, o valor de cada célula corresponde a uma altitude, podendo esta considerar apenas o limite do terreno (Modelos Digitais de Terreno), quanto o limite da vegetação ou de estruturas construídas pelo homem (Modelos Digitais de Superfície).

Figura 1 – Representação de um modelo digital de elevação.



A escolha e obtenção destes MDEs está vinculada a escala à qual determinado estudo será realizado. Para estudos realizado em escalas superiores a 1:100.000, recomenda-se o uso de MDEs obtidos a partir de levantamentos topográficos *in situ* ou de imagens de alta resolução espacial. Para curvas de nível, recomenda-se a aplicação de processos de interpolação e respectiva conversão para formato matricial.

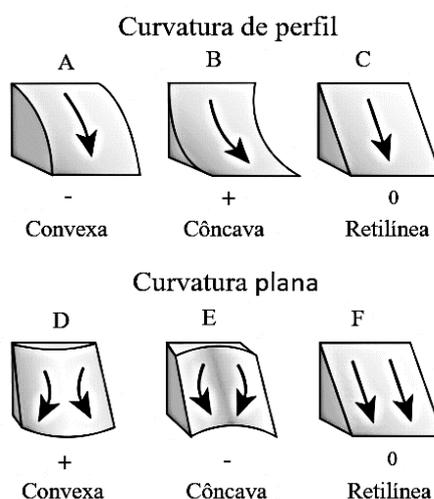
Para escalas inferiores a 1:100.000, alguns MDEs obtidos por meio de satélite e disponibilizados em formato matricial são amplamente utilizados, tais como ASTER (gerado por estereoscopia ótica) e SRTM (gerado por radar de abertura sintética), ambos com 30 m de resolução espacial.

A extração dos dados morfométricos a partir destes modelos tem por referência a altitude expressa em cada célula (ou pixel) da imagem. Vários índices e parâmetros, gerados a partir das relações estabelecidas entre estes valores, já foram propostos e avaliados em diferentes estudos.

A declividade, dada em graus ou porcentagem, revela a taxa máxima de variação da elevação de cada célula em relação a vizinhança. A sua aplicação permite a classificação (SANTOS et al., 2013) de um relevo como: plano (variação entre 0 a 3%), suave ondulado (variação entre 3 e 8%), ondulado (variação de 8 a 20%), forte ondulado (variação de 20 a 45%), montanhoso (variação de 45 a 75%) e escarpado (acima de 75%). Este parâmetro também é um importante elemento a ser considerado na formação dos solos. Um exemplo são os solos formados em relevos planos, com declividade inferior a 3%, que tendem a serem mais profundos e intemperizados do que aqueles formados em declividades superiores a 20.

As curvaturas planas e de perfil representam, respectivamente, a taxa de variação da declividade na direção ortogonal a da orientação da vertente e a taxa de variação da declividade na direção de sua orientação. Ambas são fatores topográficos que determinam a dinâmica da água no solo (KIRKBY & CHORLEY, 1967). Estes parâmetros permitem a distinção de diferentes formas de vertente, podendo ser côncavas, convexas ou retilíneas. A curvatura plana influencia a convergência (Figura 2-D) ou divergência (Figura 2-E) dos fluxos enquanto a curvatura de perfil afeta a desaceleração (Figura 2-A) ou a aceleração (Figura 2-B) do fluxo.

Figura 2 – Tipos de curvatura.



O índice topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index*) está relacionado às condições de umidade do solo, indicando assim as suas tendências de saturação (BEVEN; KIRKBY, 1979). Os valores mais elevados tendem representar solos mais úmidos, localizados principalmente em fundos de vale. O seu cálculo pode ser obtido pela equação 1, onde α representa a área de contribuição a montante de um pixel e β corresponde a sua declividade.

$$TWI = \ln \frac{\alpha}{\tan \beta} \quad \text{eq. 1}$$

Outros parâmetros também assumem importância na análise do relevo e de outras características da paisagem, tais como a orientação das vertentes (BURROUGH; MCDONELL, 1998), o comprimento de rampa (WISCHMEIER; SMITH, 1978), a distância vertical ao canal de drenagem (HENGL & REUTER, 2009) e a área de captação (CALLAGHAN; MARK, 1984)

2.3. MAPEAMENTO DA PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO

O conhecimento da profundidade do lençol freático é um elemento crucial em muitas investigações hidrológicas, no monitoramento ambiental e na gestão dos recursos naturais.

A maior parte das observações de profundidade é realizada pontualmente por meio de perfuração de poços ou de piezômetros. Entretanto, a quantidade e a distribuição destes dados para fins de mapeamento frequentemente não são adequados. O resultado são representações deficientes no que diz respeito, principalmente, a captação da variação espacial da profundidade estimada.

Estas extrapolações realizadas são baseadas em métodos estatísticos. A escolha do método de interpolação apropriado é essencial para a obtenção de mapas de espacialização confiáveis. Sendo assim, destaca-se o uso de dois métodos: a krigagem ordinária (REED et al., 2000; TROISI et al., 2000) e a ponderação do inverso das distâncias (IDW) (GAMBOLATI & VOLPI, 1979).

A krigagem ordinária se consiste no uso da dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima (CARVALHO & ASSAD, 2005).

A aplicação desta técnica ocorre em uma série de estudos, tais como na modelagem da superfície freática na cabeceira da bacia do Paraguaçu (OLIVEIRA, 2015).

A ponderação do inverso das distâncias (IDW) é um método determinístico que dá peso às observações, de modo que a sua influência na predição reduz à medida

que a distância do ponto aumenta. Para predizer o valor de algum local não medido, o IDW usa valores amostrados à sua volta, que terão um peso maior do que os valores mais distantes (JAKOB & YOUNG, 2006).

Tal técnica foi empregada em regiões como a porção do aquífero Bauro localizada no município de Rio Verde-GO (PEREIRA JUNIOR, 2015) o município de Crato-CE (TAVARES, 2008), a porção sedimentar do baixo curso do rio Paraíba (MEDEIROS, 2011) e o município de Piratini-RS (CARVALHO, 2014).

Outros estudos propõem modelos que utilizam-se de variáveis ambientais representativas para a simulação desta profundidade. Desta forma, Fan et al. (2014) utiliza um modelo para simulação regional da superfície de equilíbrio da água subterrânea aproximada. Neste estudo são utilizados dados de recarga, de transmissividade e de relevo, para a identificação de áreas com presença de veredas e o estudo da influência do divisor de água subterrânea da região da escarpa Serra Geral sobre o ciclo hidrológico local.

A técnica proposta requer que os dados de entrada para a região sejam armazenados em formato matricial, expressos por meio de uma grade de células regulares.

Neste estudo, a recarga média anual (mm/ano) é estimada por meio da combinação entre a multiplicação da pluviosidade média anual e a porcentagem referente a contribuição do fluxo subterrâneo na vazão observada no exutório da bacia hidrográfica. Esta porcentagem foi obtida por meio da aplicação do filtro de Eckhardt.

A transmissividade (m^2/dia) média de cada domínio hidrogeológico da região foi determinada com base em informações na literatura, mapas temáticos e ensaios de campo.

Os dados de altitude foram obtidos por meio do do modelo digital de elevação SRTM, com 90 m de resolução espacial.

A superfície de equilíbrio da água subterrânea aproximada gerada em duas etapas. No primeiro momento calculou-se o fluxo, com base na lei de Darcy, entre cada uma das células e as suas quatro vizinhas. Posteriormente, para cada uma das células, foi calculado o respectivo balanço hídrico.

O uso de modelos digitais de elevação para a estimativa da profundidade do lençol freático vem sendo aplicado em diferentes estudos (FINKE et al., 2004; KNOTTERS & BIERKENS, 2001; BUCHANAN et al., 2009; DESBARATS, 2002). O uso de parâmetros derivados destes modelos digitais de elevação (declividade,

curvatura, etc.) também têm sido aplicado em diferentes estimativas hidrológicas. Pachepsky et al. (2001) utiliza declividade e curvatura de perfil para explicar as variações de umidade do solo, enquanto Krishnamurty (1996) usou a declividade para estimar regiões aptas para a produção e extração de água.

Buchanan & Triantafilis (2009) examinou a aplicação de diferentes combinações de fontes de dados auxiliares (indução eletromagnética, radiometria e variáveis morfométricas) como forma de subsidio à estimativa da profundidade do lençol freático. Em relação às variáveis morfométricas, neste estudo foram utilizadas: aspecto da vertente, tipos de curvaturas (total, plana e de perfil), direção do fluxo, comprimento do fluxo (montante e jusante), declividade e distância ao canal drenagem. Para tal estimativa, foram aplicados 3 diferentes métodos: regressão linear múltipla, krigagem ordinária e ponderação do inverso das distâncias.

Este estudo mostrou que os resultados obtidos por meio de regressão linear múltipla apresentaram uma maior consistência em regiões com deficiência ou má distribuição dos dados. Para o recorte espacial estudado, a correlação existente entre o nível do freático observado nos pontos amostrais e a cota altimétrica expressa em um modelo digital de elevação foi de 0,61, com valor de p inferior a 0,01. O uso de um modelo de regressão linear múltipla, em relação a krigagem ordinária e a ponderação inversa das distâncias, também propiciou uma maior sensibilidade aos diferentes tipos de variações dentro da paisagem.

2.4. MAPEAMENTO DE SOLOS

O solo é um material natural composto por finas partículas resultantes da ação do intemperismo sobre os diferentes tipos de rochas. A sua distribuição na superfície terrestre não é uniforme, sendo a sua gênese composta por diferentes fatores como o material de origem, o clima, a ação de microorganismos, o relevo e o tempo. De acordo com Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (1999):

Solo é a coletividade de indivíduos naturais, na superfície da terra, eventualmente modificado ou mesmo construído pelo homem, contendo matéria orgânica viva e servindo ou sendo capaz de servir à sustentação de plantas ao ar livre. Em sua parte superior, limita-se

com o ar atmosférico ou águas rasas. Lateralmente, limita-se gradualmente com rocha consolidada ou parcialmente desintegrada, água profunda ou gelo. O limite inferior é talvez o mais difícil de definir. Mas, o que é reconhecido como solo deve excluir o material que mostre pouco efeito das interações de clima, organismos, material originário e relevo, através do tempo.

A complexidade da cobertura pedológica é vinculada a heterogeneidade dos procesos pedogeomorfológicos e hidrológicos, implicando assim em vários desafios no que tange ao mapeamento dos solos.

Nas últimas décadas, tais mapeamentos vêm se desenvolvendo por meio de duas vertentes principais: métodos tradicionais com grande embasamento em dados obtidos em campo e métodos pedométricos.

O primeiro conjunto é representado por mapeamentos fundamentados em investigações realizadas em campo. São coletadas informações de diferentes perfis de solos, catenas e topossequências, posteriormente extrapoladas com base em dados cartográficos e satelitários (geologia, vegetação, relevo, tipos de usos e densidade de drenagem).

Este conjunto tem a vantagem de favorecer um levantamento em escalas maiores, propiciando também uma abordagem em níveis categóricos mais detalhados. Tais técnicas são amplamente empregadas em mapeamentos oficiais, tendo se destacado no Brasil o seu uso no Projeto RADAM.

O segundo conjunto de métodos se refere aos levantamentos pedométricos, representados por técnicas que permitem a inferência de variações espaciais dos tipos e propriedades do solo por meio de uso de variáveis ambientalmente relacionadas.

Grunwald (2006) define pedometria como a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos, com auxílio da pedologia, da estatística e dos sistemas de informações geográficas (SIG), para o estudo da distribuição e da gênese de solos. A principal aplicação de técnicas desta natureza se refere a mapeamentos de escalas regionais e de áreas remotas ou com restrições para coletas de campo.

Destes métodos, destacam-se técnicas de análise espacial e de geoestatística envolvendo a aplicação de modelos de regressão linear múltipla, regressão logística, árvores de decisão e redes neurais, para a predição de atributos do solo com base

em relações já estabelecidas entre solo e paisagem (CATEN, 2012). Ao longo dos anos, com o avanço da capacidade de processamento computacional e da evolução dos SIGs, várias técnicas foram desenvolvidas para analisar, modelar e mapear a ocorrência dos diferentes tipos de solos.

Meirvenne & Cleemput (2005) utilizou a krigagem ordinária para o mapeamento da textura do solo em uma região na Bélgica com base em 4887 análises texturais realizadas dentro da área e estudo. Gonzales et al. (2008) aplicou técnicas avançadas de mineração de dados em uma modelagem preditiva do solo para o território hondurenho. Uma base de dados com 2670 perfis de solos diferentes, tomados durante a década de 1990 e distribuídos em todo o país, foi utilizada no desenvolvimento deste estudo. Para esta predição, foram utilizadas como variáveis explanatórias parâmetros relacionados ao clima, ao terreno, à vegetação e à geologia do respectivo país.

Destacam-se também o uso de dados satelitários e de modelos digitais de elevação, dos quais podem ser extraídos uma série de parâmetros morfométricos. Esta análise digital do terreno em estudos pedométricos parte da premissa de que a topografia é um dos principais fatores contribuintes da gênese dos solos.

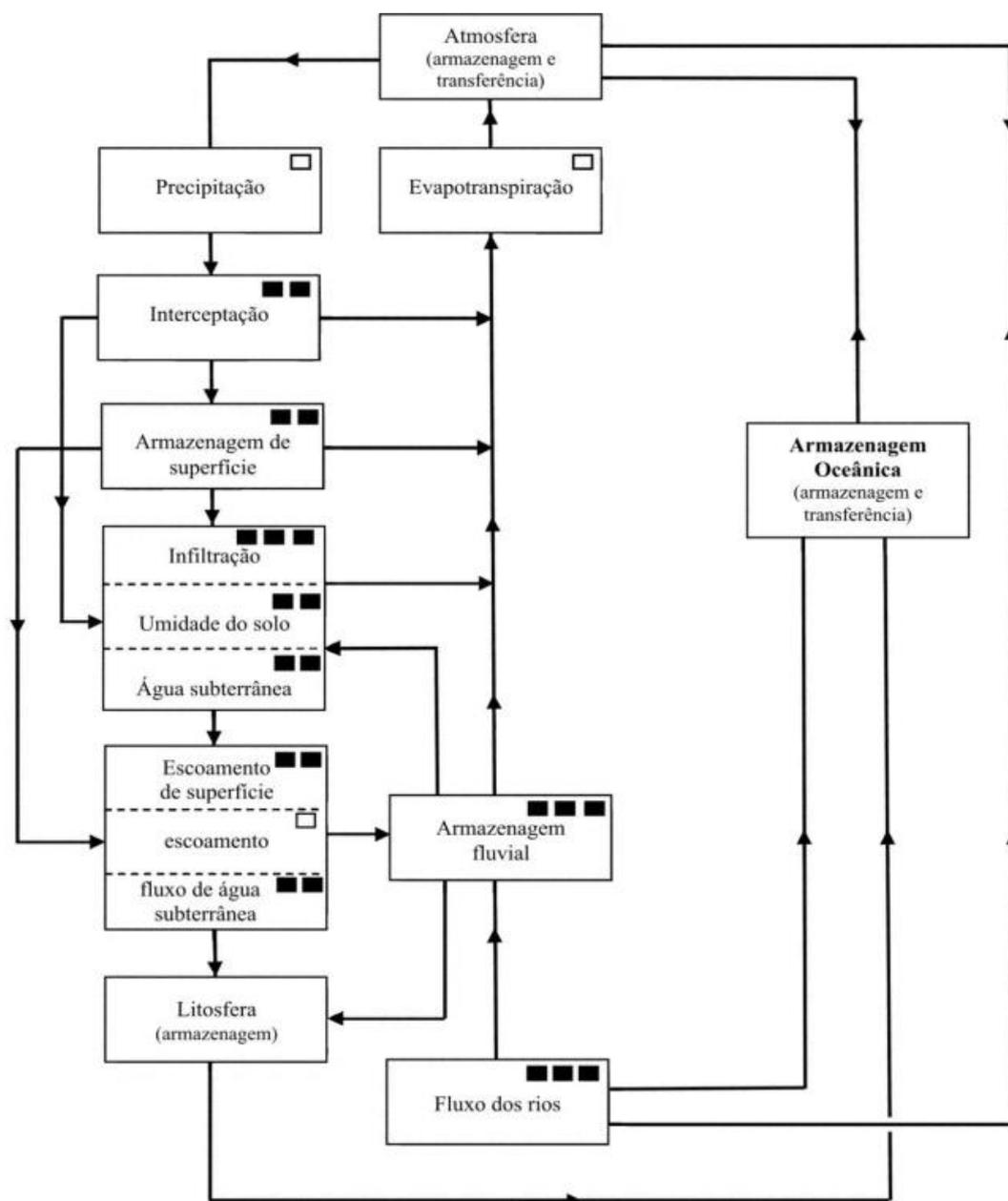
Neste contexto, Florinski (2012) relaciona diferentes variáveis ambientais com determinadas propriedades do solo. O autor afirma que embora a previsão espacial das propriedades do solo possa ser realizada por muitas abordagens matemáticas, o sucesso dessa modelagem depende primariamente da correta seleção de preditores para uma determinada propriedade do solo. Destes preditores, os atributos morfométricos podem ser considerados como os preditores mais confiáveis.

Figueiredo et al. (2008) propõe a criação de mapas de solo por meio de regressão logística envolvendo os seguintes parâmetros: declividade, curvatura de perfil, curvatura plana, direção do fluxo, acumulação de fluxo, comprimento do fluxo, distância as rios, Stream Power Index (SPI) e Índice de Umidade Topográfica (TWI). Neste estudo foram comparados mapas de solo de referência (produzidos por métodos convencionais) com os produtos gerados a partir do uso de parâmetros morfométricos obtidos a partir do MDE SRTM de 90 m de resolução espacial. Os resultados mostraram uma porcentagem de acerto de 61% a 71%.

2.5. AVALIAÇÃO DE RISCOS

A interferência humana no meio ambiente ocorre por meio de uma série de impactos nas diferentes etapas do ciclo hidrológico (Figura 3).

Figura 3 – Representação do ciclo hidrológico, mostrando o grau dos impactos nos pontos de interferência humana (DREW, 1983).



PONTOS DE INTERVENÇÃO HUMANA

- Impacto leve
- ■ Impacto moderado
- ■ ■ Grande impacto

Estes impactos obedecem a uma lógica complexa, onde a noção de sociedade incorpora contradições que influenciam e redirecionam as inter-relações dos seus constituintes, que são, por natureza, antagônicas e conflitivas (COELHO, 2010).

O meio ambiente passa a sofrer processos de degradação, envolvendo perda de qualidade e demais alterações adversas onde o equilíbrio dos seus diferentes componentes é rompido. Segundo Sánchez (2006),

Esta degradação ambiental pode ser percebida em diferentes graus. O grau de perturbação pode ser tal que um ambiente se recupere espontaneamente; mas, a partir de certo nível de degradação, a recuperação espontânea pode ser impossível ou somente se dá a prazo muito longo, desde que a fonte de perturbação seja retirada ou reduzida. Na maioria das vezes, uma ação corretiva é necessária.

Desta forma, estudos de vulnerabilidade e de risco de perda da qualidade ambiental são imprescindíveis para que estes processos de degradação sejam minimizados e não se tornem irreversíveis, proporcionando assim passivos ambientais com altos custos de recuperação.

No âmbito dos estudos referentes às águas subterrâneas, várias metodologias já foram propostas e validadas no que tange a avaliação do risco de alteração dos seus respectivos parâmetros físicoquímicos. Tais mudanças estão vinculadas ao comprometimento da quantidade e da qualidade deste recurso, de grande importância aos processos ambientais, ecológicos e sociais.

Em relação aos impactos sobre a recarga hídrica subterrânea, diferentes modelos hidrológicos já foram aplicados em verificações desta natureza. Outros estudos também propõem a delimitação das áreas potenciais de recarga hídrica, envolvendo assim a análise integrada dos diferentes elementos da paisagem (SHEREIF, 2014).

Algumas variáveis utilizadas nestes trabalhos incorporam dados referentes a geologia, litologia, lineamentos, declividade, solos, uso e cobertura da terra, geomorfologia (e diferentes parâmetros morfométricos), hipsometria, pluviosidade, temperatura, evapotranspiração, profundidade freática, espessura do aquífero freático, condutividade hidráulica, altitude em relação ao nível das nascentes, altitude em relação ao curso d'água a jusante, densidade de drenagens e densidade de lineamentos. As fontes frequentemente utilizadas para a obtenção destes dados são:

mapas, imagens por sensores orbitais instalados a bordo de satélites, dados provenientes de estudos já realizados e informações obtidas em campo.

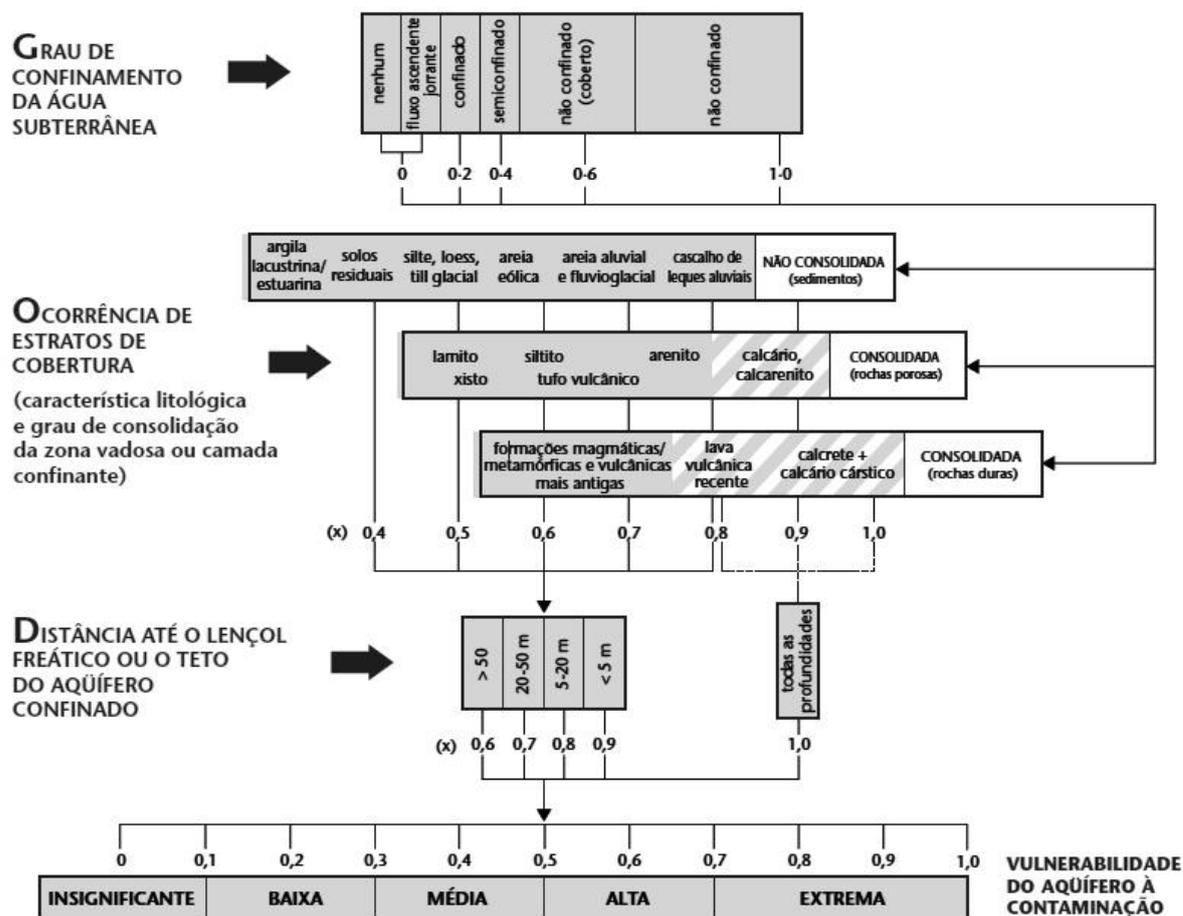
Destacam-se também estudos de avaliação da vulnerabilidade ambiental de águas subterrâneas, referentes a sensibilidade de um aquífero aos efeitos adversos de cargas contaminantes. Nesta perspectiva, Vrba e Zaporozec (1994) define três grupos principais de acordo com a abordagem adotada: ambientes hidrogeológicos, modelos análogos e sistemas paramétricos.

O primeiro grupo se refere a avaliação em termos qualitativos, baseados nas características gerais do ambiente. O segundo utiliza expressões matemáticas para representar parâmetros essenciais, tais como o tempo de trânsito médio na zona vadosa. O terceiro grupo utiliza indicadores de vulnerabilidade, baseados na ponderação e posterior interação de diferentes parâmetros previamente selecionados (Foster et al., 2002).

Dentro deste último grupo, alguns métodos já foram aplicados em diferentes circunstâncias. Destes, o método EPIK foi desenvolvido especificamente para ambientes carsticos (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1998). O DRASTIC (ALLER et al., 1987) é o mais conhecido, cujo resultado é obtido pela interação de 7 parâmetros diferentes: distância entre superfície e zona saturada, taxas de recarga natural, meio aquífero, solo, aspecto topográfico, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica da zona saturada. Entretanto, algumas críticas sobre este método se dão pela existência de correlação e sobreposição de parâmetros, somada a possibilidade de combinações muito diferentes de situações hidrogeológicas gerarem índices similares, comprometendo assim o processo de tomada de decisão.

O método GOD se destaca pela sua simplicidade conceitual e de aplicação. Nele, a obtenção da vulnerabilidade do aquífero à contaminação se dá por meio da interação de três aspectos hidrogeológicos (Figura 4): o grau de confinamento da água subterrânea; a característica litológica e grau de consolidação da zona vadosa ou camada confinante, e; a distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado.

Figura 4 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.
(Foster et al., 2002)



Aliado a este método de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos freáticos e artesianos, o método POSH, segundo Foster et al. (2002) oferece instrumentos para o cadastro de cargas contaminantes do subsolo com base em duas características:

- Probabilidade da presença de contaminantes que, segundo se sabe ou se espera, são persistentes e móveis no subsolo;
- Existência de uma carga hidráulica associada (sobrecarga) capaz de gerar o transporte advectivo dos contaminantes para os sistemas aquíferos.

Tais informações nem sempre estão disponíveis, o que faz com que sejam trabalhadas suposições simplificadoras como a associação da probabilidade da presença de cargas substâncias poluentes com o tipo de atividade humana e a estimativa da provável sobrecarga hidráulica com base no uso da água pela atividade em questão (Quadro 1).

Quadro 1 – Contaminantes comuns da água subterrânea e fontes de poluição. (Foster et al., 2002)

Origem da poluição	Tipo de contaminante
Atividade agrícola	nitrato; amônio; pesticidas; organismos fecais
Saneamento in situ	nitrato; hidrocarbonetos halogenados; microorganismos
Garagens e postos de serviço	hidrocarbonetos aromáticos e halogenados; benzeno; fenóis
Disposição de resíduos sólidos	amônio; salinidade; hidrocarbonetos halogenados; metais pesados
Indústrias metalúrgicas	tricloretileno; tetracloretileno; hidrocarbonetos halogenados; fenóis; metais pesados; cianureto
Pintura e esmaltação	alquilbenzeno; hidrocarbonetos halogenados; metais; cianureto; hidrocarbonetos aromáticos; tetracloretileno
Indústrias de madeira	pentaclorofenol; hidrocarbonetos aromáticos; hidrocarbonetos halogenados
Limpeza a seco	tricloretileno; tetracloretileno
Indústria de pesticida	hidrocarbonetos halogenados; fenóis; arsênio
Despejo de lodo de esgoto	nitrato amônio; hidrocarbonetos; chumbo; zinco
Curtumes	cromo; hidrocarbonetos halogenados; fenóis
Extração/exploração de gás e petróleo	salinidade (cloreto de sódio); hidrocarbonetos aromático
Mineração de carvão e metalíferos	acidez; metais pesados; ferro; sulfatos

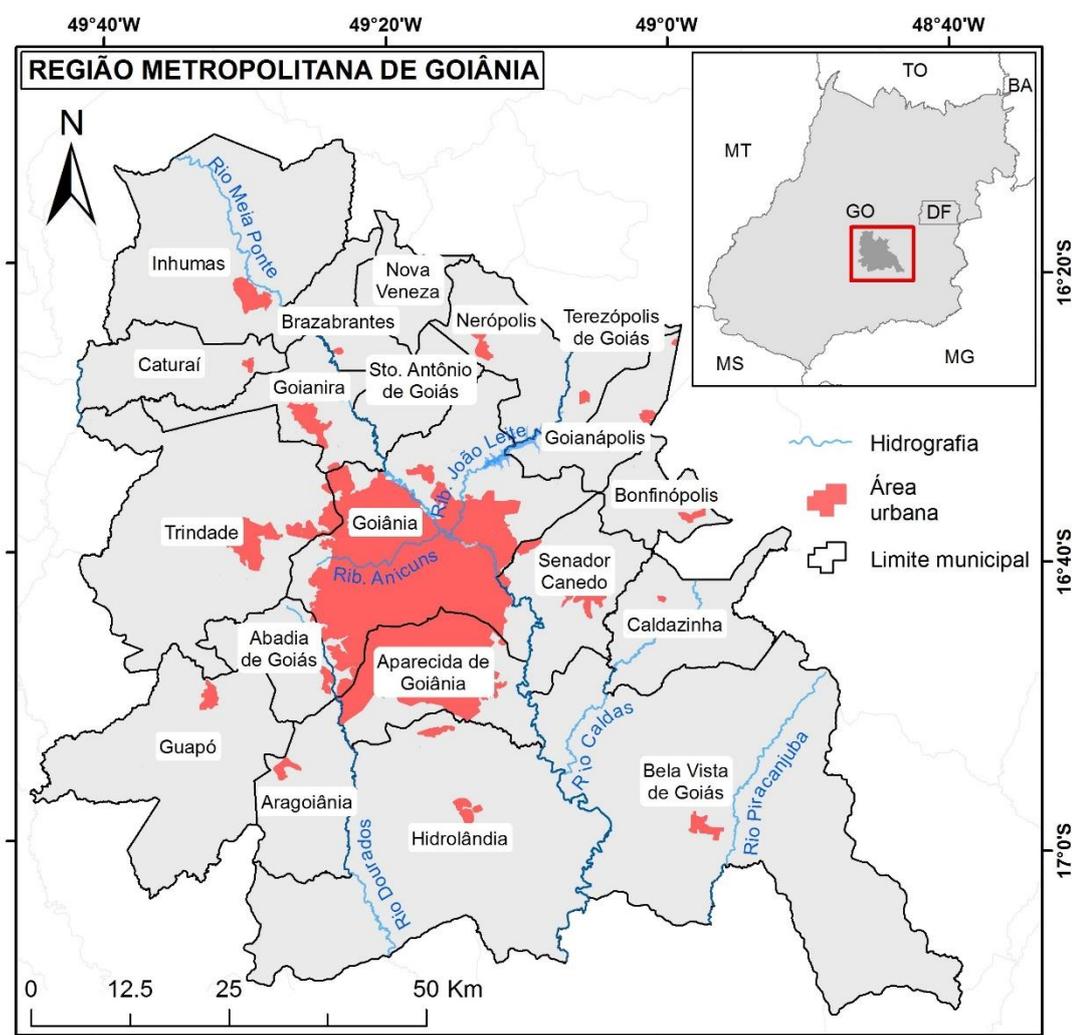
Por meio da interação destes dois instrumentos, surge a determinação do perigo de contaminação da água subterrânea. Para tal é realizada a sobreposição de um plano contendo as fontes difusas e pontuais de distintas fontes poluidoras com a distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero em questão. Os casos mais preocupantes são aqueles em que as atividades capazes de gerar elevada carga contaminante se desenvolvem em uma área de alta ou extrema vulnerabilidade (Foster et al., 2002).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A Região Metropolitana de Goiânia foi criada por meio da Lei Complementar nº 27 de 30 de dezembro de 1999. Atualmente engloba 20 municípios (Figura 5): Abadia de Goiás, Aparecida de Goiânia, Aragoiânia, Bela Vista de Goiás, Bonfinópolis, Brazabrantas, Caldazinha, Caturai, Goiânia, Goianápolis, Goianira, Guapó, Hidrolândia, Inhumas, Nerópolis, Nova Veneza, Santo Antônio de Goiás, Senador Canedo, Terezópolis de Goiás e Trindade.

Figura 5 – Mapa dos municípios constituintes da Região Metropolitana de Goiânia. Fonte: IBGE



Esta região ocupa uma área de 7.397,20 km², possuindo população de 2.384.560 habitantes e uma densidade demográfica de 325,98 habitantes por km²

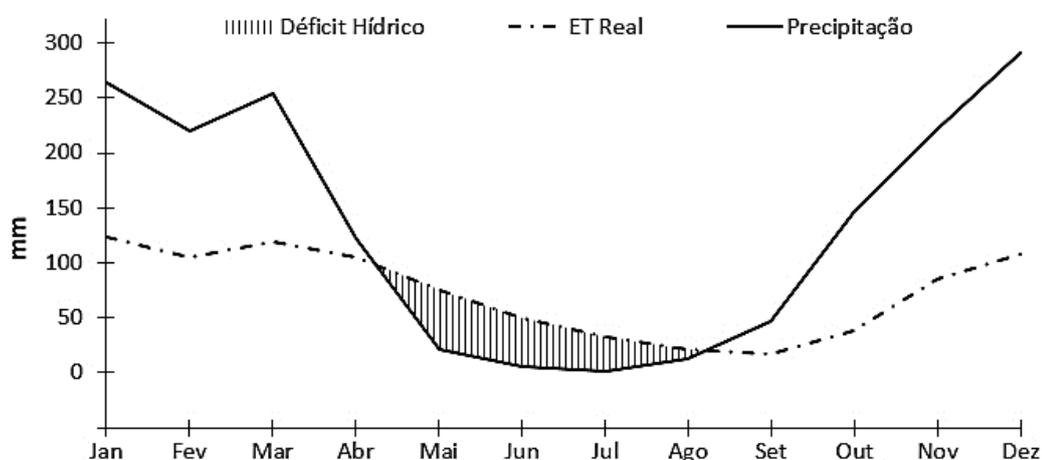
(IBGE, 2014). Conforme dados do Censo 2010, a taxa de crescimento populacional da metrópole goiana na última década foi de 2,23% ao ano, ante a 1,84% do estado e 1,17 da média nacional, o que inclui a Região Metropolitana de Goiânia na lista das que possuem maior crescimento populacional no Brasil.

Tal área compreende partes das bacias hidrográficas do Rio Meia Ponte, do Rio dos Bois e do Rio Corumbá. A parcela territorial referente à bacia do Rio Meia Ponte compreende a área mais urbanizada, entre os principais mananciais e as principais sub-bacias, destacando-se as do Ribeirão João Leite, Rio Caldas, Rio Dourados e do Ribeirão Anicuns.

O clima da região, segundo a classificação Köppen-Geiger, é caracterizado como Aw (tropical quente subúmido), com precipitação média anual de 1600 mm. Possui duas estações bem definidas, com chuvas no verão e invernos secos.

De acordo com a média dos dados acumulados mensais de precipitação e evapotranspiração real, referentes ao período compreendido entre 2000 e 2014, provenientes respectivamente dos sensores TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), percebe-se a ocorrência de *déficit* hídrico nos meses de maio, junho, julho e agosto, podendo esse período estender-se até os meses de setembro e outubro (Figura 6).

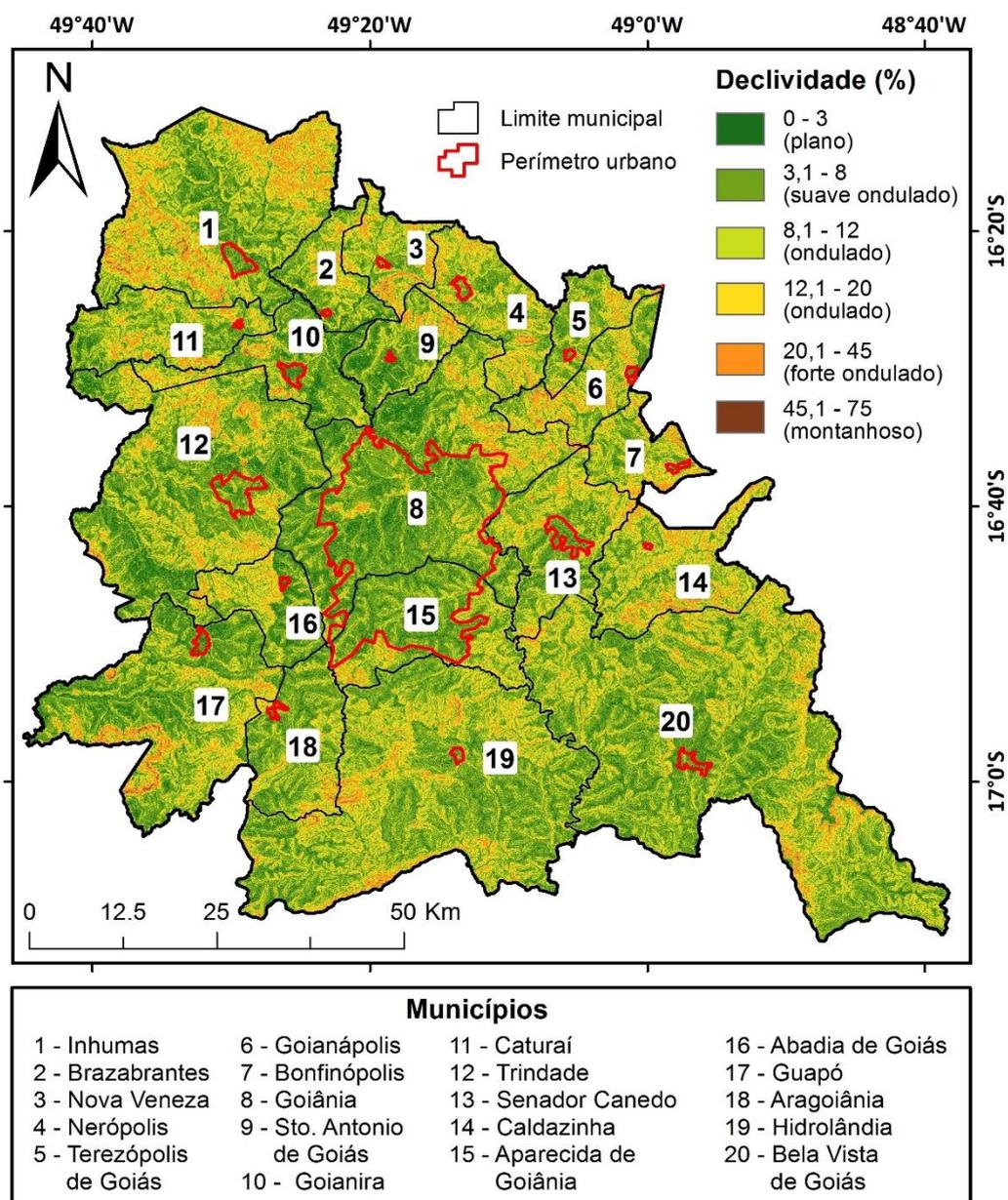
Figura 6 – Relação entre precipitação x evapotranspiração real na RMG. Fonte: Dados TRMM e MODIS



O relevo (Figura 7), principalmente nas áreas urbanizadas, é caracterizado pelo predomínio de áreas planas e suavemente onduladas. As maiores declividades se situam nas porções noroeste e leste, sendo que os municípios de Inhumas, Nova

Veneza e Goianópolis possuem uma grande parte dos seus limites em áreas de relevo fortemente ondulado.

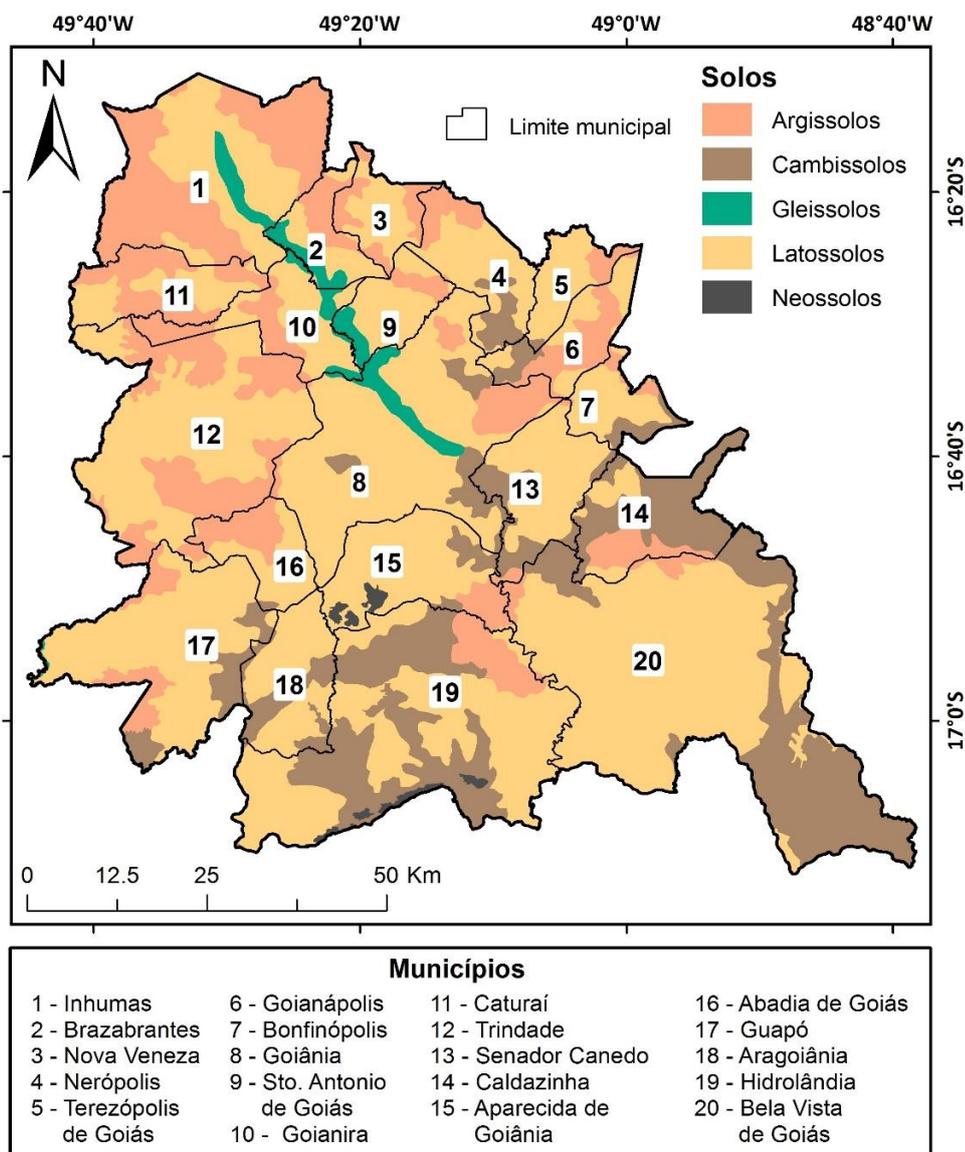
Figura 7 – Mapa de declividade (Região Metropolitana de Goiânia). Fonte: SRTM



Os solos predominantes são aqueles pertencentes à classe dos Latossolos (Figura 8). Tal categoria é representada por solos bem intemperizados, normalmente atingindo profundidades superiores a 2 metros. São encontrados preferencialmente em áreas planas ou suavemente onduladas e são caracterizados pela elevada quantidade de macro poros entre os seus agregados, o que lhes conferem uma boa permeabilidade mesmo quando com textura muito argilosa.

Em menor quantidade, estão presentes: Argissolos e Cambissolos, localizados predominantemente em áreas de relevo mais movimentado, com declividades superiores a 8%; Neossolos Litólico, situados em áreas fortemente onduladas com declividades superiores a 20%, e; Gleissolos, caracterizados pela alta saturação de água.

Figura 8 – Mapa de solos. Fonte: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás (Macro ZAAE-GO)

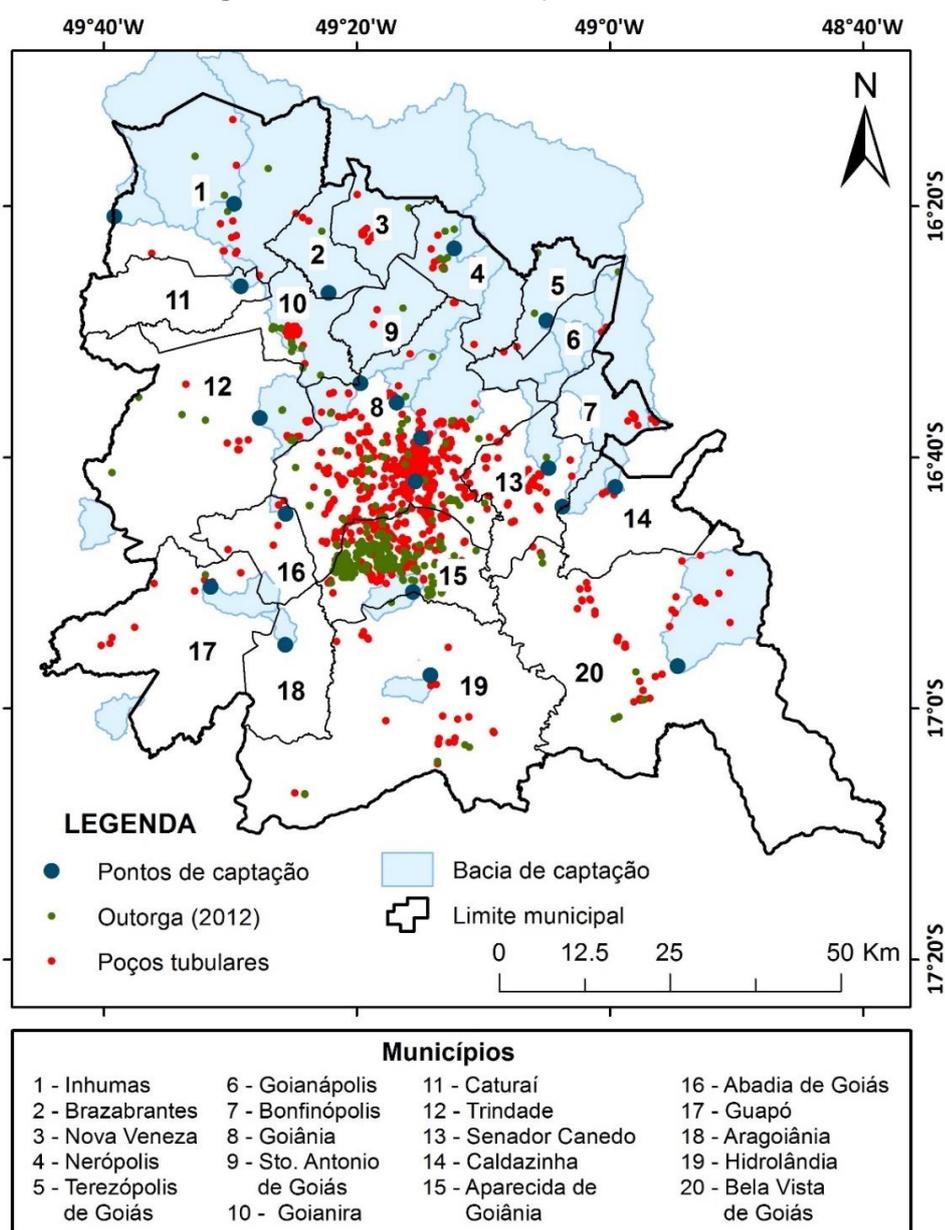


De acordo com o Campos et al. (2003), os aquíferos freáticos na RMG se distribuem através dos solos, do manto de alteração de rochas (saprólito) e de sedimentos inconsolidados. Esses reservatórios subterrâneos são caracterizados por sua grande extensão, continuidade lateral e homogênea, com espessura saturada muito variável. Os volumes de água captado por poços rasos e cisternas são sempre inferiores a 500 litros por hora. Apesar da baixa vazão dos poços, tal aquífero

desempenha função de filtro para a recarga dos aquíferos confinados, além de possuir também importante papel na regularização da vazão de base das drenagens superficiais.

Segundo dados do Atlas do Abastecimento Urbano de Água, o abastecimento da Região Metropolitana de Goiânia se realiza por meio de sistemas produtores com captações superficiais e subterrâneas (Figura 9). Os principais mananciais superficiais utilizados são o Ribeirão João Leite e o rio Meia Ponte, que abastecem de forma integrada Goiânia, Trindade e Aparecida de Goiânia. O uso de poços tubulares profundos ocorre em sistemas isolados, como no abastecimento dos municípios de Goianira e Santo Antônio de Goiás.

Figura 9 – Abastecimento público na RMG.



3.2. MAPEAMENTO DA PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO

Em relação a estimativa da profundidade do lençol freático, a escolha da técnica a ser utilizada se baseou na comparação dos resultados obtidos por quatro métodos distintos: krigagem ordinária, ponderação pelo inverso da distância (IDW), modelo de simulação da superfície de equilíbrio de água subterrânea aproximada em escala regional, e regressão linear múltipla. A seleção do método a ser utilizado se deu por aquele cujo resultado teve maior consistência com os valores observados em mini poços e cisternas outorgados pela Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA).

O uso da krigagem e do IDW ocorreu por meio da interpolação do nível estático do freático observado em poços tubulares profundos localizados na Região Metropolitana de Goiânia, catalogados na base de dados da Superintendência de Geologia e Mineração (SGM) e disponibilizada na Internet pelo portal de dados do Sistema Estadual de Geoinformação (SIEG). A consistência espacial deste dado foi verificada, eliminando-se em seguida pontos com coordenadas repetidas, valores nulos ou não condizentes com a paisagem observada, como por exemplo, valores muito altos nas margens de rios e córregos.

À estes pontos foram acrescentadas 50 coordenadas aleatórias, com valores iguais a zero, geradas sobre a hidrografia extraída de um modelo digital de terreno (SRTM, resolução espacial de 30 m). O acréscimo destas coordenadas se deu pelo fato dos corpos hídricos estarem em áreas de descarga do lençol freático.

A aplicação do modelo de regressão linear múltipla foi feita a partir da premissa de que há um controle da topografia sobre a profundidade de aquíferos rasos, estabelecidos principalmente em áreas planas e de baixa permeabilidade (HAITJEMA & BRUKER, 2005).

O nível estático do freático observado nos poços tubulares profundos também foi utilizado neste modelo, desta vez como variável resposta. Para a sua aplicação foram extraídos 10 parâmetros morfométricos a partir de um modelo digital de elevação (SRTM) com 30 m de resolução espacial. Os resultados foram armazenados em um arquivo raster, com 10 bandas referentes aos parâmetros morfométricos obtidos.

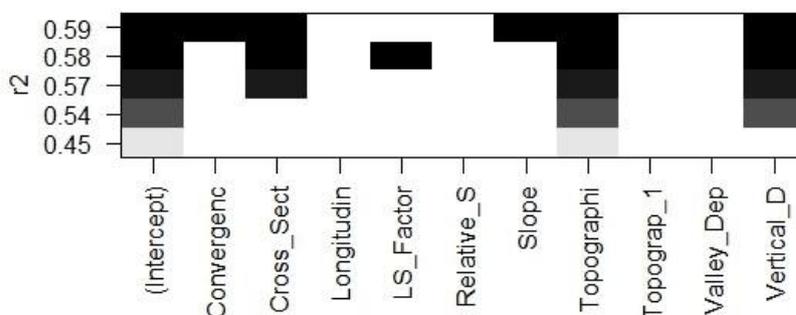
A escolha destes parâmetros foi permeada pela presença e frequência de uso em estudos envolvendo relações existentes entre relevo e aquíferos freáticos (Quadro 2).

Quadro 2 – Relação dos parâmetros morfométricos previamente selecionados.

Índice	Referência
Channel Network Base Level	HENGL & REUTER (2009)
Convergence Index	KOETHE & LEHMEIER (1996)
Cross Sectional Curvature	ZEVENBERGEN & THORNE (1987)
Longitudinal Curvature	ZEVENBERGEN & THORNE (1987)
LS Factor	WISCHMEIER & SMITH (1978)
Relative Slope Position	BOEHNER & SELIGE (2006)
Slope	BURROUGH & MCDONELL (1998)
Topographic Wetness Index (TWI)	BEVEN & KIRKBY (1979)
SAGA Wetness Index (SWI)	BOEHNER et al. (2002)
Valley Depth	HENGL & REUTER (2009)
Vertical Distance to Channel Network (VDCN)	HENGL & REUTER (2009)

Dos 10 parâmetros extraídos, 5 foram utilizados no modelo aplicado neste estudo. A seleção se deu pelas variáveis que apresentaram menor colinearidade e coeficientes de determinação mais elevados (r^2) (Figura 10). O valor de r^2 estimado foi de 0,59, com valor de p inferior a 0,001.

Figura 10 – Seleção dos parâmetros morfométricos para aplicação em regressão linear múltipla.



Em seguida, foi realizada uma matemática de bandas entre os 5 parâmetros selecionados, tendo por base os seus respectivos coeficientes de regressão expressos na equação 2. O resultado gerado foi armazenado em um arquivo raster onde cada pixel passou estar associado aos valores de profundidade estimados.

$$NE = 12,95 - 0,04 * P1 + 0,09 * P2 + 1480,04 * P3 - 13,93 * P4 - 0,62 * P5 \quad \text{eq. 2}$$

NE: Nivel Estático do Freático

P3: *Cross Sectional*

P1: *Convergence Index*

P4: Declividade

P2: *Vertical Distance to Channel Network*

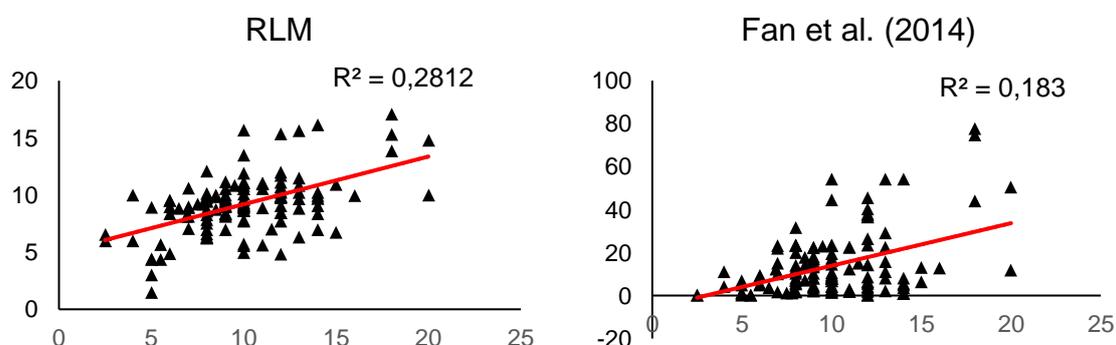
P5: *Topographic Wetness Index*

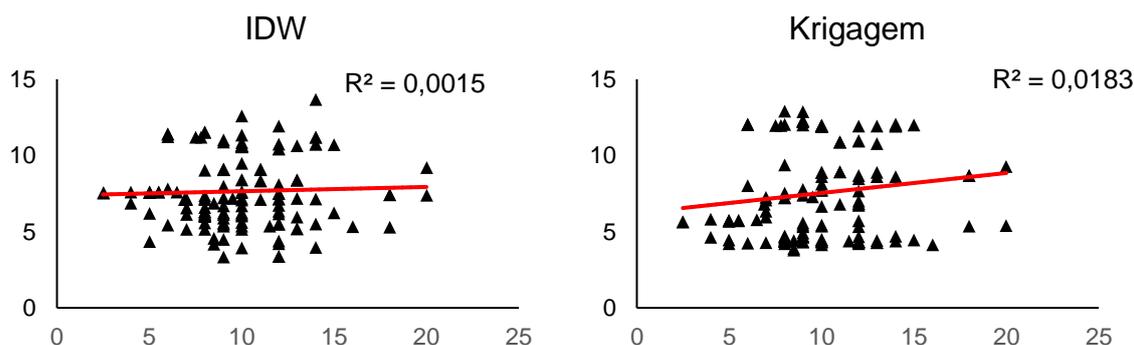
Por fim, aplicou-se o modelo proposto por Fan et al. (2014) para simulação regional da superfície de equilíbrio da água subterrânea aproximada. Tal modelo, assim como a aplicação de regressão linear múltipla, também incorpora o uso dados topográficos na estimativa da profundidade do lençol freático.

Foram fornecidos 3 dados de entrada: arquivo raster referente ao MDE SRTM de 90 m, raster com dados de transmissividade (m²/dia) obtidos por meio de registros em estudos realizados para as diferentes classes de solos encontradas na área de estudo e, raster com dados de recarga (mm/ano) obtidos a partir de imagens TRMM e da medição das vazões médias para a área de estudo.

Os resultados obtidos a partir dos quatro modelos foram comparados com valores observados em 300 mini-poços e cisternas outorgados pela SECIMA. O método cujo resultado teve maior correlação foi a regressão linear múltipla, com valor de r² igual a 0,28, seguido do modelo proposto por Fan et al. (2014), com r² igual a 0,18, da krigagem ordinária, com r² de 0,018, e da aplicação do IDW, com r² de 0,0015 (Figura 11).

Figura 11 – Correlação entre os modelos aplicados e os valores observados em poços e mini-poços outorgados.





Esta correlação baixa pode ser justificada por uma diferença dos dados utilizados. O resultado destas modelagens foi obtidos a partir da observação do nível estático do freático em poços tubulares profundos, enquanto os dados observados na outorga de mini-poços e cisternas, levam em consideração as respectivas profundidades destas estruturas de captação.

Estas profundidades não necessariamente indicariam o nível estático do freático observado nos dados referentes aos poços tubulares profundos, pois muito provavelmente, a altura das coluna de água existente em cada poço são diferentes. Entretanto, o resultado da aplicação do modelo de regressão linear múltipla se difere, sobretudo da krigagem ordinária e do IDW, pela consistência da variação espacial observada nos pontos próximos a rede de drenagem e em interflúvios.

3.3. MAPEAMENTO DOS SOLOS

A estimativa da vulnerabilidade dos aquíferos freáticos está bem relacionada com as características e a distribuição dos diferentes tipos de solos. O uso de uma base de dados consistente, em escala compatível com o tipo de análise proposta, é de grande importância para a obtenção de resultados coerentes com a situação investigada.

Inicialmente, buscou-se por uma compilação e análise da escala dos mapeamentos existentes e disponíveis para a Região Metropolitana de Goiânia, além de dados de perfis de solo e outras análises referentes a este recorte espacial.

Desta forma, optou-se pelo ajuste semi-automatizado dos limites das classes presentes no mapeamento de solos referente ao Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás. Neste mapa base constavam 26 associações de

solos, envolvendo 5 ordens distintas: Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Gleissolos e Neossolos.

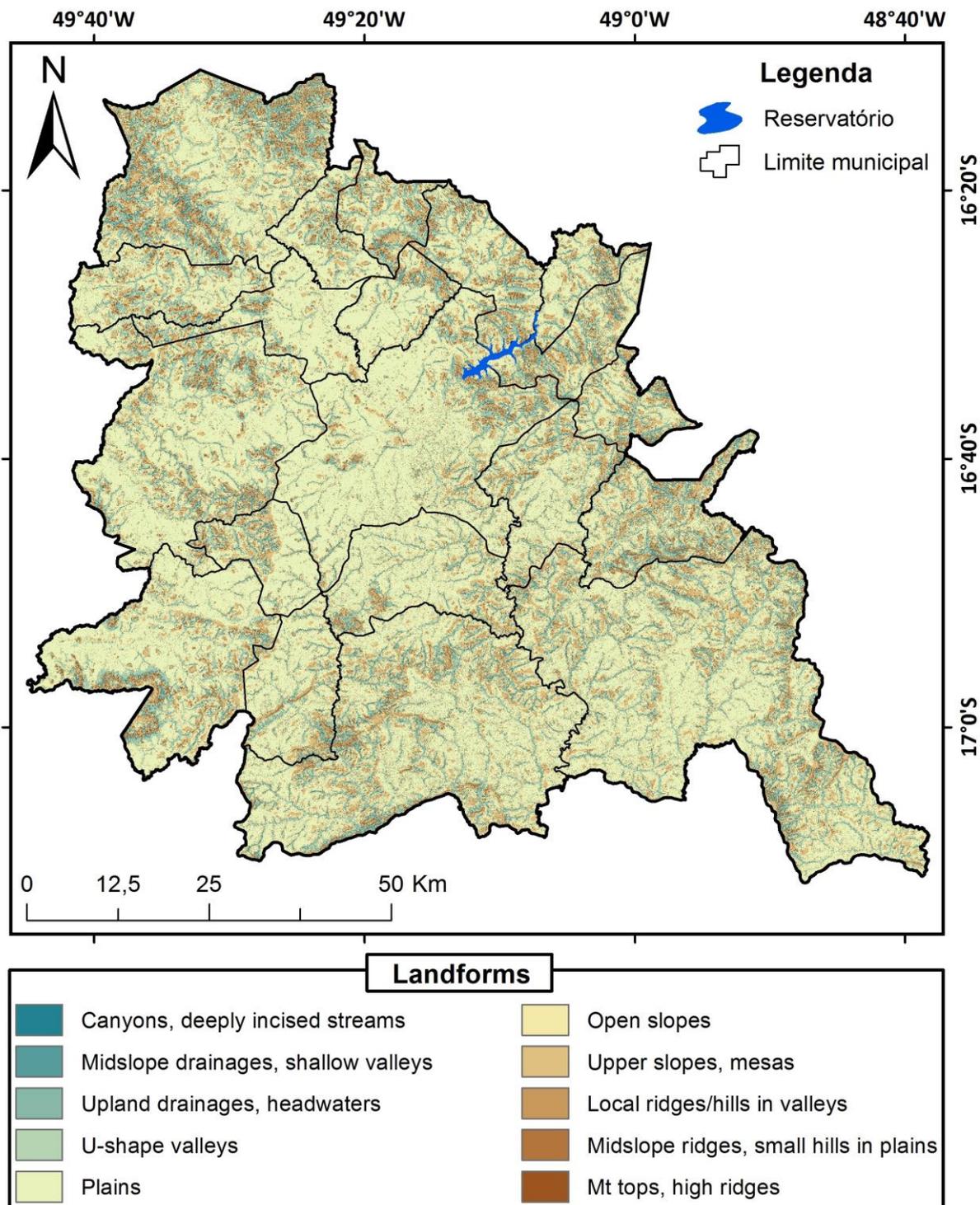
O ajuste destes limites ocorreu a partir do primeiro nível categórico, tendo por base a respectiva adoção em estudos e na literatura referente à avaliação, em escala regional, da vulnerabilidade e dos riscos de contaminação das águas subterrâneas.

A delimitação das áreas de ocorrência de cada ordem se deu a partir da premissa de que o relevo é um dos fatores determinantes de formação do solo e que a sua forma é fundamental na distribuição dos fluxos de água no seu interior.

Aplicou-se então a metodologia proposta por Weiss (2000), onde os pixels de um modelo digital de elevação são classificados de acordo com relações morfométricas estabelecidas entre os seu vizinhos, podendo assim assumir 10 formas diferentes de relevo (*Landforms*) (Figura 12).

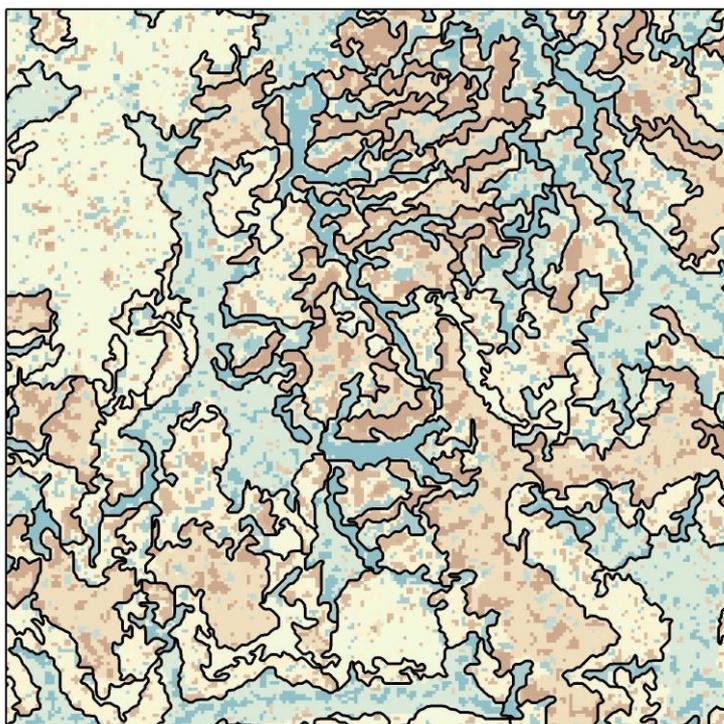
Para esta classificação, utilizou-se um raster SRTM com resolução espacial de 30 m. A aplicação do algoritmo foi realizada por meio do software SAGA 2.2.7.

Figura 12 – Formas de relevo, para a Região Metropolitana de Goiânia, geradas pelo algoritmo proposto por Weiss (2000).



O resultado, em formato matricial, foi segmentado no software SPRING e convertido para polígonos em formato vetorial (Figura 13). Para esta etapa, foi utilizado o método de crescimento de regiões, com similaridade de 0,015, área mínima de 70 pixels (correspondente a 6,25 ha) e suavização das feições resultantes.

Figura 13 – Exemplo de área segmentada.



Com auxílio do software ArcMap 10.4 foram gerados, a partir de imagem SRTM, rasters de declividade e de curvatura da vertente para os limites da Região Metropolitana de Goiânia. Para cada polígono segmentado foi calculada a média dos pixels referentes a estes dois rasters. Além deste cálculo, determinou-se também, com base no mapa de solos original, a associação predominante em cada polígono gerado.

O passo seguinte se constituiu da classificação destes polígonos de acordo com os seguintes critérios: declividade, curvatura e tipo de associação presente no mapa de referência. Para as áreas de Latossolos, foram selecionados pixels com declividades inferiores a 8%. Os polígonos com declividades superiores a 20% foram classificados como Neossolos Litólicos. Em relação aos Argissolos, foram selecionado os polígonos com declividades entre 8% e 20% em curvaturas côncavas. Os polígonos com declividades entre 8% e 20% com curvaturas convexas foram classificados como Cambissolos.

Posteriormente, verificou-se a consistência da classificação recebida por cada polígono em relação às associações presentes na legenda do mapa base. Neste momento, foi checado se cada polígono classificado estava de acordo com pelo menos uma das 3 ordens descritas. No caso de um polígono estar fora das associações indicadas no mapa base, a sua classificação foi mantida apenas nas

situações onde sua área não foi representativa dentro dos limites previamente indicados.

A última etapa de elaboração do mapa de solos se constituiu por uma última verificação da consistência das classes em relação a paisagem e a escala adotada. Neste momento, foram delimitados polígonos muito pequenos ou que extrapolavam a sua possível área de ocorrência. Um exemplo deste último caso seria a existência de polígonos de Gleissolos com extensões bem superiores às planícies de inundação de rios e de córregos.

3.4. MAPEAMENTO DO USO DO SOLO E DE USOS ESPECÍFICOS

O mapa de uso e ocupação da Região Metropolitana de Goiânia foi elaborado a partir de imagens Landsat 8 OLI referentes às orbitas-ponto 221-72, 222-71 e 222-72. Para a realização de um mapeamento na escala de 1:100.000, foi realizada uma fusão entre as bandas multiespectrais (resolução espacial de 30 metros) e a banda pancromática (resolução espacial de 15 metros) deste sensor. Em seguida, tais imagens foram segmentadas no software SPRING em polígonos com áreas superiores a 6,25 ha.

Para cada polígono, calculou-se os valores médios referentes a reflectância de cada banda espectral e do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) de imagens referentes aos períodos seco e chuvoso. A classe referente à agricultura foi classificada de acordo com as maiores diferenças de NDVI observadas em cada polígono nestes dois períodos. As demais classes foram classificadas, inicialmente, por meio do fatiamento dos intervalos referentes aos valores do NDVI e da reflectância de cada banda. Ressalta-se que nesta etapa, o intervalo espectral que melhor discriminou as classes de remanescente e de pastagem foi referente a banda do SWIR 1 (infravermelho de ondas curtas). Em relação a silvicultura, a melhor discriminação foi feita pelo infravermelho próximo.

Para a eliminação de possíveis inconsistências, realizou-se uma inspeção visual na classificação gerada. Desta forma, os polígonos equivocadamente classificados foram alterados manualmente.

Para a elaboração do mapa de risco de contaminação por atividades específicas, buscou-se pela localização de estabelecimentos com alto potencial de

contaminação do lençol freático. Foram selecionadas: indústrias (médio e grande porte), polos industriais, petroquímicas, postos de combustível, estações de tratamento de esgoto (ETEs), cemitérios e locais de deposição de resíduos sólidos.

As coordenadas de localização das indústrias de médio e grande porte foram obtidas por geocodificação de endereços e da disponibilização de camadas vetoriais por meio do portal Wikimapia. A delimitação dos polos industriais foi realizada por meio de vetorização sobre imagens de alta resolução espacial por meio do software Google Earth.

A localização das estações de tratamento de esgoto, das indústrias petroquímicas, e dos cemitérios, foi obtida a partir da verificação de geocodificação de endereços e posterior verificação em imagens de satélite. Os locais de deposição de resíduos sólidos foram obtidos a partir da base de dados do Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Estado de Goiás, disponibilizado pelo Sistema Estadual e Geoinformação (SIEG-GO).

A relação dos postos de combustíveis referente ao ano de 2016, para os municípios da Região Metropolitana de Goiânia, foi consultada por meio do portal da Agência Nacional de Petróleo (ANP). Os seus respectivos endereços foram catalogados e verificados com o auxílio de dados de malha viária e de imagens de alta resolução espacial, disponibilizadas pelo software Google Earth.

3.5. AVALIAÇÃO DE RISCOS

A avaliação da vulnerabilidade, dos riscos gerais e dos riscos específicos, foi realizada por meio de um Sistema de Informações Geográficas. Tal ferramenta permite a visualização e integração de dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido, permitindo o manuseio e a visualização de um grande volume de dados georreferenciados (imagens, vetores e tabelas). Também permite estabelecer relações entre diferentes indicadores, interpretar fenômenos e obter, por meio de modelagem espacial, cenários ambientais futuros.

A vulnerabilidade ambiental à contaminação do aquífero freático foi obtida a partir da interação entre os mapas de solos e de profundidade do lençol freático. Esta interação se deu pela multiplicação dos pesos atribuídos aos diferentes tipos de solos e das quatro classes referentes às diferentes profundidades do freático estimadas.

Para os tipos de solos, utilizou-se os valores adotados por Meira et al (2014), sendo: Latossolos (peso 0,7); Argissolos (peso 0,5); Cambissolos (peso 0,5); e Neossolos Litólicos (peso 0,4) (figura 5). Para os Gleissolos foi atribuído peso igual a 1, tendo em vista que as suas áreas de ocorrência estão relacionadas ao afloramento superficial da zona saturada.

Esta ponderação levou em consideração as características de cada tipo de solo, tendo por referência a permeabilidade, a porosidade e os valores de condutividade hidráulica médio de cada classe. Os Latossolos assumiram um peso mais elevado pelo fato da sua estrutura, composta por agregados subangulares e fracamente desenvolvidos, estarem arrançados de tal forma com que haja entre eles um grande espaço poroso, proporcionando assim uma alta permeabilidade mesmo quando muito argilosos (LEPSCH, 2013). Argissolos e Cambissolos assumiram o mesmo peso por terem comportamentos semelhantes. Já os Neossolos Litólicos, por possuírem permeabilidade mais baixa, foram ponderados com o menor valor.

Em relação a profundidade lençol freático, a ponderação foi realizada seguindo os seguintes valores: 1 para profundidades entre 0 a 5 metros; 0,8 para profundidades entre 5 a 10 metros; 0,6 para profundidades entre 10 a 20 metros; 0,5 para profundidades acima de 20 metros.

O critério utilizado foi a distância entre a superfície e o limite superior da zona saturada. Desta forma, uma carga contaminante emitida por uma determinada fonte a 5 metros do freático, nas mesmas condições de solo, tornaria tal ponto mais vulnerável do que em um outro ponto com carga contaminante emitida a 15 metros do freático.

A etapa seguinte se constituiu da categorização do uso do solo por potencial de risco. Tal procedimento se orientou pela presença, diversificação e intensidade de cargas contaminantes nas atividades antrópicas e coberturas vegetais discriminadas no mapa de uso do solo obtido por classificação de imagens satelitárias. Para este estudo, adotou-se os seguintes potenciais de risco: muito baixo, para áreas de vegetação remanescente; baixo, para pastagens; alto, para agricultura, e; muito alto, para áreas urbanas e outros usos identificados (mineração e malha viária, por exemplo).

Em seguida, realizou-se a integração entre o mapa de vulnerabilidade com o mapa de potencial de risco para a obtenção do mapa de risco geral da perda da

qualidade ambiental, causada pelo contato da carga contaminante com o lençol freático (Quadro 3).

Quadro 3 – Categorização da vulnerabilidade e do potencial de risco para determinação do risco geral de perda da qualidade ambiental do freático.

Vulnerabilidade	Potencial de Risco	Risco geral
Muito alta	Muito alto	Muito alto
Muito alta	Alto	Muito alto
Muito alta	Baixo	Médio
Muito alta	Muito baixo	Médio
Alta	Muito alto	Muito alto
Alta	Alto	Alto
Alta	Baixo	Médio
Alta	Muito baixo	Médio
Média	Muito alto	Alto
Média	Alto	Alto
Média	Baixo	Médio
Média	Muito baixo	Médio
Baixa	Muito alto	Médio
Baixa	Alto	Médio
Baixa	Baixo	Baixo
Baixa	Muito baixo	Baixo
Muito baixa	Muito alto	Médio
Muito baixa	Alto	Médio
Muito baixa	Baixo	Baixo

Este mapa foi gerado com o propósito de, a partir da combinação entre fatores naturais associados sobretudo a características dos solos e distância entre superfície e zona saturada, e a distribuição zonal das diferentes atividades representadas pelo mapa de uso do solo, entender quais as áreas do aquífero freático, dentro dos limites da Região Metropolitana de Goiânia, estão mais susceptíveis a uma alteração das suas características físico-químicas, que possam comprometer tanto funções ecológicas quanto comprometer serviços essenciais a população, tais como o abastecimento de água.

Com propósito semelhante, foi feito também um mapa de riscos específicos a partir da interação entre os dados de localização das diferentes atividades

potencialmente poluidoras previamente catalogadas em formato vetorial e o mapa de vulnerabilidade.

Para a criação deste mapa, aplicou-se um filtro Kernel para a determinação das regiões com as maiores densidades de indústrias, postos de combustível, cemitérios, aterros sanitários, petroquímicas, polos industriais, e estações de tratamento de esgoto (ETEs). A partir do resultado obtido, criou-se um mapa categorizado em cinco classes: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. Realizou-se então a interação entre estas cinco classes de densidade e as cinco classes de vulnerabilidade para a obtenção do risco de contaminação do freático por atividades específicas (Quadro 4).

Quadro 4 – Cruzamento entre densidade de atividade e vulnerabilidade para a obtenção de um risco de contaminação por atividades específicas.

		Densidade de atividades de riscos				
		Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
Vulnerabilidade	Muito baixa	Muito baixa	Muito baixa	Baixa	Baixa	Moderada
	Baixa	Muito baixa	Baixa	Baixa	Moderada	Moderada
	Moderada	Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Alta
	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Muito alta
	Muito alta	Moderada	Alta	Alta	Muito alta	Muito alta

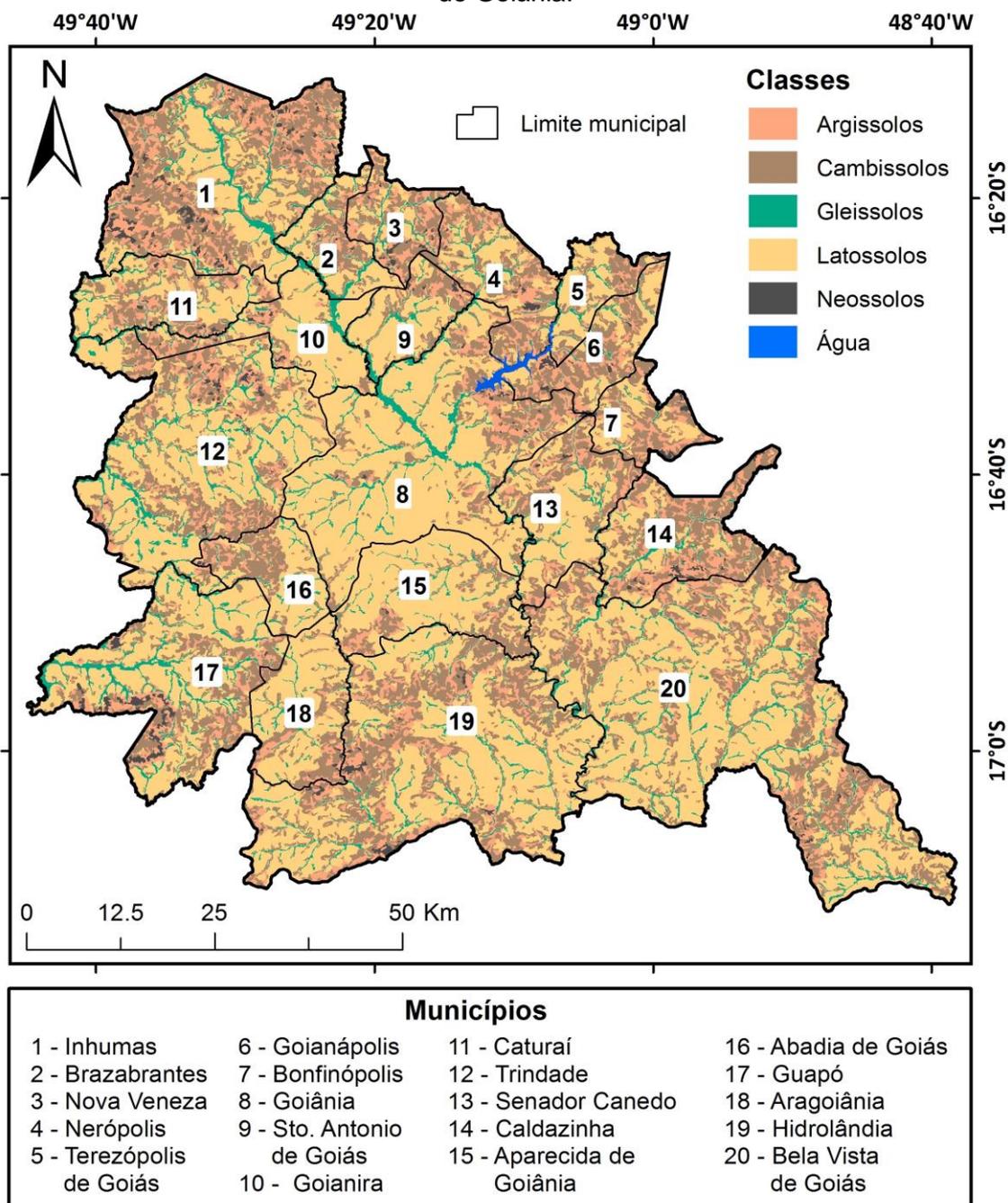
Por fim, relacionou-se e efetuou-se uma análise sobre a localização dos pontos de outorga de água subterrânea (mini-poços e cisternas) e de poços tubulares profundos com a distribuição espacial das classes de riscos geral de perda da qualidade ambiental e de riscos específico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. SOLOS

O refinamento do mapa de solos (Figura 14) permitiu uma melhor espacialização da ocorrência das classes de solos referentes ao primeiro nível categórico.

Figura 14 – Refinamento do mapa de solos correspondente à Região Metropolitana de Goiânia.



Ressalta-se que o ajuste dos limites neste mapa foi feito apenas com base nas ordens presentes no mapa de referência. Sugere-se que para uma análise em escala mais detalhada, sejam tomados como referência uma quantidade maior de dados de campo obtidos por meio de análises de perfis de solo e de topossequências.

A classe referente aos Latossolos permaneceu predominante dentro dos limites estudados, cobrindo uma área de aproximadamente 385.00 ha. A área ocupada pelas outras classes corresponderam a: Cambissolos (187.23 ha); Argissolos (100.54 ha); Gleissolos (48.33 ha) e; Neossolos Litólicos (8.99 ha).

A presença desta variedade de solos na área de estudo reflete a existência de diferentes ambientes para a percolação de cargas contaminantes.

Em relação aos Latossolos, estes são solos bem intemperizados, extremamente ácidos, com baixa saturação por bases, e bem drenados. As principais subordens encontradas são o Latossolo Vermelho e o Latossolo Vermelho-Amarelo, diferenciados sobretudo pela quantidade variável de óxido de ferro e de alumínio. O índice físico de condutividade hidráulica da zona não saturada desta classe, determinados através dos ensaios de infiltração *in situ*, varia entre 10^{-6} e 10^{-5} m/s (CAMPOS et al., 2003).

Os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos e pouco profundos, com ocorrência predominante nas áreas mais declivosas, com predomínio em vertentes convexas. A associação do relevo movimentado com os valores de condutividade hidráulica baixos, em profundidades maiores que 150 cm, resultam em um baixo potencial de recarga (CAMPOS et al., 2003).

Os Argissolos em geral também são solos bem intemperizados, apresentando horizonte B de acúmulo de argila. Compreendem muitos solos de formação intermediária para outras ordens, como a do Latossolos. A sua ocorrência se dá em uma grande variedade de relevos, sendo que quando associados a Latossolos, eles estão presentes em terrenos mais declivosos (LEPSCH, 2011).

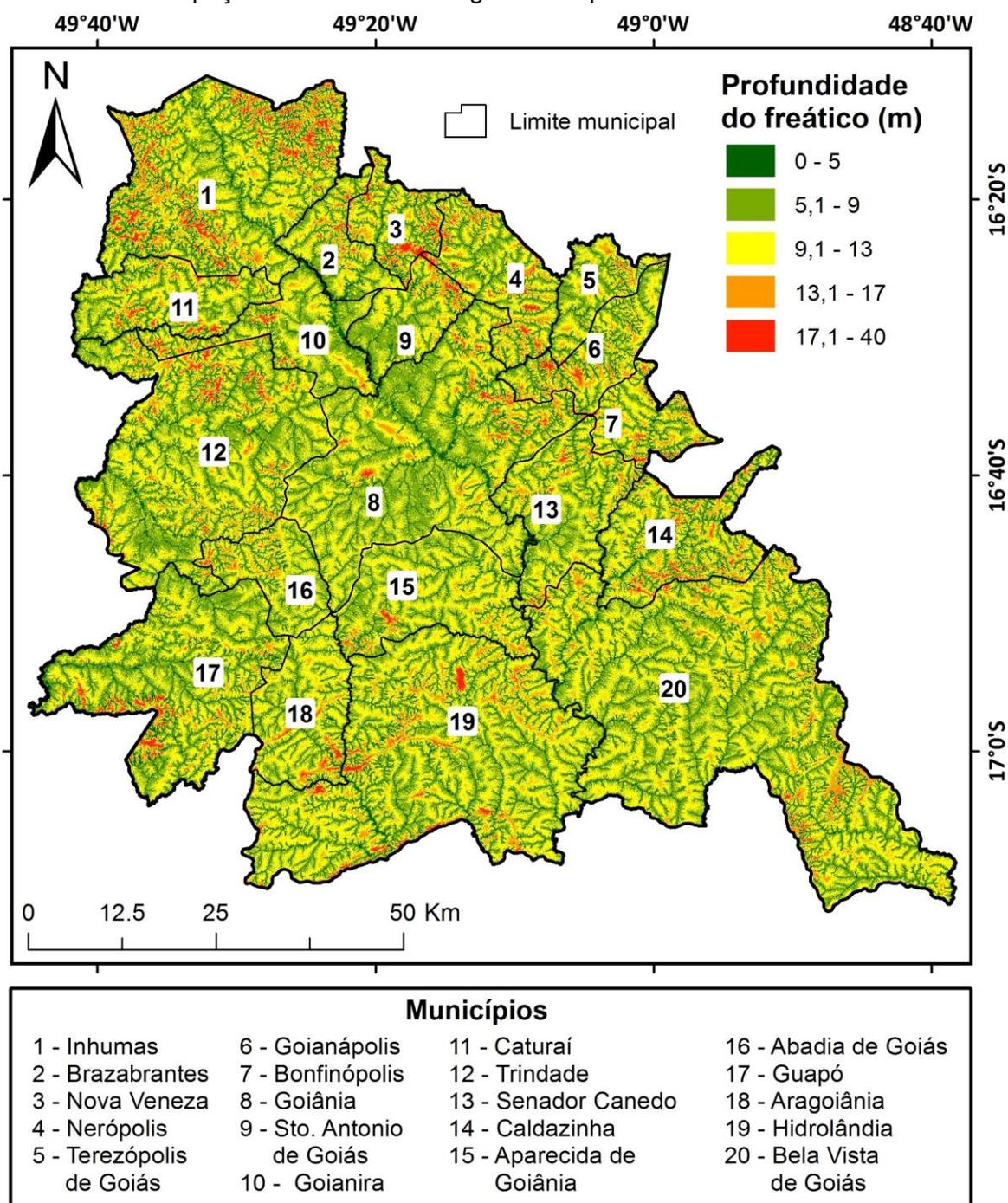
Os Neossolos possuem pouca ou nenhuma evidência de horizontes pedogenético subsuperficiais. A subordem Neossolo Litólico em geral é encontrada em áreas de declividade acentuada, com baixas profundidades e alta pedregosidade.

Os Gleissolos são caracterizados por estarem localizados em áreas úmidas, tais como planícies fluviais. São encontrados em condições de saturação, em contato com o lençol freático (LEPSCH, 2011).

4.2. PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO

O mapa de profundidade do freático gerado por regressão linear múltipla, a partir do nível estático observado em poços tubulares profundos e dos parâmetros morfométricos obtidos por meio de imagem SRTM, está representado na Figura 15.

Figura 15 – Estimativa da profundidade do freático com base no nível estático (NE) dos poços localizados na Região Metropolitana de Goiânia.



As maiores profundidades foram encontradas nos topos de morros ou nas áreas mais elevadas de extensos interflúvios planos ou suavemente ondulados. As áreas situadas em planícies fluviais foram caracterizadas com profundidades inferiores a 5 m.

Observa-se também a existência áreas edificadas em regiões com baixas profundidades (Tabela 1). Nestas áreas, a ocorrência de impactos ao aquífero freático é mais intensa e concentrada, representando assim um elevado risco á qualidade das águas subterrâneas.

Tabela 1 – Relação entre áreas edificadas dos municípios pertencentes a Região Metropolitana e Goiânia e as respectivas médias de profundidade de lençol freático.

Município	Área Total (ha)	Área Edificada (ha)	Área Edificada (%)	Prof. Min. (m)	Prof. Máx. (m)	Prof. Média (m)
Abadia de Goiás	14727,92	532,01	3,61	0,00	13,70	9,30
Aparecida de Goiânia	29112,21	12879,36	44,24	0,00	16,80	9,08
Aragoiânia	21736,17	412,14	1,90	0,00	15,86	9,56
Bela Vista de Goiás	125359,66	975,87	0,78	0,19	18,77	8,89
Bonfinópolis	12137,55	332,96	2,74	0,00	16,81	9,37
Brazabrantes	12453,02	151,74	1,22	2,35	13,13	8,67
Caldazinha	25231,02	99,76	0,40	0,00	15,91	10,39
Caturaí	20652,41	127,26	0,62	2,57	12,22	8,71
Goianápolis	16112,10	290,06	1,80	0,00	18,76	10,93
Goiânia	73757,92	31032,15	42,07	0,00	27,45	8,70
Goianira	20198,90	1570,09	7,77	0,00	14,25	8,83
Guapó	51561,46	490,15	0,95	0,00	13,74	9,15
Hidrolândia	94272,63	1085,94	1,15	0,00	15,70	8,92
Inhumas	61295,74	1308,33	2,13	0,00	15,62	9,10
Nerópolis	20427,30	721,23	3,53	0,00	21,26	9,14
Nova Veneza	12277,35	249,46	2,03	0,00	14,26	9,54
Santo Antônio de Goiás	13465,46	294,36	2,19	2,04	14,64	7,61
Senador Canedo	24539,43	3594,21	14,65	0,00	28,91	9,24
Terezópolis de Goiás	10811,74	200,83	1,86	0,00	15,43	9,38
Trindade	71174,58	4014,32	5,64	0,00	21,93	9,40

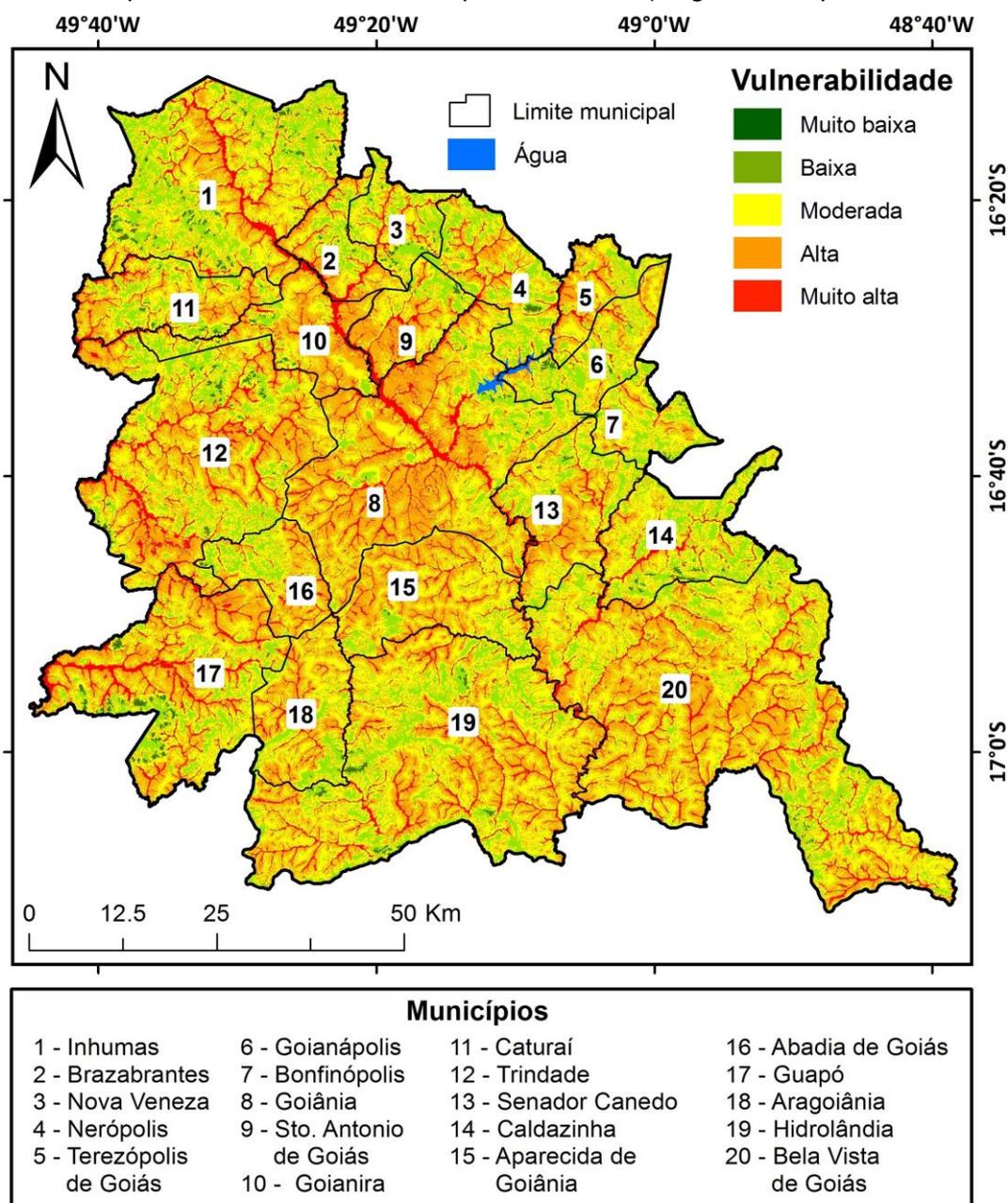
Entretanto, ressalta-se que pelo fato da estimativa ter sido realizada por meio de parâmetros extraídos de um modelo digital de superfície, alguns valores de profundidade encontram-se subestimados, sobretudo nestas áreas edificadas. Isto ocorre por dois fatores: o rebaixamento do lençol freático ao longo do tempo, e o fato dos parâmetros terem sido extraídos a partir de valores de superfície referentes ao

topo de árvores e de edifícios, enquanto a melhor representação do relevo seria por meio de um modelo digital de terreno.

4.3. VULNERABILIDADE AMBIENTAL

O mapa de vulnerabilidade ambiental (Figura 16) foi obtido a partir da integração entre a profundidade do lençol freático e as distintas classes de solo presentes na área de estudo. Este mapa permitiu a indicação de áreas cujas características naturais da paisagem favorecem ou não a percolação de poluentes.

Figura 16 – Mapa de vulnerabilidade do aquífero freático (Região Metropolitana de Goiânia).



As maiores vulnerabilidades foram encontradas principalmente nas áreas de Gleissolos e de Latossolos. Os primeiros, caracterizados pela saturação de água, localizam-se em áreas de descarga do freático. Já os segundos, são solos bem drenados, com alta permeabilidade, e situados em áreas planas que tendem a favorecer o movimento vertical da carga contaminante imposta. Solos mal drenados, com baixa permeabilidade e estabelecidos em áreas com freático profundo, foram avaliados com vulnerabilidades mais baixas.

Tabela 2 – Área (ha) correspondente às classes de vulnerabilidade.

Vulnerabilidade	Área (ha)	Área (%)
Muito baixa	6.164,97	0,84
Baixa	114.884,26	15,77
Moderada	271.938,73	37,34
Alta	268.638,90	36,88
Muito Alta	66.602,71	9,14

A avaliação da vulnerabilidade é um importante subsídio para a adoção de práticas ambientalmente sustentáveis. Nas áreas com alta vulnerabilidade, a paisagem possui uma série de características favoráveis ao surgimento de processos que modificarão o equilíbrio de determinados sistemas, levando assim, ao aparecimento de áreas ambientalmente degradadas.

Um exemplo se refere a extensão dos Latossolos nos limites da Região Metropolitana de Goiânia, classificadas com alta vulnerabilidade e, ao mesmo tempo, dotadas de alta aptidão agropecuária e alto potencial de adensamento em áreas urbanas. A elaboração de um mapa de uso e cobertura para o ano de 2016 permitiu verificar esta tendência de ocupação.

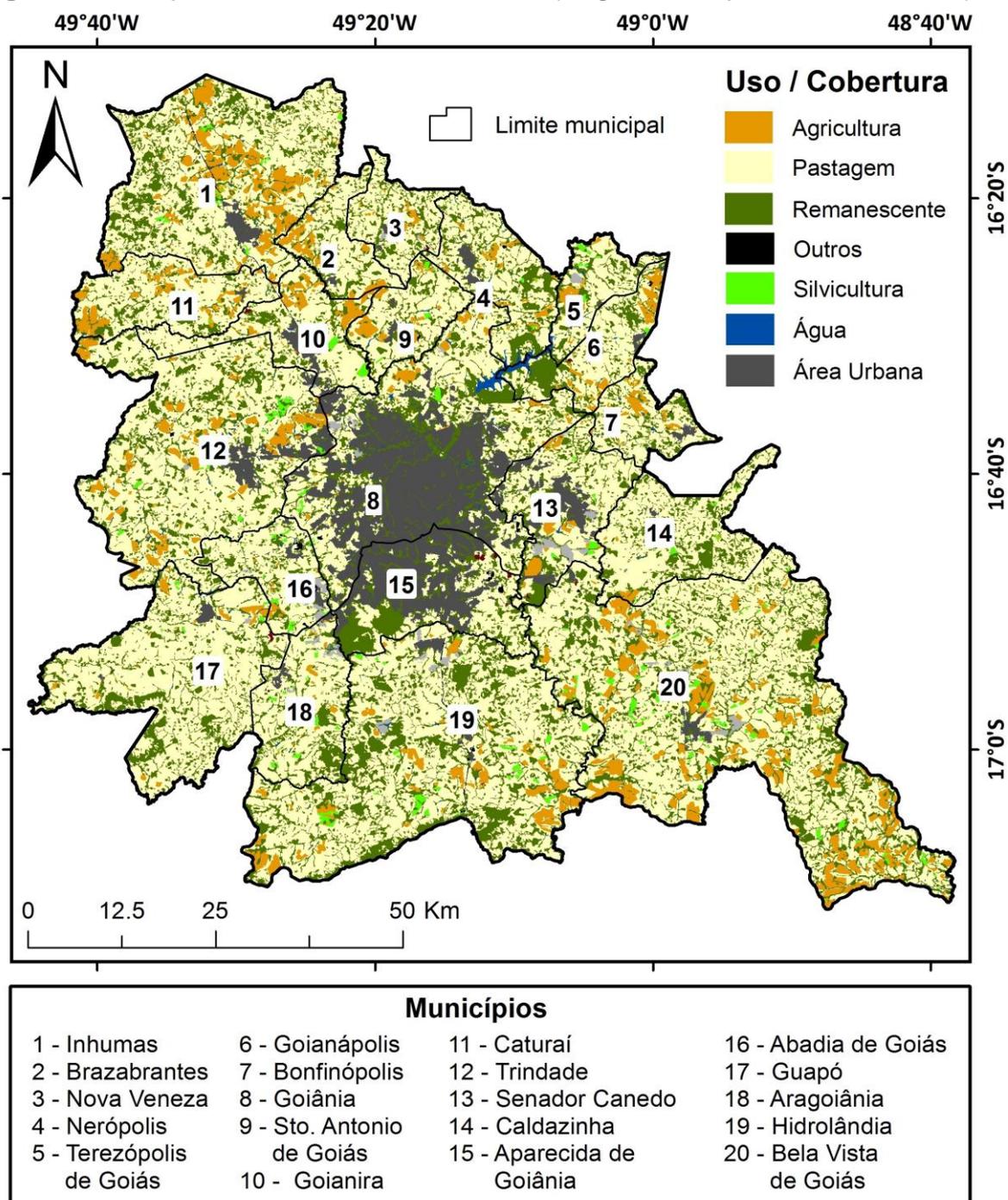
4.4. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

De acordo com este mapa (Figura 17), também foi observado um predomínio de pastagens na maioria dos municípios estudados. Esta classe foi encontrada em diferentes tipos de ambientes, tendo em vista a sua baixa restrição em relação às exigências de solo e a manejos mais complexos.

As áreas urbanizadas e com práticas agrícolas, situadas predominantemente em terrenos planos e cobertos por Latossolos, foram observadas como a segunda e a terceira atividade com maior extensão de área dentro dos limites estudados.

Como mencionado anteriormente, a distribuição espacial destas duas atividades é orientado sobretudo por limitações impostas pela declividade, por solos de baixa fertilidade, susceptíveis a degradação, e pela influência da dinâmica socioeconômica existente na região.

Figura 17 – Mapa de uso e cobertura da terra (Região Metropolitana de Goiânia).



A partir do mapa de uso e cobertura, atribuiu-se diferentes potenciais de risco para cada classe discriminada. Estes potenciais foram atribuídos de acordo com a associação entre cada tipo de uso e as suas respectivas cargas contaminantes por eles emitidas.

A presença insignificante de fontes poluidoras em remanescentes de vegetação natural atribuiu a estas áreas um potencial muito baixo de contaminação. Nestas regiões predominam o tipo de poluição natural, não associada diretamente a atividade humana, e causada principalmente pela decomposição de vegetais e de animais mortos (DERISIO, 2012).

O tipo do manejo associado às diferentes intensidades de aplicação de pesticidas e fertilizantes em áreas agrícolas, e aliado a presença de excrementos de animais em áreas pastoris promoveu, respectivamente, classificações em alto e baixo potencial de risco.

As áreas urbanizadas, junto com as áreas referentes aos outros usos (indústrias, mineração e malha viária), foram categorizadas com potencial de risco muito alto devido à grande concentração de atividades potencialmente poluidoras.

Este grau se justificou principalmente pela quantidade de resíduos gerados em atividades industriais, comerciais e residenciais. Estes correspondem a uma série de efluentes e cargas com alto potencial de contaminação ao freático. São potencializados muitas vezes pela falta de saneamento ou coleta adequada de resíduos, redes de esgoto com cobertura ou manutenção deficiente, além da possibilidade do escoamento de contaminantes via galerias pluviais e posterior contato com o solo por meio de poços ou trincheiras de infiltração.

4.5. RISCO GERAL DE PERDA DA QUALIDADE AMBIENTAL

A partir desta categorização e sua respectiva interação com o mapa de vulnerabilidade, buscou-se determinar as áreas com os riscos de perda da qualidade ambiental do aquífero freático mais elevados (Figura 18).

Figura 18 – Mapa de risco geral de perda da qualidade ambiental. (Região Metropolitana de Goiânia)

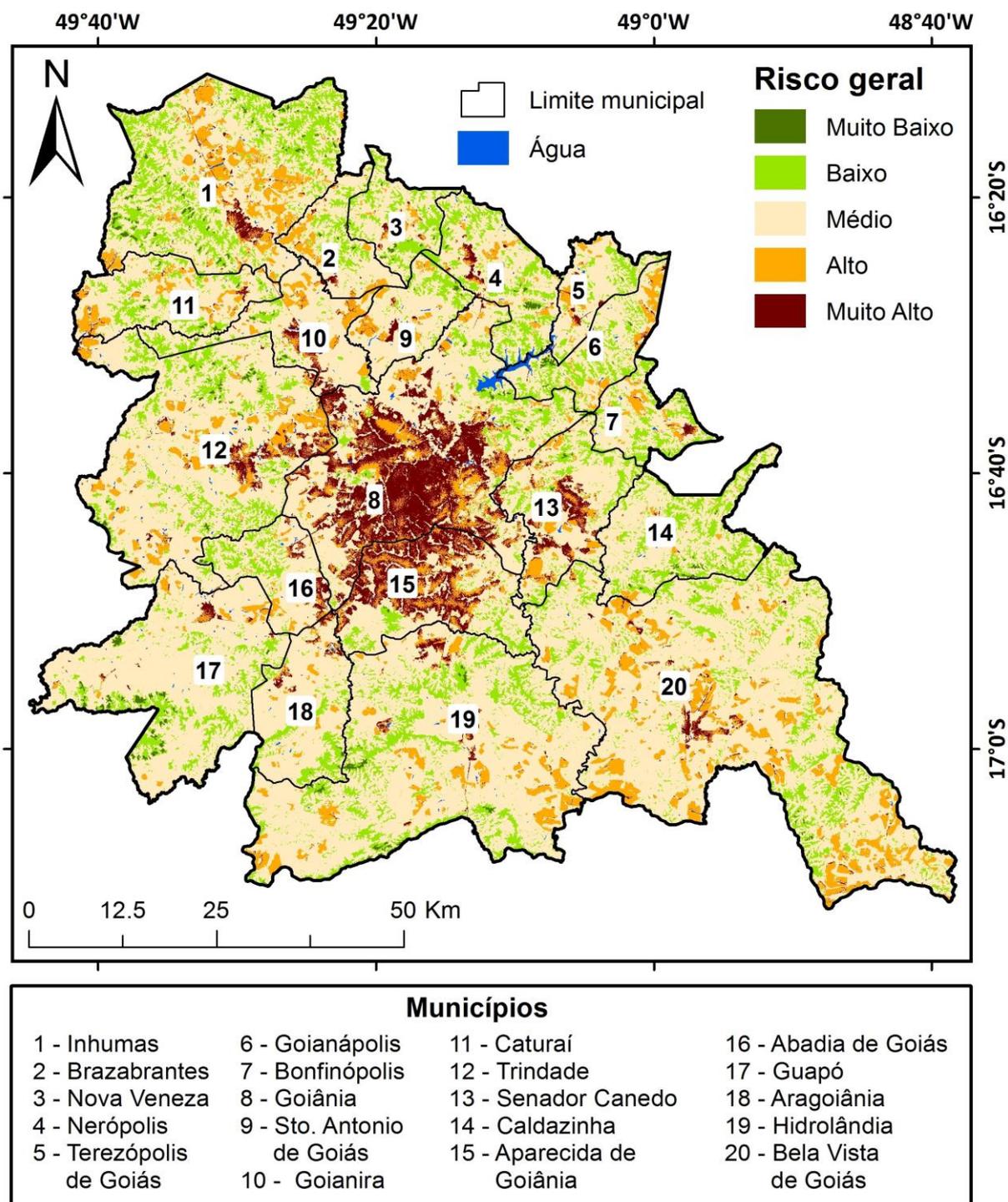


Tabela 3 –Vulnerabilidade, potencial de risco e risco geral da perda da qualidade ambiental por classes de uso.

Uso/Cobertura	Vulnerabilidade	Potencial de Risco	Risco Geral	Área (ha)	Área (%)
Agricultura	Muito baixa	Alto	Médio	4,48	0,001
Agricultura	Baixa	Alto	Médio	2354,77	0,324
Agricultura	Média	Alto	Alto	20439,44	2,816
Agricultura	Alta	Alto	Alto	28246,92	3,891
Agricultura	Muito alta	Alto	Muito alto	2432,45	0,335
Área Urbana	Muito baixa	Muito alto	Médio	8,22	0,001
Área Urbana	Baixa	Muito alto	Médio	1593,23	0,219
Área Urbana	Média	Muito alto	Alto	19307,30	2,660
Área Urbana	Alta	Muito alto	Muito alto	36215,23	4,989
Área Urbana	Muito alta	Muito alto	Muito alto	3236,37	0,446
Mineração	Muito baixa	Muito alto	Médio	11,09	0,002
Mineração	Baixa	Muito alto	Médio	68,47	0,009
Mineração	Média	Muito alto	Alto	149,55	0,021
Mineração	Alta	Muito alto	Muito alto	85,77	0,012
Mineração	Muito alta	Muito alto	Muito alto	17,25	0,002
Mosaico de ocupação	Baixa	Muito alto	Médio	193,78	0,027
Mosaico de ocupação	Média	Muito alto	Alto	1885,42	0,260
Mosaico de ocupação	Alta	Muito alto	Muito alto	2459,00	0,339
Mosaico de ocupação	Muito alta	Muito alto	Muito alto	264,41	0,036
Outros	Muito baixa	Muito alto	Médio	0,03	0,000
Outros	Baixa	Muito alto	Médio	111,20	0,015
Outros	Média	Muito alto	Alto	639,26	0,088
Outros	Alta	Muito alto	Muito alto	573,89	0,079
Outros	Muito alta	Muito alto	Muito alto	74,57	0,010
Pastagem	Muito baixa	Baixo	Baixo	1596,03	0,220
Pastagem	Baixa	Baixo	Baixo	69801,52	9,616
Pastagem	Média	Baixo	Médio	171639,02	23,645
Pastagem	Alta	Baixo	Médio	155308,85	21,395
Pastagem	Muito alta	Baixo	Médio	30594,72	4,215
Remanescente	Muito baixa	Muito baixo	Muito baixo	4544,44	0,626
Remanescente	Baixa	Muito baixo	Baixo	40297,72	5,551
Remanescente	Média	Muito baixo	Médio	54603,28	7,522
Remanescente	Alta	Muito baixo	Médio	41380,83	5,701
Remanescente	Muito alta	Muito baixo	Médio	28534,69	3,931
Silvicultura	Baixa	Alto	Médio	443,78	0,061
Silvicultura	Média	Alto	Alto	2950,00	0,406

Os riscos mais baixos foram obtidos nas áreas de vegetação nativa. Tais remanescentes cumprem a função de preservar a qualidade ambiental do freático, sobretudo em áreas próximas aos cursos hídricos, onde o freático é encontrado próximo a superfície.

Foi verificado que 3,93% da área total da Região Metropolitana de Goiânia está coberta por remanescentes de vegetação nativa em áreas de vulnerabilidade ambiental do lençol freático muito alta.

Estas áreas estão relativamente protegidas, tendo em vista que a cobertura vegetal está cumprindo o papel de proteger o aquífero freático da potencial ação de cargas contaminantes. Entretanto, apesar da presença de vegetação nativa na superfície, o movimento lateral das águas nestes aquíferos podem comprometer a sua qualidade ambiental, sobretudo pela sua respectiva localização em áreas de descarga ou nas porções inferiores de vertentes.

As pastagens, predominantes na Região Metropolitana de Goiânia e localizadas principalmente nas áreas de Cambissolos e Argissolos, assumiram um risco moderado. A maior porcentagem deste uso no limites estudados ocorrem em áreas de vulnerabilidade média e alta (respectivamente, 23,64% e 21,39%).

Os principais danos deste uso a perda da qualidade ambiental do lençol freático são provenientes da percolação de contaminantes provenientes de adubação nitrogenada e dos excrementos dos animais. Alguns impactos causados por esta perda da qualidade ambiental se dão sobretudo por doenças ou até mesmo a morte de animais, causadas por poluição química, além da contaminação do leite produzido nestas regiões (DERISIO, 2012).

Em relação a agricultura, observa-se que esta atividade corresponde às áreas com risco de perda da qualidade ambiental alto ou muito alto. Os impactos ao freático surgem do cultivo agrícola com produtos agroquímicos, da presença de lagoas de efluentes, do despejo de efluentes no solo e da ausência do tratamento adequado do esgoto gerado pelas propriedades. Alguns danos socioambientais também ocorrem por meio da contaminação de frutas e hortaliças pela água utilizada na irrigação.

Esta situação ainda é agravada pelo fato de parte do abastecimento domiciliar, assim como na classe de pastagem, ser realizado por meio da captação de águas subterrâneas.

O risco geral mais elevado foi encontrado nas áreas urbanizadas, localizadas principalmente em Gleissolos (lençol freático pouco profundo) e Latossolos (áreas com permeabilidade mais elevada). Tais áreas representam aproximadamente 5% da Região Metropolitana de Goiânia e estão localizadas nas áreas com maior densidade de poços destinados ao abastecimento urbano.

Estas áreas urbano-industriais representam uma profunda modificação humana da superfície, da atmosfera e do ecossistema terrestre, caracterizada também por impactos intensivos e concentrados no que diz respeito à respectiva perda da qualidade ambiental (DREW, 1983).

A concentração e variedade de fontes poluidoras em ambientes urbanos é um importante fator a ser considerado no disciplinamento do uso do solo e na instalação e respectiva manutenção da infraestrutura referente ao saneamento.

Foster (2000) destaca algumas atividades capazes de gerar carga contaminante no subsolo, tais como: falta de esgoto, vazamento de esgoto, presença de lagoas de oxidação de águas residuais, despejo de esgoto no solo, lixiviação de aterros sanitários e lixões, presença tanques de armazenamento e tubulações de combustível e valas de drenagem em rodovias.

O autor também afirma que pequenos empreendimentos industriais e comerciais, como por exemplo oficinas mecânicas e outros, sem a devida fiscalização e gestão de seus resíduos e efluentes, podem causar expressivos impactos na qualidade da água subterrânea.

Além do comprometimento da qualidade da água disponível em poços rasos escavados (cisternas), o perigo de contaminação freático reflete também no comprometimento da qualidade da água disponível em poços tubulares profundos. Isto ocorre devido a aspectos construtivo e de manutenção inadequados que possibilitam a ligação direta entre a superfície e as águas subterrâneas rasas e profundas (CAMPOS et al., 2003).

As tabelas 4, 5 e 6 mostram a distribuição por classes de vulnerabilidade, de uso, e de risco geral de perda da qualidade ambiental, dos mini-poços e cisternas outorgados pela SECIMA até o ano de 2015.

Tabela 4 –Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de vulnerabilidade.

Vulnerabilidade	Quantidade
Muito Baixa	0
Baixa	23
Média	618
Alta	1522
Muito Alta	65

Observa-se um número elevado de mini-poços e cisternas instaladas em áreas de alta vulnerabilidade. Estas estruturas por estarem tanto em áreas de solos hidromórficos, quanto em solos de alta condutividade hidráulica, possuem um elevado potencial de contaminação. Ressalta-se a importância de inspeções e da respectiva manutenção destes pontos de modo que nestes locais a qualidade ambiental do aquífero freático não seja comprometida. De acordo com a tabela 5, observa-se também que mais de 90% dos pontos outorgados estão em área urbana.

Tabela 5 – Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de uso.

Uso do Solo	Quantidade
Agricultura	5
Área Urbana	2035
Mineração	3
Mosaico de ocupação	4
Outros	1
Pastagem	119
Remanescente	61

De acordo com os dados expressos na tabela 4 e tendo em vista a elevada presença de mini-poços e cisternas em áreas com alto risco de perda de qualidade ambiental, nota-se que a qualidade da captação nestes pontos pode estar comprometida. Desta forma, a contaminação e poluição bacteriana das águas subterrâneas, causadas por diferentes atividades e usos do solo, representa também um perigo potencial a saúde pública, haja vista a possibilidade do aumento do número microorganismos patógenos e demais cargas contaminantes nestas áreas.

Tabela 6 – Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de risco geral de perda da qualidade ambiental.

Risco Geral	Quantidade
Muito Baixo	0
Baixo	11
Média	181
Alto	583
Muito Alto	1453

As tabelas 7, 8 e 9 mostram esta distribuição para poços tubulares profundos catalogados na base de dados da Superintendência de Geologia e Mineração (SGM) e do Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM), onde a situação encontrada é semelhante a de mini-poços e cisternas.

Entretanto, nestes pontos a captação da água é feita diretamente de aquíferos profundos, que no caso da Região Metropolitana de Goiânia estão confinados em sua maioria por rochas ígneas e metamórficas.

Tabela 7 –Quantidade de poços tubulares profundos por classe de vulnerabilidade.

Vulnerabilidade	Quantidade
Muito Baixa	-
Baixa	26
Média	279
Alta	534
Muito Alta	114

Tabela 8 –Quantidade de poços tubulares profundos por classe de uso.

Uso do Solo	Quantidade
Agricultura	13
Área Urbana	645
Mineração	-
Mosaico de ocupação	6
Outros	6
Pastagem	126
Remanescente	150

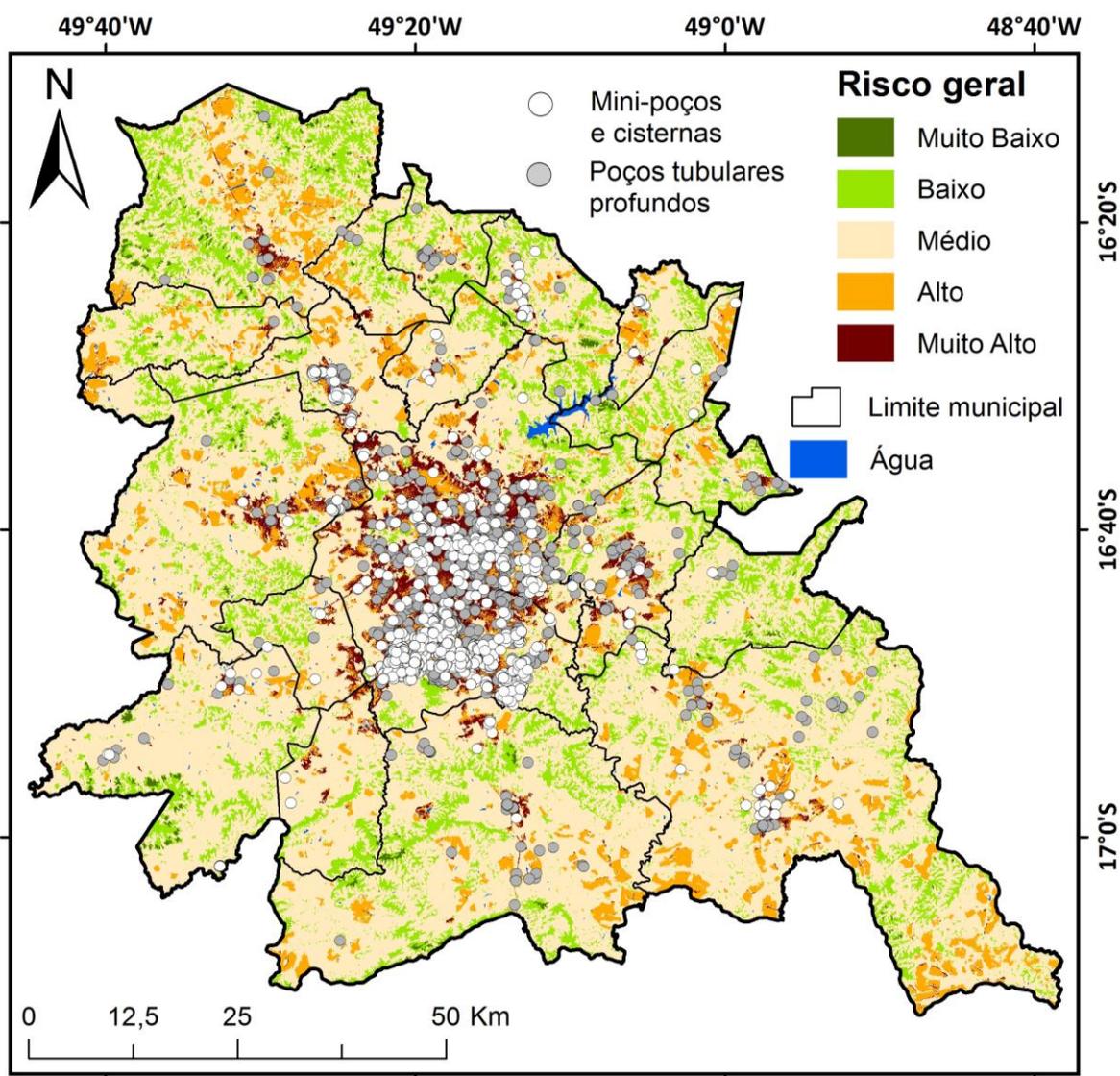
Tabela 9 –Quantidade de poços tubulares profundos por classe de risco geral de perda da qualidade ambiental

Risco Geral	Quantidade
Muito Baixo	-
Baixo	17
Média	268
Alto	189
Muito Alto	472

Outro ponto a ser destacado é o comportamento horizontal do fluxo de água dentro destes aquíferos freáticos. Tal processo favorece o deslocamento de contaminantes para outras áreas, promovendo assim a possível contaminação de corpos hídricos e de regiões com coberturas mais preservadas.

A Figura 19 mostra a distribuição espacial dos mini-poços, cisternas e poços tubulares profundos e suas respectivas classes de risco geral de perda da qualidade ambiental dentro dos limites da Região Metropolitana de Goiânia.

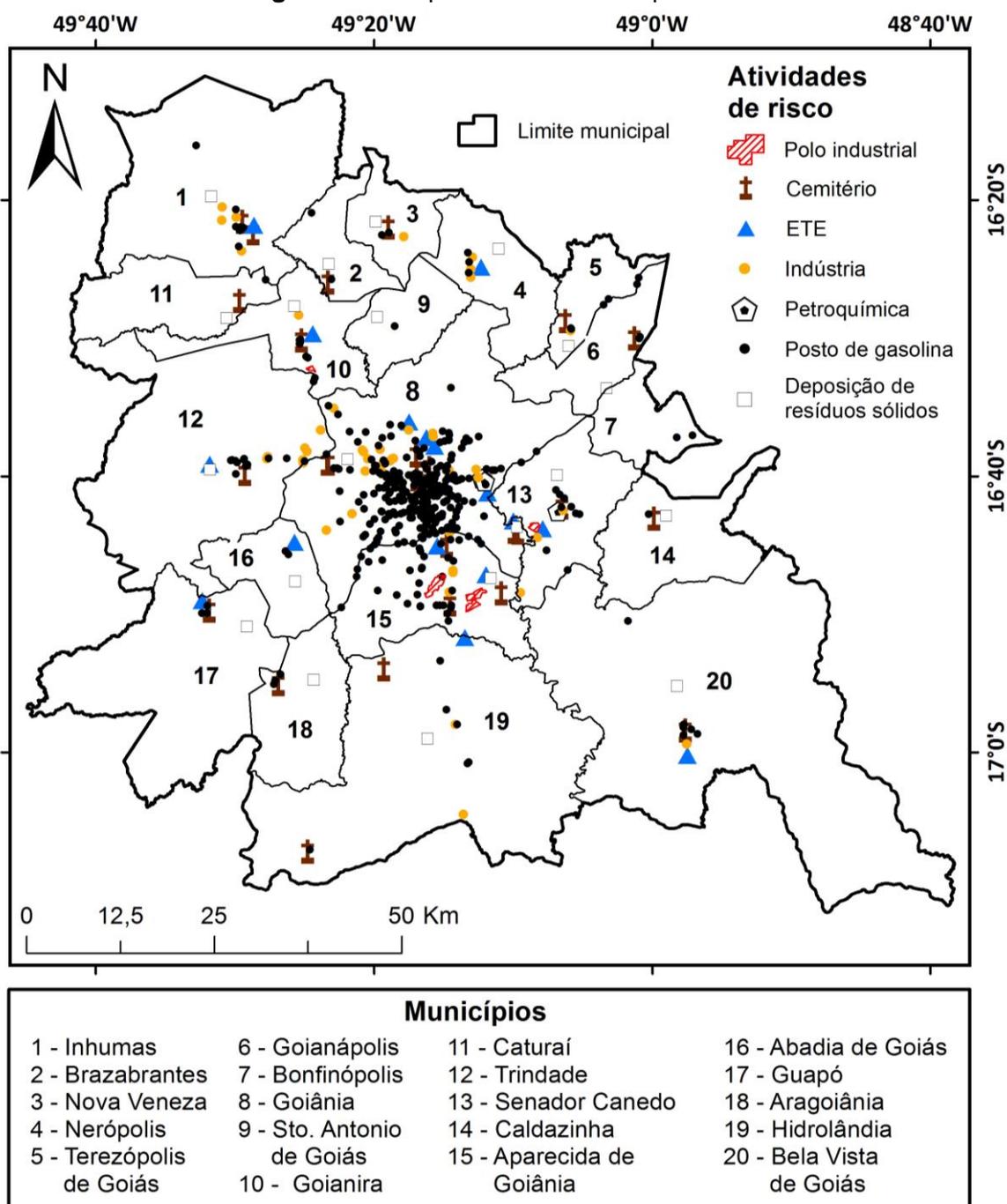
Figura 19 – Localização de mini-poços, cisternas e poços tubulares profundos nas classes referentes ao risco geral de perda da qualidade ambiental.



4.6. RISCO DE PERDA DA QUALIDADE AMBIENTAL POR ATIVIDADES ESPECÍFICAS

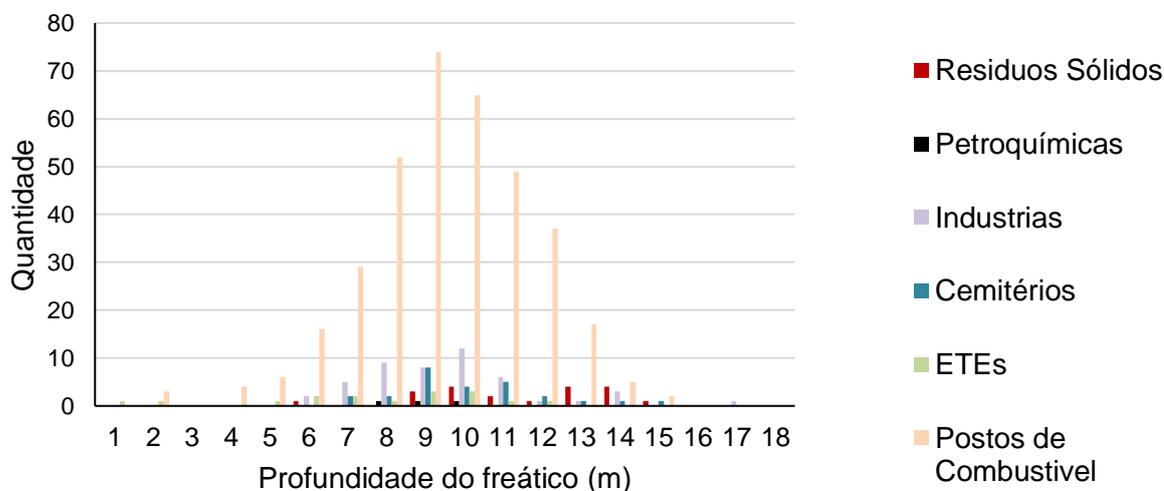
O risco de perda da qualidade ambiental por atividades específicas foi estimado a partir da localização de 359 postos de gasolina, 6 polos industriais, 26 cemitérios, 16 estações de tratamento de esgoto (ETEs), 48 indústrias de médio e grande porte, 3 petroquímicas e 20 locais de deposição de resíduos sólidos (Figura 20).

Figura 20 – Mapa de atividades específicas.



Ao verificar a distribuição destas atividades sobre as diferentes profundidades do aquífero freático, observou-se o resultado exposto na Figura 21.

Figura 21 –Distribuição de atividades potencialmente poluidoras por profundidades do freático.



A maior quantidade de atividades está presente sobre profundidades estimadas de 8 a 11 metros. Alguns postos de combustíveis estão localizados em áreas com aquífero freático com até 3 metros de profundidade. Assim, a presença de fontes potencialmente poluidoras em contato direto com a superfície saturada do solo promove uma maior possibilidade de contaminação, representando um risco não apenas à qualidade destas águas subterrâneas, mas também aos cursos hídricos superficiais.

O cruzamento entre as coordenadas destas atividades e o mapa de vulnerabilidade proporcionou a identificação de um número elevado de estabelecimentos nas classes moderada e alta (Tabela 10).

Tabela 10 –Distribuição de atividades potencialmente poluidoras por classes de vulnerabilidade.

Atividade / Vulnerabilidade	Total	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
Polos industriais (área)	810 ha	0 ha	7 ha	401,52 ha	387,23 ha	13,85 ha
Cemitérios	26	0	0	9	17	0
ETEs	16	0	1	4	9	2
Petroquímicas	3	0	0	0	3	0
Indústrias	48	0	1	14	31	2
Postos de combustível	359	0	6	103	229	21
Deposição de resíduos sólidos	20	0	3	11	6	0

Dentro dos limites da Região Metropolitana de Goiânia foram identificados seis polos industriais: Distrito Agroindustrial de Senador Canedo (DASC), Distrito Agroindustrial de Aparecida de Goiânia (DAIAG), Distrito Industrial do Município de Aparecida de Goiânia (DIMAG), Parque Industrial de Aparecida de Goiânia, Polo Industrial Goiás e Distrito Agroindustrial de Goianira.

Os principais tipos de indústrias ali instaladas não se diferem das demais presentes dentro dos limites estudados, estando assim relacionadas aos setores alimentício, agropecuário, de construção e de bens de transformação.

Indústrias desta natureza estão vinculadas a diferentes fontes de contaminação, tais como, efluentes industriais não tratados, derramamentos acidentais, resíduos sólidos inadequadamente dispostos, materiais em suspensão e vazamento de tubulações e tanques.

A presença de cemitérios representa a ocorrência de cargas contaminantes microbiologicamente relativamente pequenas e restritas a determinadas áreas, que ainda podem ser reduzidas com a utilização de túmulos impermeáveis ou ataúdes resistentes à corrosão (FOSTER et al., 2000).

Em relação às estações de tratamento de esgoto, estas representam possíveis focos de introdução de cargas contaminantes nas águas subterrâneas. Entretanto o potencial de contaminação do aquífero freático está vinculada a forma de como a estação foi construída, sendo que alguns cuidados podem ser tomados para que o contato dos efluentes com a zona vadosa seja mínimo (CAMPOS et al., 2003).

As petroquímicas estão localizados na região leste de Goiânia e no município de Senador Canedo. Nestes locais o risco de contaminação é mais elevado e ocorre principalmente pelo contato entre o aquífero freático com hidrocarbonetos aromáticos.

A presença de locais de deposição de resíduos sólidos também representa um elevado potencial de contaminação das águas subterrâneas. Esta contaminação ocorre preferencialmente em locais com ausência de estruturas adequadas para a captação e deposição de tais resíduos. Nestas áreas, o maior risco de se dá pela infiltração e percolação do chorume no solo em direção ao lençol freático.

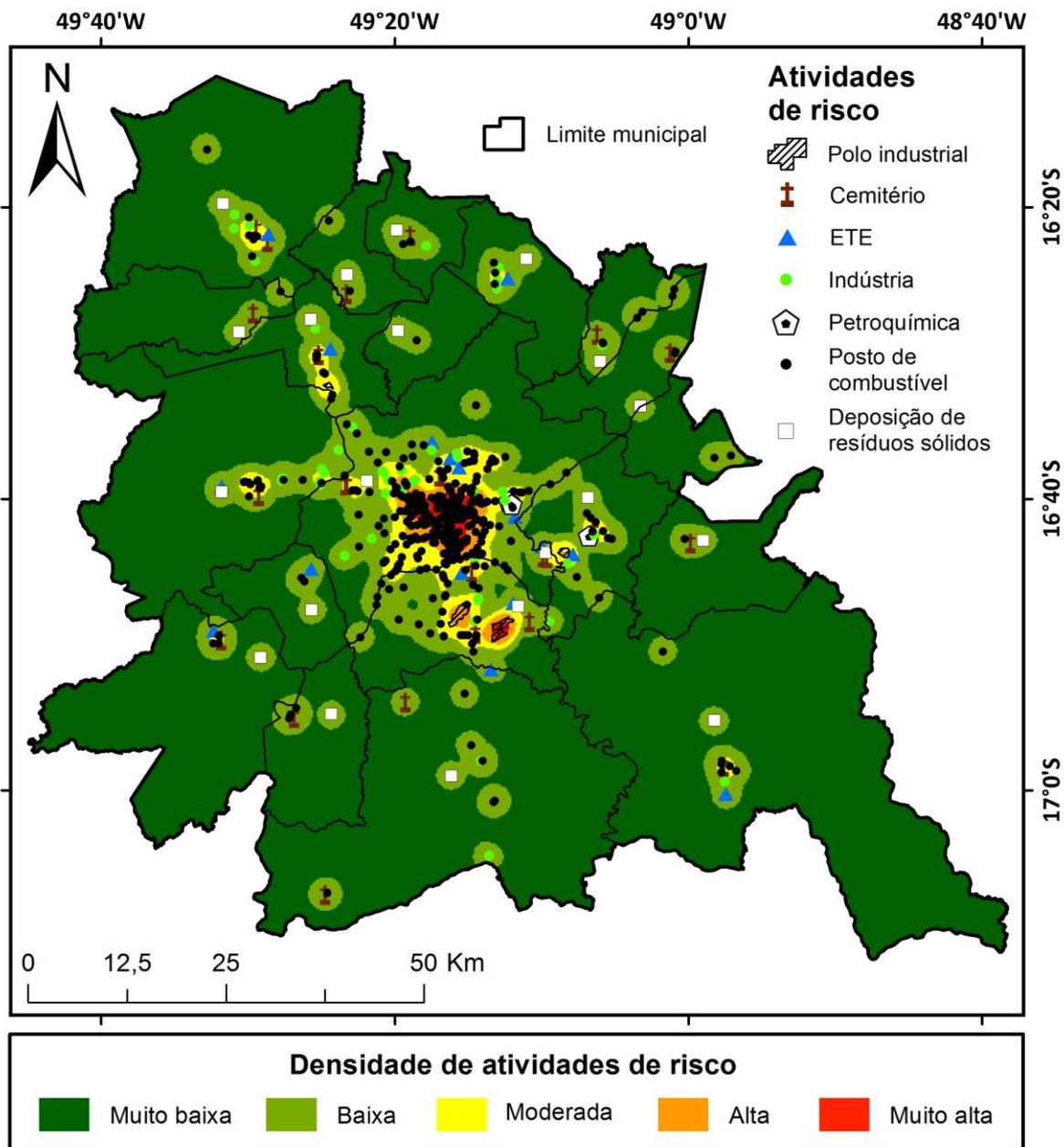
Os postos de combustíveis provavelmente representam o maior percentual de ocorrências de áreas contaminadas dentro dos limites estudados. Em outras regiões, como por exemplo no estado de São Paulo, tal atividade corresponde a aproximadamente 80% de tais ocorrências (CETESB, 2016).

Estes postos possuem tanques subterrâneos de armazenamento que não permitem inspeções visuais para a verificação de vazamentos. Com a falta de manutenção adequada, um tanque com mais e 20 anos pode representar grande perigo de contaminação do freático (FOSTER et al., 2000).

Um outro fato que corrobora com o seu alto potencial de contaminação se refere a presença associada de oficinas de manutenção e de lavajatos, promovendo assim o despejo de grandes quantidades de solventes orgânicos sintéticos e lubrificantes. Além disto, o tráfego de veículos pesados ou a baixa qualidade das respectivas instalações também podem facilitar o rompimento de tubulações existentes.

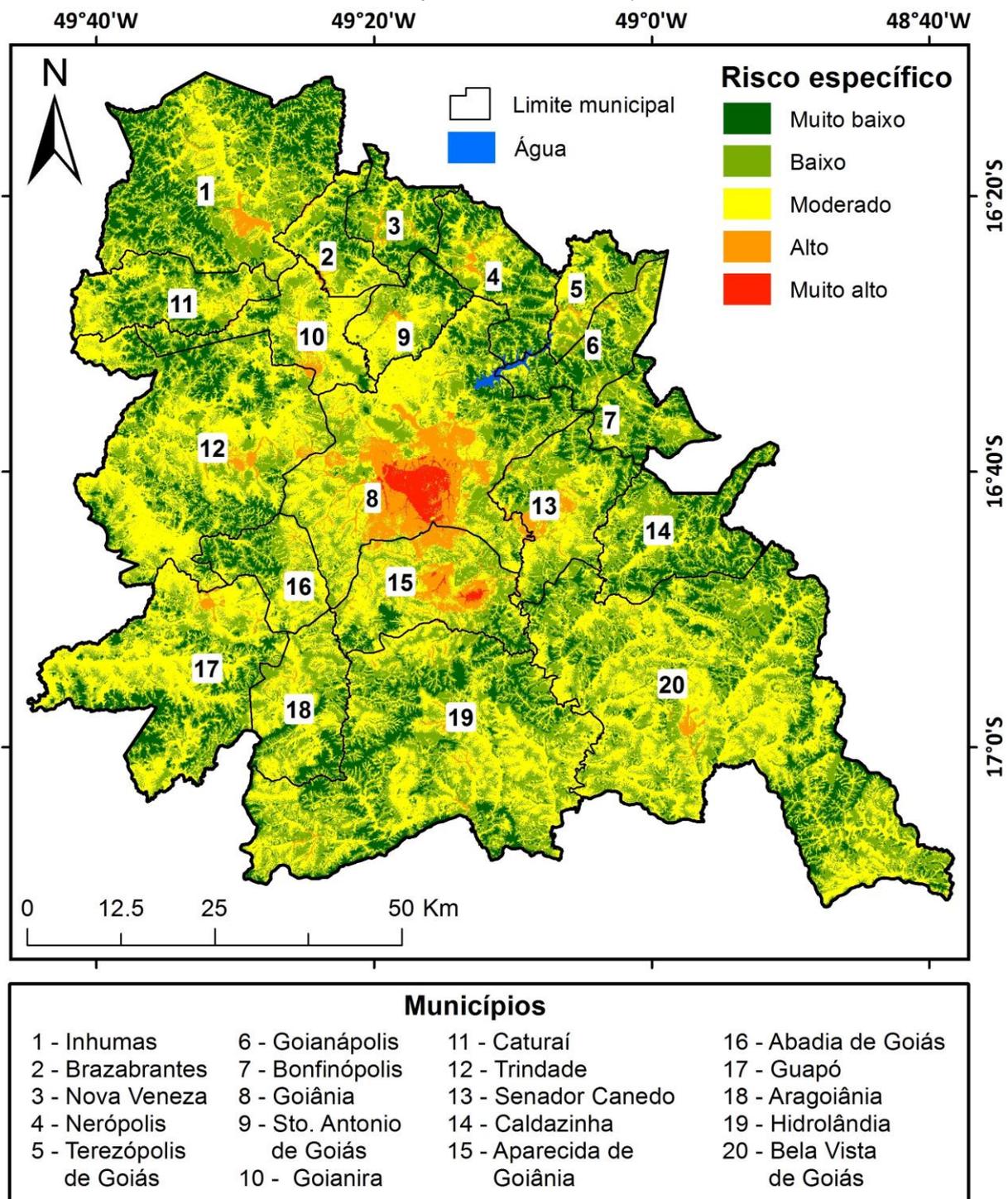
Isoladamente, a presença destas atividades representam um risco à perda da qualidade ambiental das águas subterrâneas. A associação entre os diferentes tipos de fontes contaminantes é capaz de intensificar este perigo. A Figura 22 representa as áreas com maiores densidades de atividades potencialmente poluidoras do aquífero freático dentro dos limites da Região Metropolitana de Goiânia.

Figura 22 – Densidade de atividades potencialmente poluidoras (Região Metropolitana de Goiânia).



Observa-se uma densidade muito alta de atividades na área urbana referente ao município de Goiânia e nos polos industriais localizados no município de Aparecida de Goiânia. A intersecção entre as classes do mapa de densidade e, as classes do mapa de vulnerabilidade ambiental do aquífero freático, resultou em um mapa de risco de contaminação por atividades específicas (Figura 23).

Figura 23 – Mapa de risco de contaminação por atividades específicas (Região Metropolitana de Goiânia).



A incidência do risco muito alto de contaminação do freático se concentrou principalmente nos perímetros urbanos de Goiânia, Aparecida de Goiânia e Senador Canedo. Nestas regiões predominam a ocorrência de indústrias e de polos petroquímicos, sendo também densamente ocupadas por postos de combustíveis.

As áreas urbanas dos demais municípios possuem risco alto devido sobretudo a deposição de resíduos sólidos e demais atividades comerciais. Em grande parte da Região Metropolitana de Goiânia, o risco é moderado, devido ao uso do solo para o desenvolvimento de atividades agropecuária sobre Latossolos e em locais onde o freático se localiza próximo a superfície.

Em relação aos mini-poços e cisternas, há uma maior presença destas estruturas de captação em áreas com de risco de contaminação por atividades específicas moderado (Tabela 11).

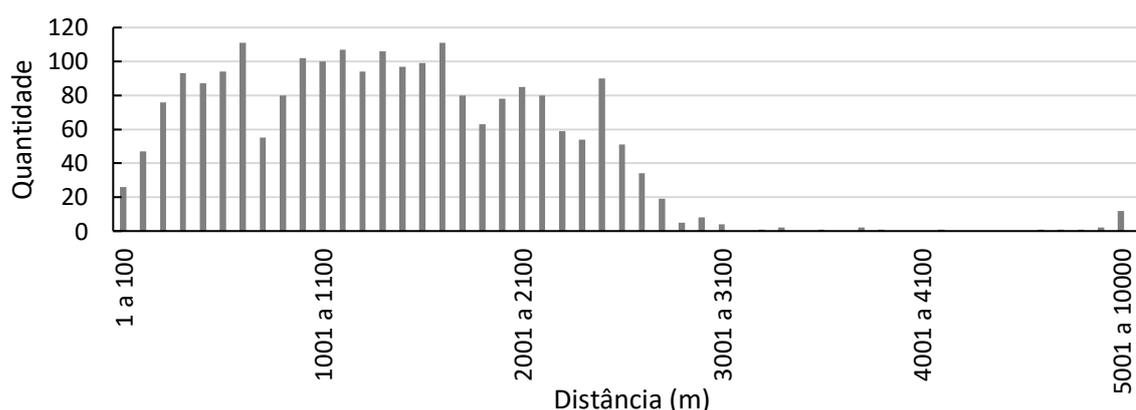
Tabela 11 – Quantidade de mini-poços e cisternas por classe de risco específico.

Risco Específico	Mini-poços/cisternas	Poços tubulares profundos
Muito Baixo	9	5
Baixo	484	142
Moderado	1389	924
Alto	292	356
Muito Alto	54	156

A mudança em relação ao risco geral de perda da qualidade ambiental ocorre pelo fato do risco específico envolver apenas fontes pontuais, excluindo-se assim problemas urbanos relacionados a infraestrutura, deficiência de saneamento e demais fontes poluentes em estabelecimentos comerciais, residenciais ou industriais.

Nesta análise, buscou-se também calcular a distância entre mini-poços/cisternas, com captação feita diretamente no aquífero freático, e estas atividades representadas por poços de combustível, cemitérios, estações de tratamento de esgoto, indústrias de médio e grande porte, petroquímicas e locais de deposição de resíduos sólidos (Figura 24).

Figura 24 – Distância entre mini-poços/cisternas e atividades específicas.

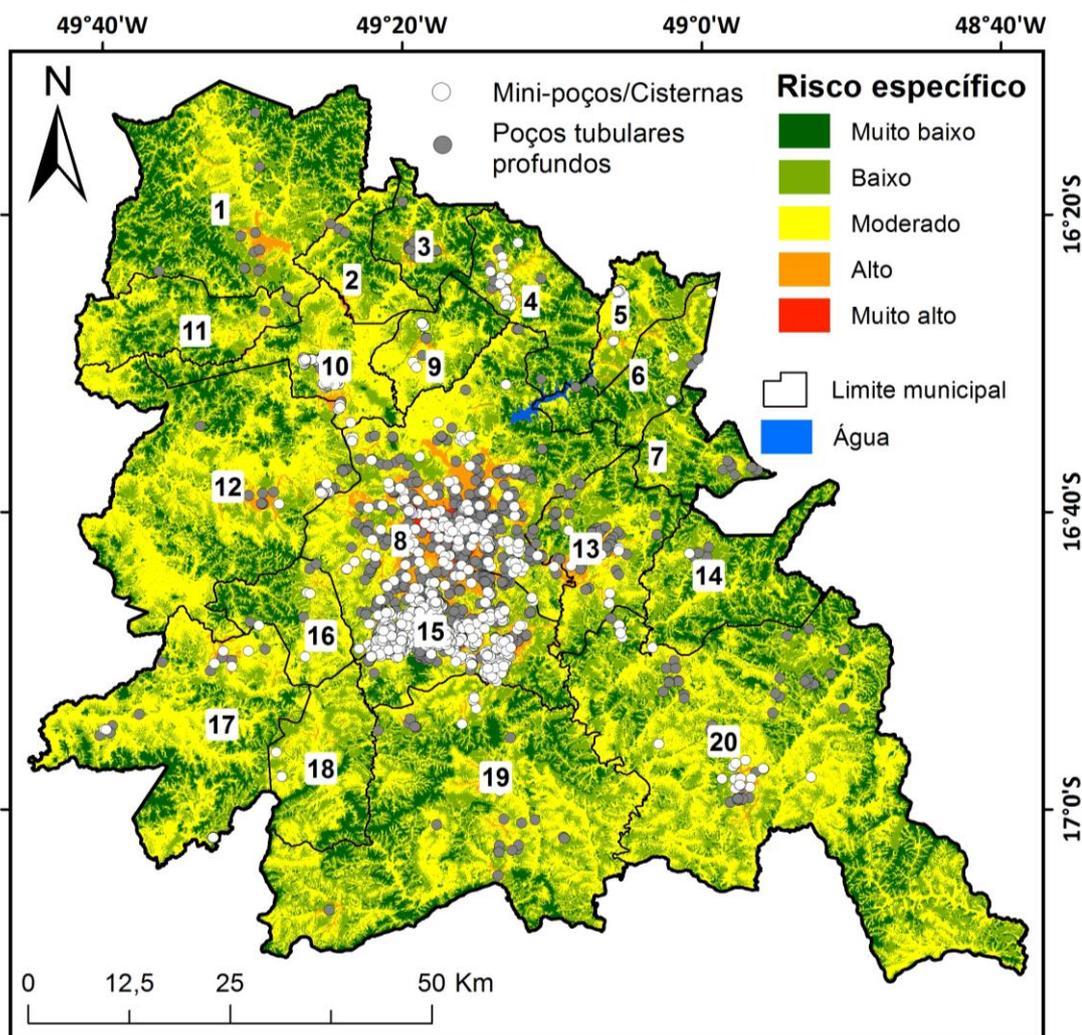


Observou-se que dos 2228 mini-poços/cisternas analisados, 771 encontravam-se em um raio de 1 km de uma determinada atividade potencialmente poluidora. Destes 26 pontos de captação estavam a 100 metros de distância de alguma atividade verificada. A Tabela 12 mostra que os postos de combustível representam os tipos de estabelecimentos potencialmente contaminantes mais próximos a maioria dos mini-poços/cisternas analisados, com uma distância média de 1492 metros (Tabela 12).

Tabela 12 – Atividades com maior proximidade em relação a mini-poços ou cisternas.

Atividade	Mini-poços/cisternas	Distância média (m)
Cemitério	7	1020
Deposição de residuo sólidos	9	3219
ETE	20	1765
Industria	248	942
Petroquímica	1	632
Posto de combustivel	1943	1492

Figura 25 – Localização de mini-poços, cisternas e poços tubulares profundos nas classes referentes ao risco de contaminação específico (Região Metropolitana de Goiânia).



5. CONCLUSÕES

Na Região Metropolitana de Goiânia, o abastecimento público de água ocorre por meio da captação de águas superficiais, no entanto as águas subterrâneas são utilizadas, principalmente por indústrias e podem servir para o abastecimento dos municípios no futuro, sendo, portanto um recurso natural de grande importância estratégica para as gerações futuras.

A análise espacial envolvendo a vulnerabilidade natural da paisagem e a presença de atividades potencialmente poluidoras é um importante instrumento para fomentar a sustentabilidade em um cenário de crescente urbanização. A identificação de áreas passíveis de degradação da qualidade ambiental das águas subterrâneas é fundamental para a aplicação de medidas que visam atenuar a lixiviação de cargas contaminantes ao freático, tais como reparos em redes de esgoto, monitoramento de tanques armazenadores de combustíveis, fiscalização na utilização de agrotóxicos, seleção adequada de locais para deposição de resíduos sólidos e práticas adequadas a fim de evitar possíveis acidentes que possam comprometer a captação de água subterrânea para abastecimento público.

Ressalta-se também que a aplicação de técnicas envolvendo parâmetros extraídos de modelos digitais de elevação podem servir como subsídios para análises em regiões com baixa disponibilidade de dados. Tais parâmetros representam diferentes aspectos do terreno, sendo este, uma importante variável referente a modelagem de processos ambientais.

Os resultados deste artigo também podem ser utilizados na gestão ambiental dos municípios da Região Metropolitana de Goiânia, com o objetivo de desenvolver programas de educação ambiental, fiscalização e controle, com vistas a preservação da qualidade ambiental das águas subterrâneas, nesta região, que apresenta importante déficit hídrico durante vários meses do ano.

Outros estudos devem ser elaborados com o objetivo de ser verificar alterações na quantidade desse recurso natural, pois muitas atividades urbanas podem comprometer a quantidade de águas subterrâneas, devido a obras de fundação de grandes edificações que necessitam do bombeamento de águas subterrâneas, além disso há a impermeabilização do solo em áreas urbanas e compactação do solo em áreas rurais. Outro problema é a exploração clandestina de águas subterrâneas em grandes centros urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLER, L.; LEHR, H. J.; PETTY, R.; BENNET, T. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. *Environmental Protection Agency Report*, Washington, D.C., 600/2-87-035, Washington, D.C., 1987.

ARANTES, E. J. *Emprego de Infiltrômetros na Caracterização da Interação entre Rio e Aquífero*. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 24, 1979.

BISHOP, M. I. P.; JAMES, L. A.; SHRODER, J. F.; WALSH, S. J. Geospatial Technologies and Digital Geomorphological Mapping: Concepts, Issues and Research. *Geomorphology*, v. 137 n. 1, 2012.

BOEHNER, J., KOETHE, R. CONRAD, O., GROSS, J., RINGELER, A., SELIGE, T. Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation. In: MICHELI, E., NACHTERGAELE, F., MONTANARELLA, L. (Ed.): *Soil Classification 2001*. European Soil Bureau, Research Report, Luxembourg, v. 7, 2002.

BOEHNER, J.; SELIGE, T. Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. In: BOEHNER, J., MCCLOY, K. R., STROBL, J. *SAGA: Analysis and Modelling Applications*. Goettinger Geographische Abhandlungen, 2006.

BUCHANAN, S.; TRIANTAFILIS, J.; Mapping water table depth using geophysical and environmental variables. *Groundwater*, v. 47, n. 1, 2009.

BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 1998.

CAMPOS, J. E. G.; RODRIGUES, A. P.; ALMEIDA, L de; RESENDE, L; MAGALHÃES, L. F.; SÁ, M. A. M. Diagnóstico hidrogeológico da região de Goiânia. Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração, 2003. 125 p.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. *Engenharia Agrícola*, v. 25, 2005.

- CARVALHO, C. M.; ROCHA, N. S.; NUNES, D. S.; CRUZ, R. C. Avaliação da vulnerabilidade ao risco de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do município de Piratini-RS. *Monografias Ambientais*, Santa Maria, v. 13, n. 14, 2014.
- CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; SANTOS, M. L. M.; GIASSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 42, n. 11, 2012.
- CHUNG J.; ROGER J. Interpolations of groundwater table elevation in dissected uplands. *Ground Water*. v. 50. n. 4. 2002.
- COELHO, M. C. N. Impactos ambientais em áreas urbanas: teorias, conceitos e métodos de pesquisa. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Impactos ambientais urbanos no Brasil (org.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.
- DERISIO, J. C. Introdução ao controle de poluição ambiental. 3ª ed., São Paulo, Signus Editora, 2007
- DESBARATS, A. J. A lumped-parameter model of groundwater influx to a mine adit in mountainous terrain. *Water Resour. Res.*, v. 38, n. 11, 2002.
- DOERFLINGER, N.; ZWAHLEN, F. Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK): practical guide. Bern: Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape, 1998
- DREW, D. Processos interativos homem – meio ambiente. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1983.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; REGINATO, P. A. R. Simulação da superfície de equilíbrio de água subterrânea aproximada em escala regional. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, 2014.
- FIGUEIREDO, S. R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C. G.; NASCIMENTO, P. C. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no Planalto Médio do RS. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 32, 2008.
- FINKE, P. A.; BRUS, D. J.; BIERKENS, M. F. P.; HOOGLAND, T.; KNOTTERS, M.; VRIES, F. Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. *Geoderma*, v. 123, 2004.
- FLORINSKY, I. V. Digital terrain analysis in soil science and geology. Boston: Academic Press, 2012.

- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial. Washington, D.C., 2002.
- GAMBOLATI, G.; VOLPI G. A conceptual deterministic analysis of the kriging technique in hydrology. *Water Resources Research*, v. 15, n. 3, 1979.
- GONZALS, J. P.; JARVIS, A.; COOK, S. E.; OBERTHUR, T.; RINCON-ROMERO, M.; BAGNELL, J. A.; DIAS, M. B. Digital soil mapping of soil properties in Honduras using readily available biophysical datasets and gaussian processes. In: HARTEMINK, E. A.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Ed.). *Digital soil mapping with limited data*. Singapore: Springer, 2008.
- GROSTEIN, M. D. Metr pole e expansão urbana: a persist ncia de processos "insustent veis". *São Paulo em Perspectiva*. São Paulo, v. 15, n. 1, p. 13-19, 2001.
- GRUNWALD S., Environmental soil-landscape modeling: geographic information technologies and pedometrics. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- HAITJEMA, H. M.; BRUKER, S. M. Are water tables a subdued replica of the topography? *Groundwater*, v. 43, n. 6, 2005.
- HENGL, T.; REUTER, H. I. Geomorphometry: concepts, software, applications. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- KIRKBY, M. J.; CHORLEY, R. J. Throughflow, overland flow and erosion. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, vol. 12, n. 3, 1967.
- KOETHE, R. & LEHMEIER, F. SARA: System zur Automatischen Relief-Analyse: user manual. 2^a Ed. , Dept. of Geography, University of Goettingen, 1996.
- BRASIL. IBGE. Censo Demográfico, 2010. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 abr. 2016.
- BRASIL. IBGE. Contagem da Popula o, 2014. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 abr. 2016.
- JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpola o espacial de dados nas análises sociodemográficas. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 2006.
- KNOTTERS, M.; BIERKENS, M. F. P. Predicting water Table depths in space and time using a regionalised time series model. *Geoderma*, v. 103, 2001.

LEPSCH, I.F 19 Lições de Pedologia. São Paulo, Oficina de Textos, 2011.

MEDEIROS, C. M.; RIBEIRO, M. A. F. M.; RUFINO, I. A. A.; BARBOSA, D. L. Mapeamento da vulnerabilidade de parte da Bacia Sedimentar do baixo curso do rio Paraíba utilizando o método GOD. 2011, Curitiba. *Anais do XV SBSR, INPE*, 2011.

MEIRVENNE, M. V.; CLEEMPUTAND, I. V. Pedometrical techniques for soil texture mapping at different scales. In: GRUNWALD, S. (Ed.). *Environmental soil-landscape modeling*. CRC Press, 2005.

MEIRA, J. C. R.; CAMPOS, A. B.; PEREIRA, L. C. Vulnerabilidade natural e perigo à contaminação de zona de recarga do Aquífero Guarani. *Águas Subterrâneas*. v. 28. 2014. p. 31-46

OLIVEIRA, A. I. L.; ROCHA, W. J. S. F.; SILVA, A. B. Modelagem da superfície freática na cabeceira da Bacia do Paraguaçu, Área do Agropolo Mucugê Ibicoara, Estado da Bahia: Parâmetros para estudos de contaminação da água subterrânea em aquíferos livres. 2015, João Pessoa. *Anais do XVII SBSR, INPE*, 2015.

PACHEPSKY, Y. A.; D. J. TIMLIN; RAWLS, W. J. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, n. 6, 2001.

PEREIRA JR., L. C.; SOARES, H. L. T.; CASTRO, S. S. Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do Aquífero Bauru no município de Rio Verde – GO, *Águas Subterrâneas*, v. 29. n. 2, 2015.

PIKE, R. J., Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, v. 24, n. 1, 2000.

PIKE, R. J.; EVANS, I. S., HENGL, T. Geomorphometry: a brief guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (Ed.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2009.

PINTO, L. V. A.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C.; FERREIRA, E. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 65, 2004.

PIRES, E. G. *Caracterização ambiental de uma micro-bacia localizada em áreas de cerrado – solos e hidrologia*. 2009. Dissertação (Mestrado), UFT, Palmas, 2009.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. 2 ed. São Paulo: Escrituras Editora, 703 p. 2002.

REED, P.; B. MINSKER; VALOCCHI, A.J. Cost-effective long-term groundwater monitoring design using a genetic algorithm and global mass interpolation. *Water Resources Research*, v. 36, n. 12, 2000.

SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F.; ALMEIDA, J. A. (Ed.). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

SCHIMIDT, J.; DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models. In: DIKAU, R.; SAURER, H. *GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modeling of the Natural Environment*. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1999. p. 153-173.

SETO K. C., FRAGKIAS M., GÜNERAL P. B., REILLY M. K. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *PLoS ONE* v. 6, n. 8, 2011.

SHEREIF H. M. Delineation of potential sites for groundwater recharge using a GIS-based decision support system. *Environmental Earth Sciences*, v.72 (9), 2014.

TAVARES, P. R. L.; SILVEIRA, J. G. P.; COSTA, C. T. F.; CASTRO, M. A. H. Mapeamento da vulnerabilidade à poluição do Aquífero Rio da Batateira, utilizando o método GOD, Crato-CE. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

TROISI, S.; FALLICO, C.; STRAFACE, S., MIGLIARI, E. Application of kriging with external drift to estimate hydraulic conductivity from electrical-resistivity data in unconsolidated deposits near Montalto Uffugo, Italy. *Hydrogeology Journal*, v. 8, n. 4, 2000.

VALENTE, O. F.; GOMES, M. A. *Conservação de nascentes: hidrologia e manejo de bacias hidrográficas de cabeceira*. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2005.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, v. 16, 1994.

VILLAR, Pilar Carolina. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. *Ambiente e Sociedade*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 85-102, 2016.

WEISS, A. D. Topographic Position and Landforms Analysis. Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA. 2000.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978.

ZEVENBERGEN, L. W., THORNE C. R. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, V. 12, 1987.