

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JULIANA DORN NÓBREGA

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO
NA CIDADE DE CAMPO GRANDE - MS**

São Paulo
2020

JULIANA DORN NÓBREGA

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO
NA CIDADE DE CAMPO GRANDE - MS**

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Especialista
em Gestão de Áreas Contaminadas,
Desenvolvimento Urbano Sustentável e
Revitalização de Brownfields

Orientador: Marcelo Monteiro da Rocha

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Nóbrega, Juliana Dorn

Distribuição espacial das concentrações de nitrato na cidade de Campo Grande - MS / J. D. Nóbrega -- São Paulo, 2020.

67 p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Geoestatística 2.Krigagem ordinária 3.Nitrato 4.Qualidade da água subterrânea 5.Poços I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Prof. Marcelo Monteiro da Rocha pela sua orientação e pelas aulas muito didáticas que despertaram o meu interesse pela área da geoestatística.

Ao Juarez Marques Cardoso pela autorização para utilizar os dados de qualidade da água apresentados em sua dissertação de mestrado, os quais foram obtidos pelo Sistema de Registro e Informações Estratégicas do Meio Ambiente, do Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (SIRIEMA-IMASUL).

Agradeço às minhas amigas Natália Pelinson, Alice Morita, Rosângela Aparecida e Wana Dorigo que me ajudaram durante o MBA e com quem eu pude compartilhar as experiências ao longo do curso. À Natália Pelinson em especial, pela amizade, carinho e por todo o auxílio.

Às coordenadoras: Patrícia, Luiza, Tânia, Itana e Marilda pela organização do curso e pela oportunidade de realizar a monitoria. À Patrícia e Luiza em especial, por sempre se disponibilizarem para nos ajudar prontamente.

Aos meus pais, Paulo e Tânia, e irmã Gabriela, pelo amor e por me inspirarem a crescer e aprender cada dia mais.

RESUMO

NÓBREGA, Juliana Dorn. Distribuição espacial das concentrações de nitrato da cidade de Campo Grande – MS. 2020. 67 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

A geoestatística constitui ferramenta importante na análise de dados ambientais. Na análise de dados de qualidade da água subterrânea, as técnicas geoestatísticas possibilitam estimar as concentrações de parâmetros em locais não amostrados, informações relevantes para os gestores de recursos hídricos. O presente trabalho tem como objetivo utilizar técnicas geoestatísticas para mapear as concentrações de nitrato na cidade de Campo Grande – MS, a partir das concentrações medidas em poços tubulares outorgados na cidade, entre os anos de 2015 e 2018. Os dados de qualidade da água foram obtidos da dissertação de Cardoso (2019), que por sua vez, obteve informações cadastradas no sistema do Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL) utilizado para a outorga de poços. Este estudo compreende basicamente o estudo variográfico, ajuste do modelo teórico de variograma ao variograma experimental e estimativa geoestatística pelo método de krigagem ordinária. Buscou-se relacionar os resultados com informações do zoneamento urbano do Plano Diretor, vulnerabilidade natural do aquífero e de Unidades Homogêneas de nível d'água do lençol freático em relação à superfície. A relevância deste trabalho está no fornecimento de subsídios para a regulamentação do uso da água subterrânea em escala municipal e auxílio no estabelecimento de medidas para preservação da qualidade da água.

Palavras-chave: Geoestatística. Krigagem ordinária. Nitrato. Qualidade da água subterrânea. Poços.

ABSTRACT

NÓBREGA, Juliana Dorn. Spatial distribution of nitrate concentrations in the city of Campo Grande – MS. 2020. 67 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

Geostatistics is a strength tool for environmental data analysis. Regarding the analysis of groundwater quality data, the geostatistical techniques allow to estimate the parameter concentrations in sites without samples, whose information are relevant for the water resources managers. The present work aims to apply geostatistical techniques to map the nitrate concentrations at the city of Campo Grande-MS, from concentrations measured in granted wells in the period between 2015 and 2018. The water quality data were gathered from the dissertation of Cardoso (2019), that in turn used the database of Environmental Institute of Mato Grosso do Sul (IMASUL) of granting documentation. The present study comprise the variogram analysis, fitting the theoretical variogram model to the experimental variogram, and geostatistical estimation using the ordinary kriging. The results were related to information about urban planning, natural vulnerability of aquifer, and homogeneous units regarding groundwater levels. The relevance of this work is based on subsidizing information regarding regulation of groundwater use in municipal scale, as well, as a support in the establishment of measures towards water quality preservation.

Keywords: Geostatistics. Ordinary kriging. Nitrate. Groundwater quality. Wells.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cursos d'água e bacias hidrográfica em Campo Grande – MS.	17
Figura 2. Delimitação do município de Campo Grande e sistemas aquíferos.....	18
Figura 3. Áreas de afloramento dos sistemas aquíferos no Estado de Mato Grosso do Sul.....	19
Figura 4. Regiões urbanas de Campo Grande – MS.....	21
Figura 5. Carta Geotécnica de Campo Grande – MS.	22
Figura 6. Fontes de contaminação por nitrato nas águas subterrâneas em áreas rurais.....	25
Figura 7. Fontes de contaminação por nitrato nas águas subterrâneas em áreas urbanas.	25
Figura 8. Delimitação do perímetro urbano do município de Campo Grande - MS, poços outorgados, finalidades de usos e aquíferos aflorantes.....	26
Figura 9. Concentrações de nitrato iguais ou maiores que 5 mg L^{-1} dos poços outorgados no município de Campo Grande – MS, finalidades de uso e aquíferos aflorantes.....	27
Figura 10. Mapa da concentração de nitrato dos poços outorgados na área urbana do município de Campo Grande – MS, conforme VMP.	27
Figura 11. Resultados de Cardoso (2019) para as concentrações de nitrato de acordo com método de interpolação IPD.	28
Figura 12. Evolução da malha urbana em Campo Grande entre os anos de 1984 e 2015.....	30
Figura 13. Características dos variogramas.	35
Figura 14. Comportamento do variograma próximo à origem: (a) linear; (b) parabólico; (c) efeito pepita, indicado em verde; (d) efeito pepita puro.....	36
Figura 15. Exemplos de modelos usuais de variogramas.	37
Figura 16. Regiões urbanas e localização dos poços outorgados.	40
Figura 17. Regiões urbanas de Campo Grande - MS e identificação dos poços com concentrações de nitrato maiores que VP e VMP.	43
Figura 18. Histograma das concentrações de nitrato.	43
Figura 19. Concentrações de nitrato apresentados nos laudos de outorga <i>versus</i> laudo de monitoramento.....	44
Figura 20. Distribuição espacial dos poços outorgados dentro do limite do município.....	45
Figura 21. Histograma para os dados de nitrato transformados.	46
Figura 22. Variogramas calculados para o nitrato nas direções de 0° e 90°	47
Figura 23. Ajuste do modelo teórico de variograma para o nitrato na direção 0°	47
Figura 24. Ajuste do modelo teórico de variograma para o nitrato na direção 90°	48

Figura 25. Distribuição espacial dos valores absolutos das concentrações de nitrato estimadas por krigagem ordinária – saída do programa SGeMS.	50
Figura 26. Distribuição espacial dos valores absolutos das concentrações de nitrato estimadas por krigagem ordinária.	50
Figura 27. Regiões urbanas de Campo Grande - MS e carta geotécnica de Campo Grande - MS.	51
Figura 28. Regiões urbanas e classes de vulnerabilidade natural dos aquíferos.	53
Figura 29. Regiões urbanas do Segredo e Prosa e zoneamento de agricultura urbana.....	53
Figura 30. Regiões urbanas e rede coletora de esgoto.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias mensais de temperaturas, precipitação e umidade relativa para a cidade de Campo Grande – MS.	32
Tabela 2. Distribuição do nível estático dos poços tubulares outorgados.	41
Tabela 3. Distribuição das vazões de estabilização dos poços tubulares outorgados.	41
Tabela 4. Estatísticas descritivas das concentrações de nitrato.	44
Tabela 5. Estatísticas descritivas das concentrações de nitrato com transformação logarítmica.	45
Tabela 6. Parâmetros característicos do modelo ajustado aos variogramas experimentais.....	46

LISTA DE SIGLAS

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DURH	Declaração de Uso de Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMASUL	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPD	Método Ponderação pelo Inverso da Potência da Distância
MSE	Erro médio quadrático
OMS	Organização Mundial da Saúde
RMSE	Raiz quadrada do erro médio quadrático
SAB	Sistema Aquífero Bauru
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SASG	Sistema Aquífero Serra Geral
SIRIEMA	Sistema IMASUL de Registros e Informações Estratégicas do Meio Ambiente
VA	Variável aleatória
VMP	Valor máximo permitido
VP	Valor de prevenção
VR	Variável regionalizada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Águas subterrâneas em Campo Grande – MS	16
3.2. Sistemas aquíferos em Campo Grande – MS	17
3.3. Considerações sobre a rede de esgoto em Campo Grande – MS.....	20
3.4. Valores de referência para nitrato	22
3.5. Fontes de contaminação por nitrato em águas subterrâneas	23
3.6. Resultados para as concentrações de nitrato da literatura em Campo Grande – MS.....	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1. Caracterização da área de estudo	31
4.2. Análise e métodos geoestatísticos.....	33
5. RESULTADOS	40
5.1. Análises dos dados	40
5.2. Concentrações dos parâmetros de qualidade da água	42
5.3. Estudo variográfico.....	45
5.4. Distribuição espacial dos parâmetros por meio de estimativa por krigagem ordinária 49	
5.5. Análise das estimativas pela krigagem ordinária e comparação com resultados da literatura.....	51
6. CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS ¹	58
ANEXOS	61
ANEXO A – Regiões urbanas de Campo Grande - MS.....	61

ANEXO B – Carta Geotécnica de Campo Grande – MS. Mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos.....	62
ANEXO C – Zonas urbanas e infraestrutura de coleta de esgoto em Campo Grande – MS	63
ANEXO D – Zonas urbanas e regiões de agricultura urbana em Campo Grande – MS.....	64
APÊNDICE	65
APÊNDICE A – Resultado da krigagem ordinária para nitrato. Representação da identificação dos poços outorgados	65
APÊNDICE B – Resultado da krigagem ordinária para nitrato. Representação das concentrações nos poços outorgados	66
APÊNDICE C – Mapa com localização dos poços, concentrações dos poços com concentrações de nitrato maiores que 5 mg/L, e regiões de agricultura urbana no município	67
APÊNDICE D – Mapa com localização dos poços, concentrações dos poços com concentrações de nitrato maiores que 5 mg/L, e regiões com infraestrutura de coleta de esgoto no município	68

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas constituem importante fonte de abastecimento de água em diversos municípios brasileiros, não somente em áreas rurais, onde são muitas vezes observados sistemas individualizados, mas também em áreas urbanas, sendo complementares ao abastecimento de água a partir de mananciais superficiais.

Assim como as águas superficiais, as águas subterrâneas são passíveis de contaminação, prejudicando a sua qualidade e, portanto, restringindo o seu uso para consumo humano. Aliado a esse fator, o abastecimento público de água fica comprometido pela exploração de forma descontrolada dos recursos hídricos subterrâneos, impactando na quantidade de água disponível, evidenciando a necessidade de uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

Um dos contaminantes que tem causado grande preocupação aos gestores de recursos hídricos e de incidência crescente no Brasil e no mundo é o nitrato. Este contaminante possui alta mobilidade, podendo atingir extensas áreas e porções profundas do sistema aquífero e embora tenha média toxicidade, o nitrato é um dos contaminantes mais insidiosos e persistentes na água subterrânea. O nitrato também pode causar impactos ambientais relacionados à eutrofização de corpos de água superficiais ou mortes de organismos aquáticos, quando presente em altas concentrações (Varnier et al., 2019).

As fontes de contaminação por nitrato podem ser do tipo pontuais ou difusas, sendo em geral provenientes de atividades agrícolas, criação de animais, sistemas de saneamento *in situ* (fossas sépticas e negras), vazamentos na rede coletora de esgotos, entre outros. Os sistemas de saneamento *in situ*, mesmo quando desativados, podem constituir fontes de contaminação ao longo de muitos anos, como se pode observar em diversas cidades brasileiras.

O principal efeito agudo nos seres humanos pelo nitrato é a metahemoglobinemia, que consiste na ligação do nitrito (ingerido diretamente da água ou formado a partir do nitrato) à hemoglobina, interrompendo o transporte de oxigênio aos tecidos. As crianças com idade inferior a seis anos são mais suscetíveis à ocorrência da metahemoglobinemia (WHO, 2016).

Além disso, alguns estudos evidenciam efeitos na tireoide após longo tempo de exposição ao nitrato pela ingestão de água. O nitrato inibe competitivamente a absorção do iodo pela tireoide, levando a alterações nas concentrações dos hormônios da tireoide e nas suas funções (WHO, 2016).

Embora numerosos estudos epidemiológicos tenham investigado a relação entre a exposição ao nitrato ou nitrito e ocorrência de câncer, as evidências não embasam claramente

uma associação entre câncer e exposição a estes compostos através de água de consumo. No entanto, a ingestão do nitrito em alimentos é associada com aumento na incidência de câncer de estômago (WHO, 2016).

Na cidade de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul (MS), os estudos de Manzano (2018) e Cardoso (2019) avaliaram alguns parâmetros físico-químicos de poços tubulares utilizados para o abastecimento público na cidade, evidenciando a necessidade de monitoramento efetivo do parâmetro nitrato, em virtude das altas concentrações verificadas em alguns poços e aumento das concentrações ao longo do tempo.

É importante salientar que a rede coletora de esgoto em Campo Grande atendia 32% da população no ano de 2007 com apenas 21% deste total com domicílios conectados (PLANURB, 2007). O Plano de Saneamento Básico da prefeitura (PLANURB, 2013) define que se pretende viabilizar o acesso ao saneamento básico para 100% da população até 2025, por meio do Programa Sanear Morena.

Tendo em vista essas questões, o presente trabalho tem como objetivo a utilização de técnicas geoestatísticas para a previsão da distribuição espacial das concentrações de nitrato na cidade de Campo Grande. Para isso, foram utilizados dados de qualidade da água de poços tubulares outorgados apresentados na dissertação de Cardoso (2019).

Cardoso (2019) apresentou mapas de interpolação pelo método da Ponderação pelo Inverso da Potência da Distância (IPD), para diversos parâmetros de qualidade da água, como: temperatura, alcalinidade total, pH, sólidos totais dissolvidos, turbidez, cor, dureza total, nitrato, nitrito, fluoreto, sulfato, sódio, cloreto, ferro total, condutividade elétrica. Além disso, foram avaliados os coliformes totais, coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*. O IPD é um modelo de interpolação espacial determinístico, cujo princípio está fundamentado na relação de valores de atributos entre pares de pontos e na similaridade inversamente proporcional à distância entre eles (Cardoso, 2019).

Dessa forma, no presente estudo aplicam-se técnicas geoestatísticas para descrever a correlação espacial entre os dados de nitrato e fazer estimativas para as concentrações em área urbana. Na interpretação dos resultados procurou-se relacionar as concentrações encontradas com informações do zoneamento urbano do Plano Diretor, vulnerabilidade natural do aquífero e de Unidades Homogêneas de nível d'água do lençol freático em relação à superfície. Este tipo de abordagem fornece subsídios para regulamentação do uso da água subterrânea em escala municipal e auxilia no estabelecimento de medidas para preservação da qualidade da água.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é descrever e modelar padrões de variabilidade espacial das concentrações de nitrato na cidade de Campo Grande – MS e prever valores em locais não amostrados usando estimativa por krigagem ordinária.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Avaliar estatisticamente e geoestatisticamente as variáveis;
- Ajustar modelos teóricos aos variogramas experimentais;
- Fazer previsões usando a técnica de krigagem ordinária.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Águas subterrâneas em Campo Grande – MS

Os primeiros sistemas de abastecimento da cidade de Campo Grande, Mato Grosso do Sul, na região centro-oeste brasileira, foram construídos principalmente a partir de captações de águas superficiais (PLANURB, 1999 apud Shinzato, 2007). Em meados de 1970, deu-se início à perfuração de poços tubulares profundos no município, visando à complementação do abastecimento feito a partir dos mananciais superficiais (Manzano, 2018). A construção de sistemas individuais de abastecimento com captação de água subterrânea por meio de poços tubulares se intensificou com o crescimento da cidade e a sua expansão com inúmeras cooperativas habitacionais (Shinzato, 2007).

Atualmente, ocorre uma intensa exploração dos recursos hídricos subterrâneos no município para suprimento de água, utilizando poços tubulares e poços rasos para a captação, além dos mananciais superficiais (Shinzato, 2007).

A Bacia Hidrográfica do córrego Guariroba é o principal sistema produtor de água bruta em Campo Grande, respondendo por aproximadamente 50% do sistema de abastecimento de água, sendo complementado pelos sistemas superficiais dos córregos Lageado e Desbarrancado (13% da produção de água) e por um amplo conjunto de poços que exploram os recursos hídricos subterrâneos (38% da produção de água) – (SEMADUR, 2011) – Figura 1. De acordo com Manzano (2018), a captação de água de poços tubulares profundos chega a representar 46% do abastecimento de água em Campo Grande.

Além dos SAB e SASG, outro sistema aquífero explorado em Campo Grande, é o Sistema Aquífero Guarani (SAG). O SAG encontra-se confinado abaixo do SAB e SASG no estado de MS, com apenas uma pequena porção de área de afloramento. Este aquífero é um dos maiores da América do Sul, é formado por rochas arenosas da Bacia do Paraná e apresenta uma grande reserva hídrica, sendo importante fonte de abastecimento para a cidade de Campo Grande e outras cidades do estado (PERH-MS, 2010).

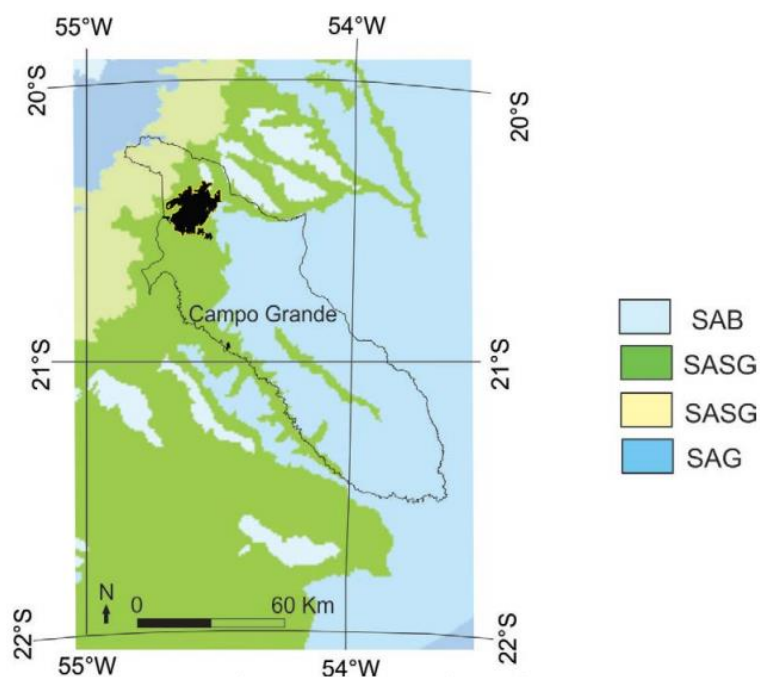


Figura 2. Delimitação do município de Campo Grande e sistemas aquíferos.
Fonte: Manzano (2018), adaptado de SIAGAS-CPRM (2017).

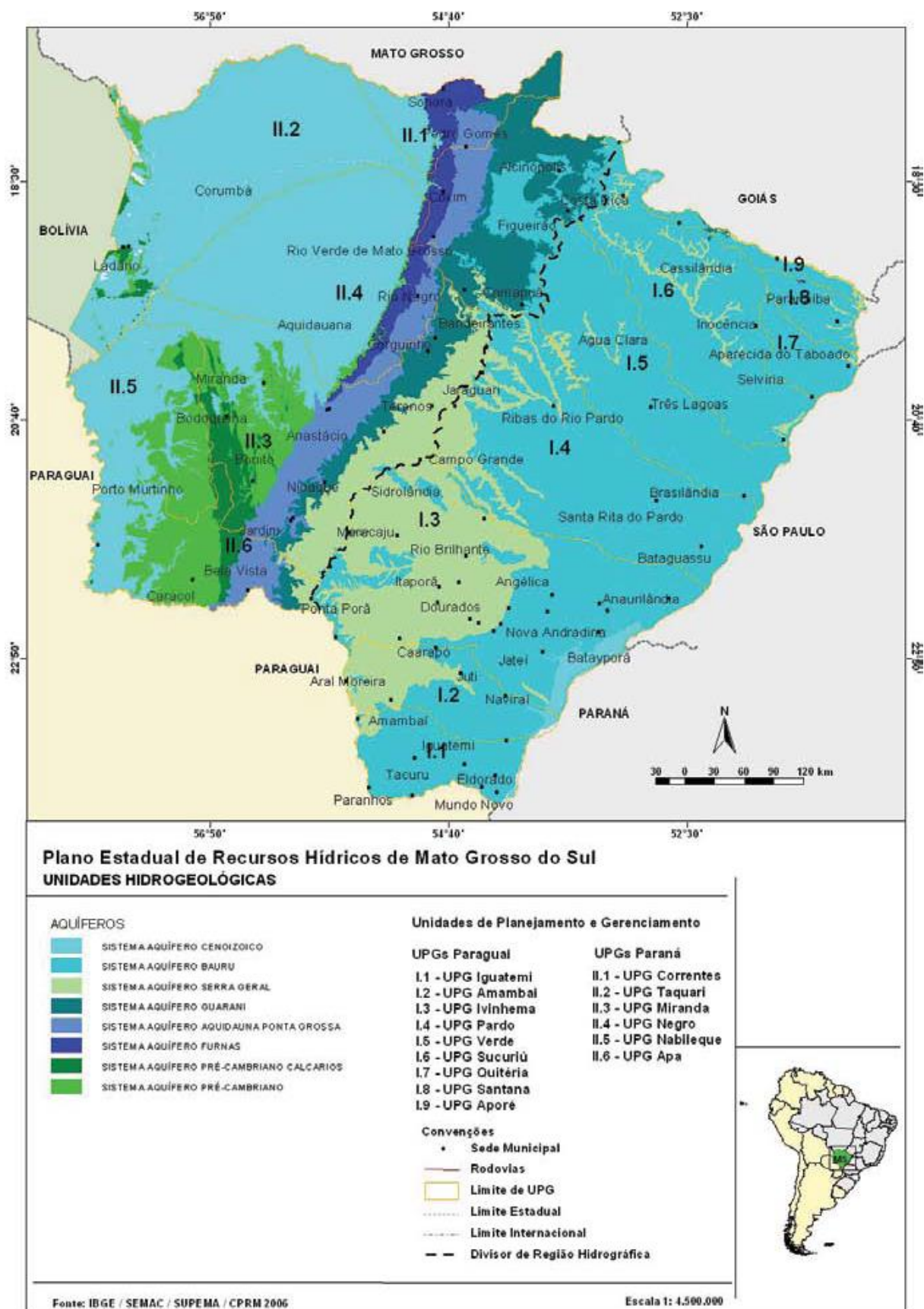


Figura 3. Áreas de afloramento dos sistemas aquíferos no Estado de Mato Grosso do Sul.
 Fonte: PEHR – MS (2010).

3.3. Considerações sobre a rede de esgoto em Campo Grande – MS

Os efluentes provenientes de esgotamento sanitário constituem fontes de contaminação por nitrato importantes para os sistemas aquíferos em regiões urbanas. Na cidade de Campo Grande – MS, alguns problemas diagnosticados nas regiões urbanas (regiões identificadas na Figura 4) foram apresentados no Plano Municipal de Saneamento Básico (PLANURB, 2013), sendo alguns destes mencionados a seguir:

- Anhanduizinho
 - Constante entupimento na rede de esgoto;
 - Esgoto emergente por problemas de fossas.
- Centro
 - Ligação clandestina de esgoto na rede de drenagem.
- Imbirussu
 - Ligação clandestina de esgoto na rede de drenagem;
 - Canalização de esgoto a céu aberto que deságua no córrego Sobradinho.
- Lagoa
 - Falta rede de esgoto em alguns bairros;
 - Fossas saturadas;
 - Lençol raso e fossas transbordam em dias de chuva.
- Segredo
 - Falta rede de esgoto em alguns bairros;
 - Esgoto coletado sendo jogado no Córrego Segredo.
- Bandeira
 - Transbordamento da rede pelas bocas de lobo quando chove (água pluvial na rede de esgoto);
 - Transbordamento de fossas quando chove.
- Prosa
 - Fossas vazando constantemente, gerando cheiro forte.
- Distrito Rochedinho
 - Não possui rede de esgoto.
- Distrito Anhanduí
 - Não possui rede de esgoto.

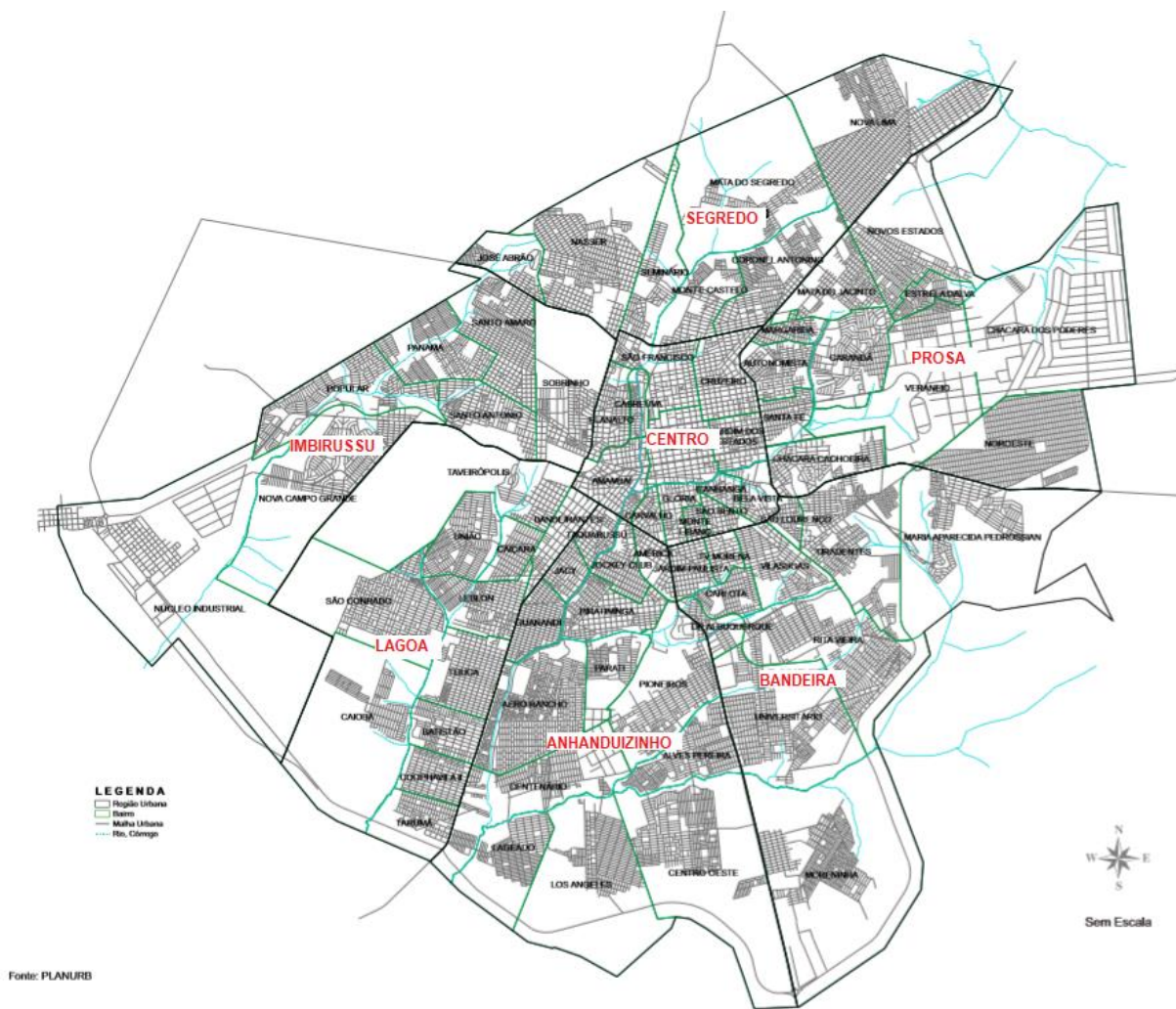


Figura 4. Regiões urbanas de Campo Grande – MS.
Fonte: Adaptado de PLANURB (2017).

Para caracterizar áreas que apresentam nível d'água muito próximo à superfície foi elaborada uma carta geotécnica para o município a qual divide a malha urbana em unidades homogêneas (Figura 5). Os terrenos localizados nessas áreas e que não possuem coleta de esgoto público apresentam sérios problemas de transbordamento de fossas em dias de chuva devendo ser priorizados quanto ao atendimento da rede de esgoto (PLANURB, 2013).

As áreas com Unidades Homogêneas III (A e B), indicadas nas cores rosa e vermelho respectivamente, são as áreas consideradas prioritárias por terem características como: nível de água muito próximo à superfície, baixa capacidade de suporte e carga, solos orgânicos ou moles, nível de água aflorante em épocas de chuva. As Unidades IV, em cor amarelo, são áreas em permanente estado de saturação em decorrência de terrenos alagadiços com nível da água muito raso ou aflorante (PLANURB, 2013).

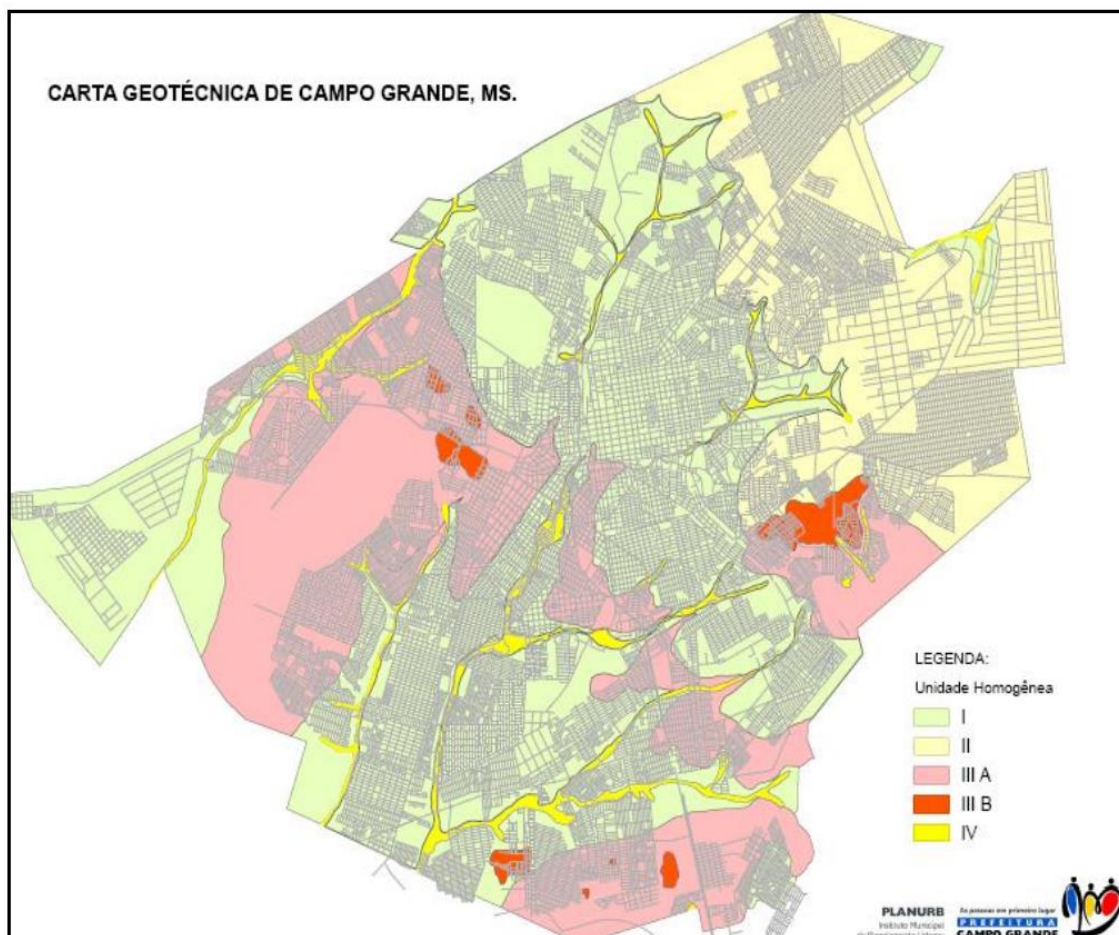


Figura 5. Carta Geotécnica de Campo Grande – MS.
Fonte: PLANURB (2013).

3.4. Valores de referência para nitrato

A Portaria nº. 2914 de 2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011), que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, define o valor máximo permitido (VMP) para substâncias químicas que representam risco à saúde. Para o nitrato, especificamente, o valor de VMP é 10 mg/L na forma de nitrogênio N (N-NO_3^-).

Este valor está em concordância com o valor indicado pela Organização Mundial da Saúde (OMS). De acordo com WHO (2016), o valor de referência para o nitrato em água de consumo é de 50 mg/L como íon nitrato (NO_3^-), equivalente a 11 mg/L de nitrato-nitrogênio. Este valor é baseado em estudos epidemiológicos, os quais evidenciaram ausência de efeitos adversos à saúde (metahemoglobinemia e efeitos na tireoide) para concentrações abaixo de 50 mg/L.

A metahemoglobinemia é agravada na presença de contaminação microbiana e subsequente infecção gastrointestinal, de forma que, as autoridades devem ficar mais vigilantes para garantir que a água de consumo seja microbiologicamente segura, principalmente quando as concentrações de nitrato ou nitrito estiverem próximas ou acima do valor de referência (WHO, 2016).

Além do valor estabelecido para nitrato pelo Ministério da Saúde, a Companhia Estadual do Estado de São Paulo (CETESB) adotou o valor de prevenção (VP) de 5 mg/L N-NO₃⁻, por suspeita de influência antrópica sobre a qualidade das águas subterrâneas a partir deste limite, recomendando-se nesses casos a tomada de ações de prevenção e controle (Varnier et al., 2019).

Valores de referência para nitrato também são estabelecidos para fins de enquadramento dos corpos de água no Brasil. A classificação dos corpos de água é estabelecida pela Resolução CONAMA nº. 357 de 2005 (Brasil, 2005), segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes. De acordo com esta resolução, as águas destinadas ao consumo humano podem ser enquadradas em:

- Classe especial: ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- Classe 1: ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- Classe 2: ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional.

A Resolução CONAMA nº. 357 de 2005 (Brasil, 2005) define os valores máximos dos parâmetros de qualidade para as classes dos corpos de água, sendo os valores máximos admitidos para as concentrações de nitrato iguais a 10,0 mg/L N para as classes 1 e 2.

3.5. Fontes de contaminação por nitrato em águas subterrâneas

Os íons nitrato (NO₃⁻) e nitrito (NO₂⁻) ocorrem naturalmente no meio ambiente e são produtos da oxidação do nitrogênio, como parte do ciclo requerido por todos os sistemas vivos para a produção de moléculas orgânicas complexas, como enzimas e outras proteínas. O nitrato é a forma mais estável de nitrogênio oxidado. Em condições anaeróbias e na presença de fontes de carbono, o nitrato pode ser reduzido por ação microbiana a nitrito, o qual é relativamente estável e moderadamente reativo (WHO, 2016).

As concentrações de nitrato em águas superficiais geralmente são baixas, da ordem de 0,18 mg/L a 4 mg/L como N-NO₃⁻, mas podem atingir níveis mais elevados como resultados de contaminações de origem antrópica (WHO, 2016). As principais fontes de nitrato e nitrito na água de origem antrópica são provenientes de atividades agrícolas, tratamento de águas

residuárias, produtos nitrogenados de resíduos humanos e resíduos de processos industriais e veículos automotivos (WHO, 2016).

As concentrações naturais de nitrato em águas subterrâneas dependem principalmente do tipo de solo e da situação geológica, e são em geral superiores às aquelas observadas em mananciais superficiais. O aumento do uso de fertilizantes, a disposição de resíduos (particularmente da criação de animais) e mudanças do uso do solo são os principais fatores responsáveis pelo aumento progressivo nos níveis de nitrato em águas subterrâneas, podendo originar concentrações da ordem de centenas de mg/L (WHO, 2016).

É importante ressaltar que a resposta das mudanças no uso do solo sobre a qualidade da água subterrânea pode ser demorada, de forma que alguns aquíferos “em alerta” demoram a apresentar um aumento nas concentrações de nitrato. No entanto, uma vez que o nitrato alcança estes aquíferos, eles poderão permanecer contaminados por décadas, mesmo que haja uma redução substancial na carga de nitrato da superfície (WHO, 2016).

Varnier et al. (2019) apresenta as principais fontes de contaminações em áreas rurais e em áreas urbanas, podendo constituir em poluição difusa ou multipontual:

- Áreas rurais (Figura 6):
 - Atividades agrícolas (manejo inadequado de fertilizantes nitrogenados, inorgânicos e orgânicos);
 - Criação de animais e armazenamento impróprio de seus dejetos;
 - Decomposição de resíduos orgânicos e fixação biológica;
 - Lagoas de efluentes;
 - Sistemas de saneamento *in situ* (fossas sépticas e negras).
- Áreas urbanas (Figura 7):
 - Disposição de resíduos sólidos (lixões e aterros sanitários mal construídos, em locais impróprios);
 - Sistemas de saneamento *in situ* (fossas sépticas e negras);
 - Vazamentos das redes coletoras de esgoto.

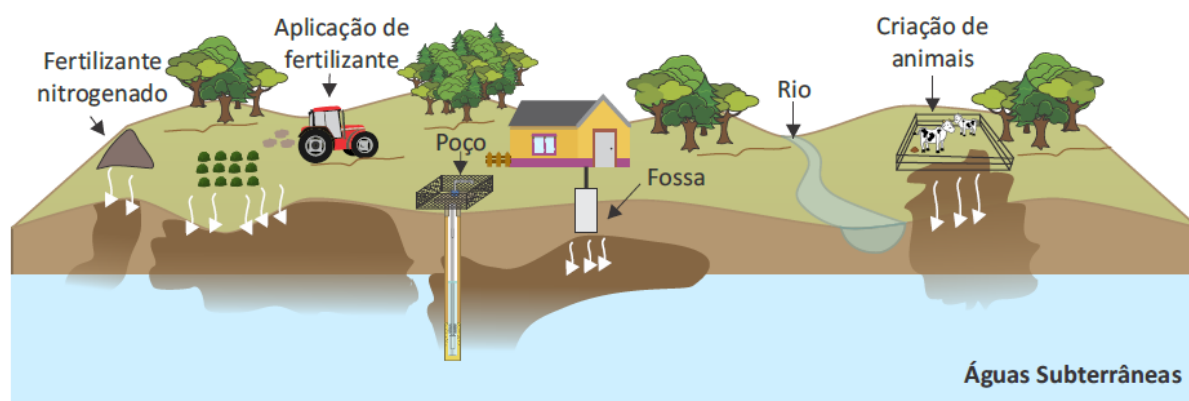


Figura 6. Fontes de contaminação por nitrato nas águas subterrâneas em áreas rurais.
Fonte: Varnier et al. (2019).



Figura 7. Fontes de contaminação por nitrato nas águas subterrâneas em áreas urbanas.
Fonte: Varnier et al. (2019).

3.6. Resultados para as concentrações de nitrato da literatura em Campo Grande – MS

Dois trabalhos recentes que estudaram as concentrações de diferentes parâmetros na cidade de Campo Grande – MS, incluindo o parâmetro nitrato, foram os trabalhos de Manzano (2018) e Cardoso (2019).

Cardoso (2019) apresentou resultados para a distribuição espacial das concentrações de nitrato a partir de dados de qualidade da água de 146 poços tubulares outorgados, utilizando o método de Ponderação pelo Inverso da Potência da Distância (IPD) – Figuras 8 a 11.

Analisando os dados apresentados por Cardoso (2019) nos laudos de outorga, verificou-se a seguinte distribuição percentual dos poços com concentrações de nitrato acima do valor de prevenção de 5 mg/L (em relação ao total de 28 poços em que essas concentrações foram verificadas): a) SAB – 4%; b) SASG – 75%; c) SAB e SASG – 7%; d) SAB e SAG – 7%; e)

SASG e SAG – 7% (sendo: SAB Sistema Aquífero Bauru; SASG Sistema Aquífero Serra Geral; SAG Sistema Aquífero Guarani). Os dados de Cardoso (2019) foram utilizados no presente trabalho, sendo as concentrações dos parâmetros melhor discutidas na seção 5.2 do presente documento.

De acordo com Cardoso (2019), as possíveis fontes de contaminação por nitrato em Campo Grande são diversas, podendo ser derivadas de vazamentos na rede de esgoto, contaminação por meio da contribuição da água dos afluentes do rio Anhanduí aos aquíferos SAB e SASG, fossas sépticas, fertilizantes nitrogenados e usos antrópicos em geral.

Além disso, Cardoso (2019) ressaltou a importância de maior atenção para os poços próximos aos córregos por apresentarem concentrações elevadas de nitrato, sugerindo evitar perfurações próximas aos córregos de no mínimo 200 metros a fim de evitar a interação entre a água subterrânea e superficial. O autor também alertou para a necessidade de lajes de proteção em todos os poços.

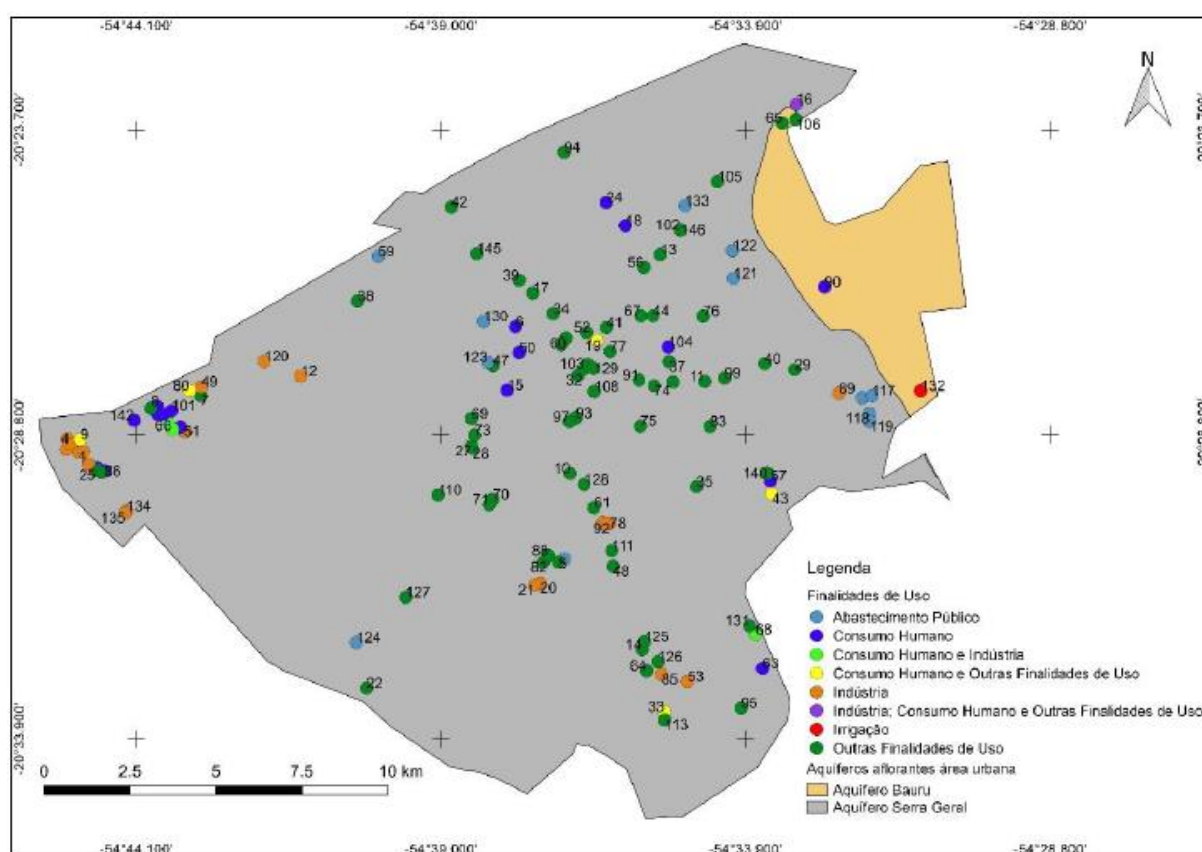


Figura 8. Delimitação do perímetro urbano do município de Campo Grande - MS, poços outorgados, finalidades de usos e aquíferos aflorantes.

Fonte: Cardoso (2019).

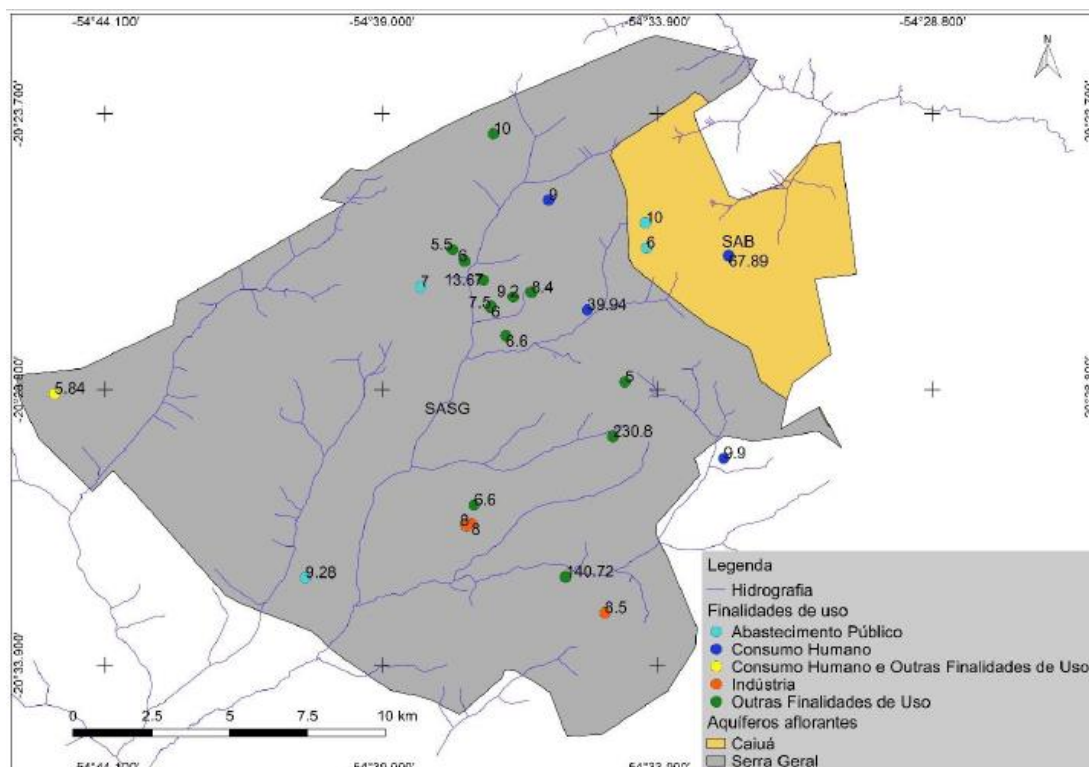


Figura 9. Concentrações de nitrato iguais ou maiores que 5 mg L^{-1} dos poços outorgados no município de Campo Grande – MS, finalidades de uso e aquíferos aflorantes.
Fonte: Cardoso (2019).

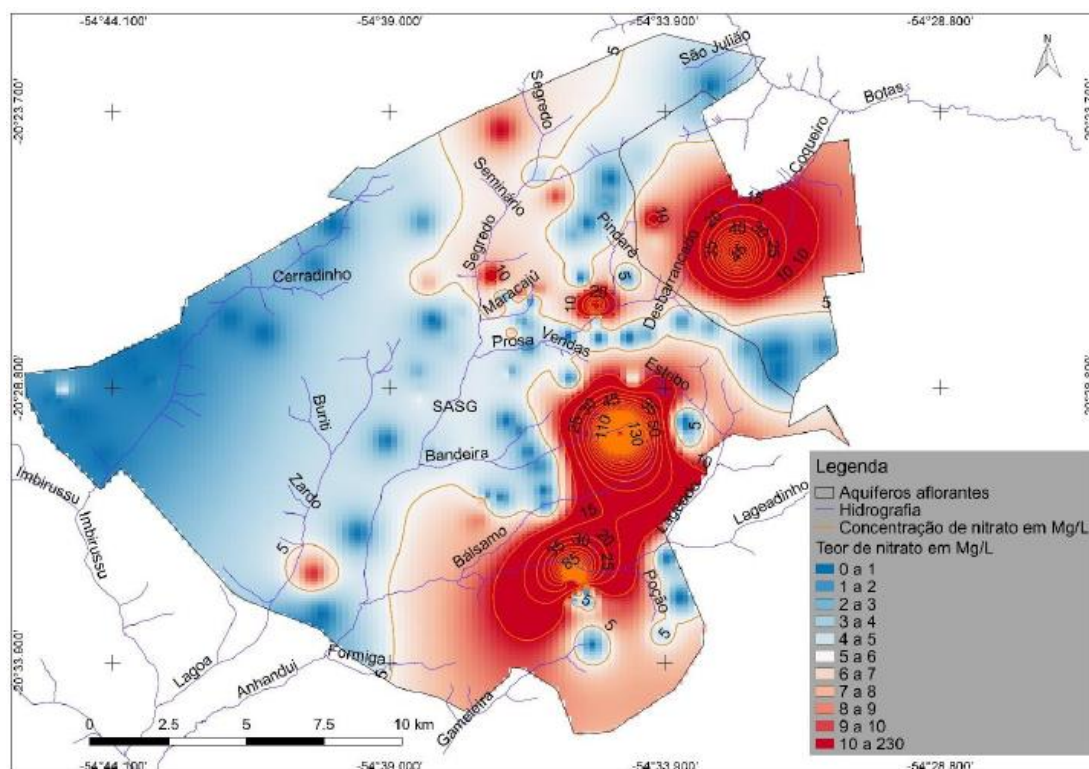


Figura 10. Mapa da concentração de nitrato dos poços outorgados na área urbana do município de Campo Grande – MS, conforme VMP.
Fonte: Cardoso (2019).

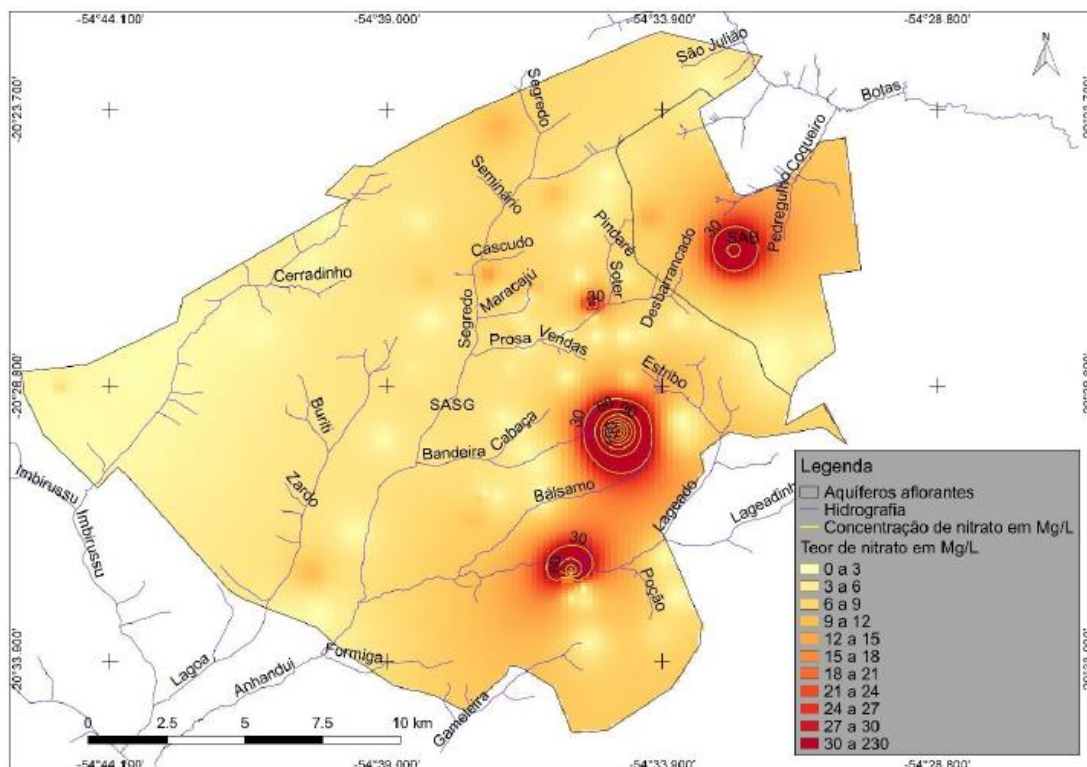


Figura 11. Resultados de Cardoso (2019) para as concentrações de nitrato de acordo com método de interpolação IPD.
Fonte: Cardoso (2019).

Manzano (2018) analisou parâmetros químicos de 108 poços tubulares profundos e dados de potenciometria de 130 poços tubulares em Campo Grande, que captam água de três sistemas aquíferos SAB, SAG e SASG, sendo que somente o SAG apresentou ausência de contaminações por nitrato. Segundo Manzano (2018), como o SAG encontra-se confinado e possui profundidades médias de 250 m, este aquífero está menos sujeito às contaminações de fontes antrópicas.

A análise das concentrações de nitrato para os poços tubulares que exploram o SAB referentes ao ano de 2016, apresentados na dissertação de Manzano (2018), mostrou que 39% do total de 23 poços apresentaram concentrações maiores que 5 mg/L, e 9% dos poços com concentrações maiores que 10 mg/L (N-NO_3^-). A concentração máxima verificada foi de 12,4 mg/L N-NO_3^- e média foi de 3,89 mg/L N-NO_3^- .

Para os poços tubulares que exploram o SASG (com dados de análise química referente ao ano de 2016), verificou-se que de um total de 64 poços, 45% e 13% dos poços apresentaram concentrações de nitrato maiores que 5 mg/L e 10 mg/L (N-NO_3^-), respectivamente. A concentração máxima foi de 26,2 mg/L e a média foi de 5,45 mg/L.

Manzano (2018) também avaliou dados de monitoramento para nitrato para o período de 2011 a 2016. Constatou-se um aumento nas concentrações verificadas na região nordeste do município para o SAB, que antes apresentavam valores inferiores a 5 mg/L, passaram a apresentar valores entre 5 e 10 mg/L N-NO₃⁻. De acordo com Manzano (2018), esse aumento possivelmente está relacionado ao aumento populacional nessa região da cidade, como mostrado na Figura 12. Para o SASG, foram observadas duas localidades com altas concentrações de nitrato, uma a norte representada por um conjunto de três poços, e a outra a sudeste representada por um poço (Manzano, 2018).

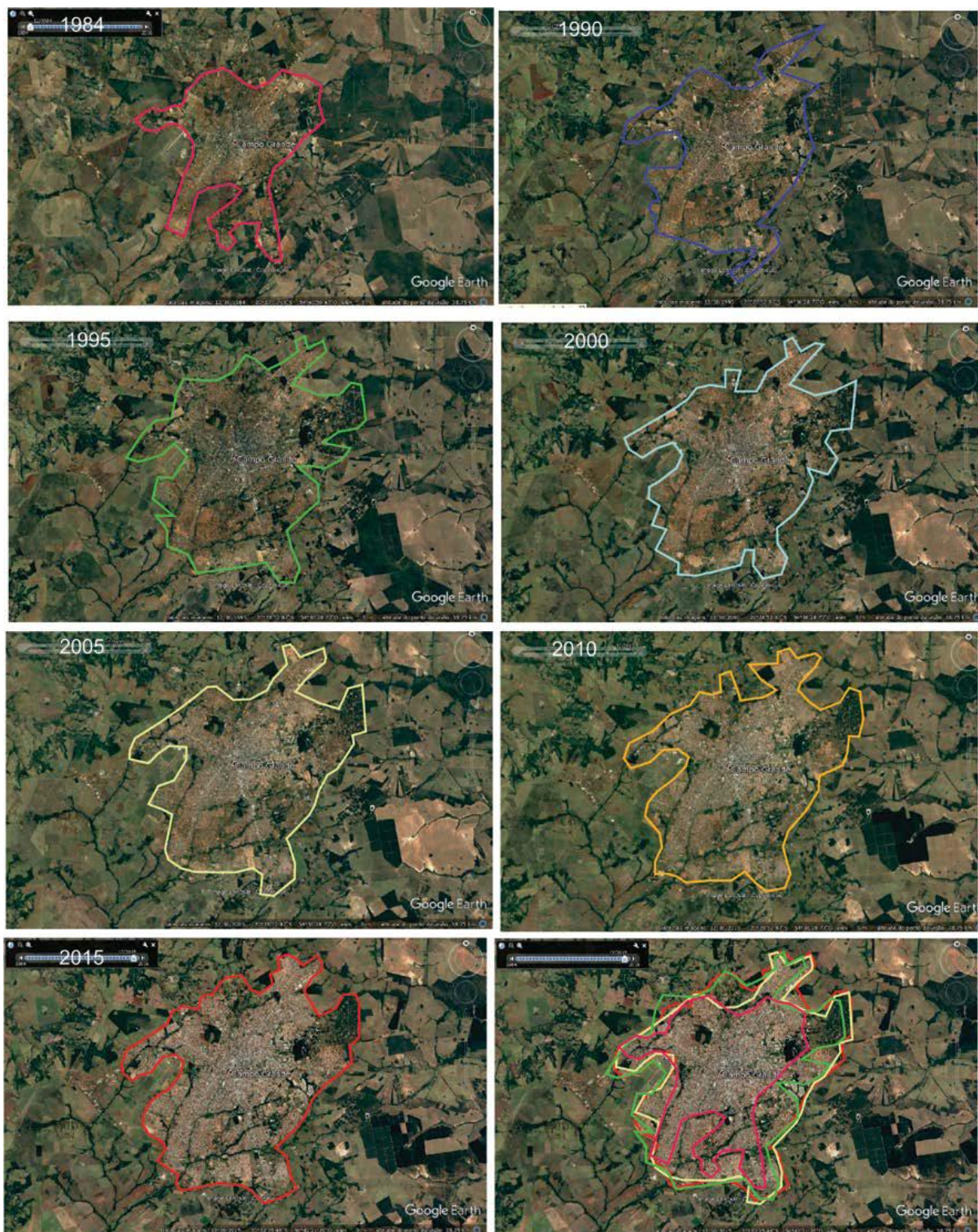


Figura 12. Evolução da malha urbana em Campo Grande entre os anos de 1984 e 2015.
Fonte: Manzano (2018).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

Campo Grande é a capital do estado de Mato Grosso do Sul e localiza-se na porção central do estado, com coordenadas geográficas: Latitude 20,45 Sul e Longitude 54,62 Oeste, e a uma altitude média de 530 m acima do nível do mar (EMBRAPA, 2020). O estado, por sua vez, está localizado na região Centro-Oeste do Brasil.

O município possui uma área territorial 8.092,951 km² (referência ano de 2018), população estimada de 895.982 habitantes em 2019 (IBGE, 2020), e é composto por 74 bairros divididos em 9 regiões: Segredo, Prosa, Bandeira, Anhanduizinho, Lagoa, Imbirussu, Centro, Anhanduê e Rochedinho (PLANURB, 2007).

De acordo com PLANURB (2007), quase a totalidade da população tem acesso à água encanada (95,8% em 2000), à energia elétrica (99,8% em 2000), e à coleta de lixo urbano (98,2% em 2000). Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), no ano de 2010, 58,7% de domicílios do município apresentavam esgotamento sanitário adequado (isto é, com instalações não compartilhadas com outro domicílio e com escoamento através de fossa séptica ou rede geral de esgoto), e 33,4% dos domicílios urbanos em vias públicas apresentavam urbanização adequada, com presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio.

A cidade de Campo Grande – MS está situada na faixa de transição entre o clima mesotérmico sem estiagem (subtipo Cfa, segundo a classificação de Köppen) e o tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno (subtipo Aw, segundo a classificação de Köppen) – (INPE, 2020; EMBRAPA apud PLANURB, 2007). O bioma da cidade é o cerrado (IGBE, 2020).

As médias mensais de temperaturas, precipitação e umidade relativa são apresentadas na Tabela 1. O período chuvoso compreende os meses de outubro a março, sendo a média de temperaturas máximas em torno de 25°C neste período. Os meses de menor precipitação são: junho, julho e agosto, com temperatura média de 20°C. A média de precipitação total anual é de 1225 mm. O mês mais frio é junho, apresentando valores médios próximos a 19°C. O mês com menor umidade relativa é o mês de agosto (INPE, 2020; EMBRAPA apud PLANURB, 2007).

Tabela 1. Médias mensais de temperaturas, precipitação e umidade relativa para a cidade de Campo Grande – MS.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
Temperatura máxima (°C)	30,1	30,4	30,2	29,2	27,1	26,7	28,1	29,0	29,8	30,6	30,4	29,8
Temperatura mínima (°C)	20,4	20,1	19,9	18,5	16,0	14,7	14,5	16,0	17,5	18,9	19,5	20,3
Temperatura média (°C)	24,6	24,5	24,2	22,6	20,9	19,4	20,3	21,3	22,5	24,2	24,2	24,3
Precipitação média (mm)	235	170	150	120	100	35	40	30	75	145	210	220
Umidade relativa (%)	81	81	78	78	75	72	66	59	63	68	72	81

Fonte: INPE (2020).

Os tipos de solo predominantes na cidade de Campo Grande – MS são o Latossolo Vermelho Escuro, Latossolos Roxo, Areias Quartzosas não Hidromórficas (INPE, 2020). A cidade de Campo Grande insere-se na compartimentação geotectônica da Bacia Sedimentar do Paraná e nas unidades Formação Serra Geral do Grupo São Bento e no Grupo Caiuá (Lacerda Filho et al., 2006). A Formação Serra Geral possui entre 100 e 300 m de espessura em Campo Grande.

- Formação Serra Geral: “o litótipo principal é basalto, preto a cinza escuro, fino a afanítico, maciço e com raras amígdalas (geralmente preenchidas por argilo-minerais, quartzo ou calcita). Os afloramentos são em forma de estruturas colunares, geralmente desagregadas em blocos e matacões arredondados, exibindo estrutura do tipo esfoliação esferoidal e superfície amarelo-esverdeada” (Lacerda Filho et al., 2006).
- Grupo Caiuá: “composto de arenitos arcoseanos vermelhos a roxos, bimodais (muito finos e grossos), com grãos angulosos a sub-arredondados, na fração fina e, arredondados na fração grossa, com esfericidade variável. A seleção é boa na fração fina e moderada a boa nas frações média a grossa. A estrutura sedimentar predominante são estratificações cruzadas tangenciais de pequeno a grande porte e, secundariamente, laminação plano paralela. O ambiente de deposição é interpretado como fluvial na base e eólico no topo”. (Ianhez et al., 1983 apud Lacerda Filho et al., 2006).

4.2. Análise e métodos geoestatísticos

A geoestatística se refere a um conjunto de procedimentos estatísticos utilizados para descrever a correlação de variáveis aleatórias espacialmente distribuídas (variáveis regionalizadas) e para realizar a interpolação e estimativa (Cooper & Istok, 1988).

A geoestatística é uma ferramenta potencial para a análise de uma pluma de contaminação em água subterrânea, uma vez que podem ser estimadas concentrações de contaminantes em pontos sem amostragem na pluma. Apresenta-se a seguir uma breve revisão dos elementos essenciais da teoria da geoestatística.

4.2.1. Variáveis regionalizadas

A geoestatística é um ramo da estatística que utiliza variáveis regionalizadas (VRs) ao invés de variáveis aleatórias (VAs) - (Rocha, 2019). A VR pode ser definida como uma função real que recebe valores exatos em cada ponto do espaço, de forma que a VR reconhece a posição relativa entre as amostras (Matheron, 1963 apud Rocha, 2019). As variáveis aleatórias, assim como as estatísticas descritivas, consideram suas realizações como eventos independentes, preocupando-se apenas com os valores (realizações). Porém, ao considerar as posições relativas de cada realização, uma VA também pode ser considerada como variável regionalizada (Rocha, 2019).

Considerando uma pluma de contaminação de água subterrânea na qual um conjunto de valores $[Z(x_1), \dots, Z(x_n)]$ de um contaminante tenham sido medidos nos pontos $x_1 \dots x_n$, sendo x_i um ponto em geral tridimensional no espaço. A variável $Z(x)$ recebe a designação de VR, porque o conjunto de variáveis medidas é distribuído no espaço, onde Z é a variável e x é a notação reduzida para um ponto no espaço com coordenadas e cota (Cooper & Istok, 1988; Rocha, 2019).

As variáveis regionalizadas, além da localização, reconhecem as características de suporte, continuidade e anisotropia (Rocha, 2019):

- Suporte: considera o volume da unidade amostral, sua geometria, tamanho e orientação;
- Continuidade: uma VR pode apresentar maior ou menor estabilidade na continuidade de variação espacial;
- Anisotropia: representa a diferença de comportamentos espaciais para cada direção de análise.

4.2.2. Semivariograma experimental

A *variância espacial* é uma medida que leva em conta a dispersão de valores de pares de pontos (amostras) separados por um vetor \mathbf{h} ($\mathbf{h} = x_i - x_{i+1}$), alinhados segundo uma direção pré-estabelecida. A função gráfica que relaciona a variância espacial com a distância, para determinada direção de análise, é chamada de *variograma* e constitui a ferramenta básica da geoestatística, a partir do qual todas as inferências necessárias às estimativas são realizadas (Rocha, 2019).

Para utilizar a geoestatística, a hipótese intrínseca deve ser assumida como verdadeira. De acordo com essa hipótese, quando o domínio apresenta variograma, este é válido em todas as regiões do campo e o valor da variância espacial será sempre o mesmo desde que os pontos estejam separados por uma mesma distância, em uma mesma direção (Rocha, 2019).

A função *variograma experimental* não depende da posição dos pares de pontos x_i e x_{i+1} onde as medidas foram feitas, mas somente do vetor \mathbf{h} que os separa e é definida como a diferença quadrática média entre dois valores de atributos separados pelo vetor \mathbf{h} (Cooper & Istok, 1988; Deutsch & Journel, 1997; Rocha, 2019):

$$2\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + \mathbf{h})]^2$$

em que: $2\gamma(\mathbf{h})$ é a variância espacial; $Z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto de coordenadas E, N e cota; $Z(x_i + \mathbf{h})$ é o valor da variável regionalizada no ponto de coordenadas E, N e cota adicionado do vetor distância \mathbf{h} ; e n é o número de pares de pontos encontrados para aquela distância. Para a aplicação do cálculo de variogramas, define-se uma tolerância (*lag*) para o vetor de separação \mathbf{h} .

A função $\gamma(\mathbf{h})$ é a forma do variograma mais usada na prática e é chamada de *semivariograma*, sendo este definido como a metade da diferença quadrática média entre dois valores de atributos separados pelo vetor \mathbf{h} :

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + \mathbf{h})]^2$$

De acordo com Journel e Huijbregts (1978) apud Cooper e Istok (1988) existem algumas restrições práticas para estimar o semivariograma de um conjunto de valores amostrados. Essas regras estabelecem a quantidade mínima dos pares de amostras e a magnitude máxima do vetor \mathbf{h} para o qual o semivariograma pode ser estimado a partir de um conjunto de dados amostrais, como (no texto em diante, será utilizado variograma e semivariograma como sinônimos):

$$N(\mathbf{h}) > 30-50$$

$$|\mathbf{h}| = \frac{L}{2}$$

em que: $|\mathbf{h}|$ é a magnitude do vetor de separação \mathbf{h} ; e L é a maior dimensão (na direção de \mathbf{h}) da pluma de contaminantes.

A restrição para $|\mathbf{h}|$ tem implicações importantes para o procedimento de estimativa (krigagem), pois uma vez que o variograma experimental não pode ser calculado para valores de $|\mathbf{h}|$ maiores que $L/2$, quaisquer estimativas feitas com o modelo de variograma estão restritas a $|\mathbf{h}|$ menor que $L/2$ (Cooper & Istok, 1988).

Os variogramas possuem alguns comportamentos específicos, a partir dos quais algumas características são observadas (Rocha, 2019) – Figura 13:

- Efeito pepita (C_0): é a descontinuidade próxima à origem do variograma e representa o valor de variância espacial para distâncias que tendem a zero;
- Variância espacial (C): intervalo crescente da variância espacial entre o efeito pepita e o patamar;
- Patamar: é o valor máximo de variância espacial que os dados apresentam, dado pela soma de C_0 com C ;
- Amplitude (a): é a distância máxima onde se consegue estabelecer alguma dependência espacial entre pares de pontos; marca a saída do campo estruturado e entrada no campo aleatório;
- Campo estruturado: região do variograma com distâncias menores do que a , onde há dependência espacial entre pares de pontos;
- Campo aleatório: região do variograma com distâncias maiores do que a , onde não há mais dependência espacial entre pares de pontos; o variograma estabiliza no patamar.

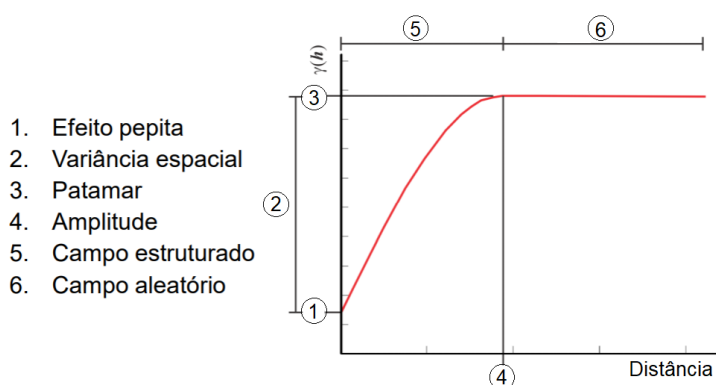


Figura 13. Características dos variogramas.
Fonte: Adaptado de Rocha (2019).

Próximo à origem de um variograma, podem ser observados comportamentos do tipo linear, parabólico, efeito pepita e um caso extremo de efeito pepita puro, como podem ser observados na Figura 14.

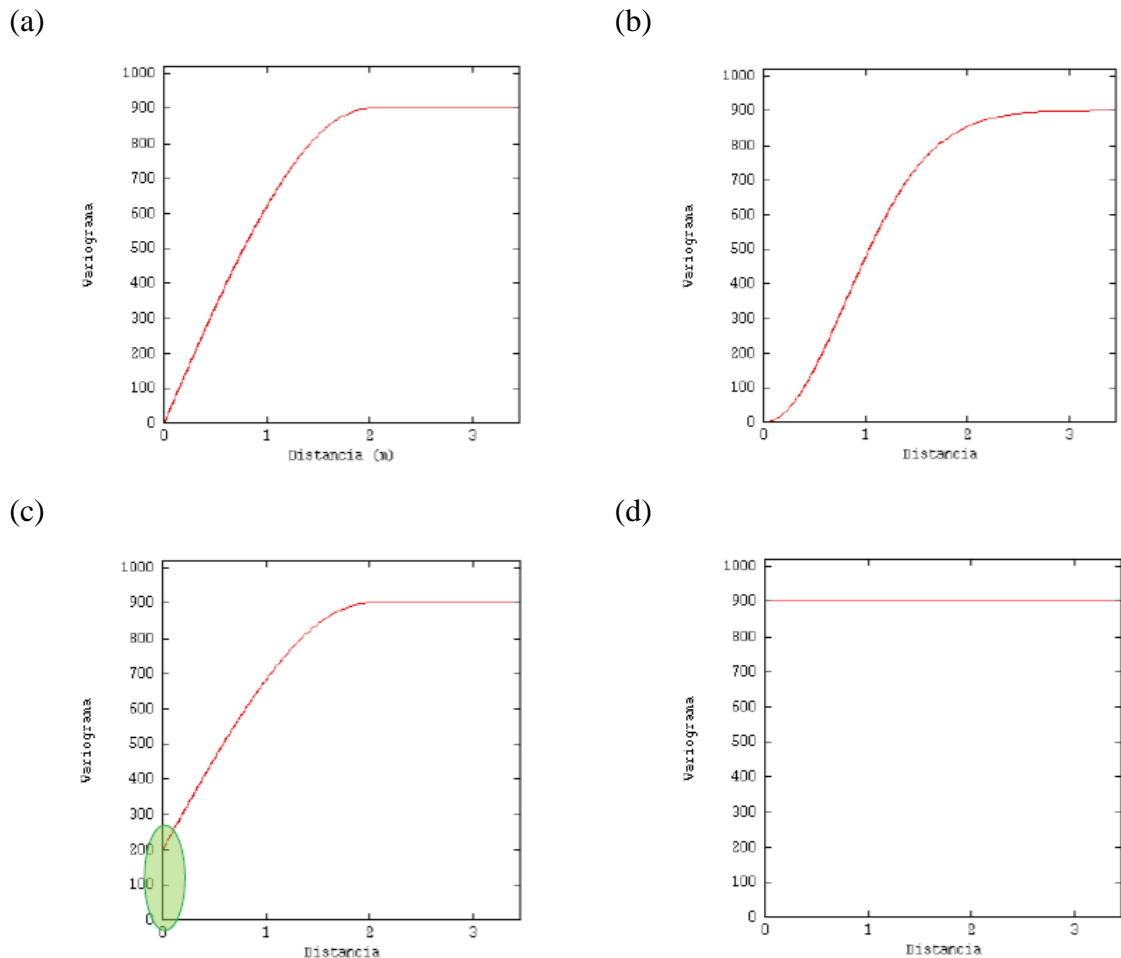


Figura 14. Comportamento do variograma próximo à origem: (a) linear; (b) parabólico; (c) efeito pepita, indicado em verde; (d) efeito pepita puro.

Fonte: Rocha (2019).

4.2.3. Modelagem de variograma

A função semivariograma experimental é uma função matemática discreta, isto é, os valores das variâncias espaciais são conhecidos apenas para distâncias preestabelecidas. Ajustando-se um modelo matemático (ou modelo teórico) ao semivariograma experimental, que é uma função contínua, é possível definir a variância espacial para toda e qualquer distância no domínio (Rocha, 2019).

Alguns dos modelos mais comumente utilizados são os modelos esférico, exponencial e gaussiano (Figura 15), cujas equações são apresentadas a seguir, sendo C_0 o efeito pepita; C a variância espacial; a a amplitude. Estes modelos teóricos geralmente são ajustados de maneira iterativa utilizando softwares que possuam tais funções matemáticas (Rocha, 2019).

- Modelo esférico:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$$

- Modelo exponencial:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{h}{a} \right) \right] \right\} & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$$

- Modelo gaussiano:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$$

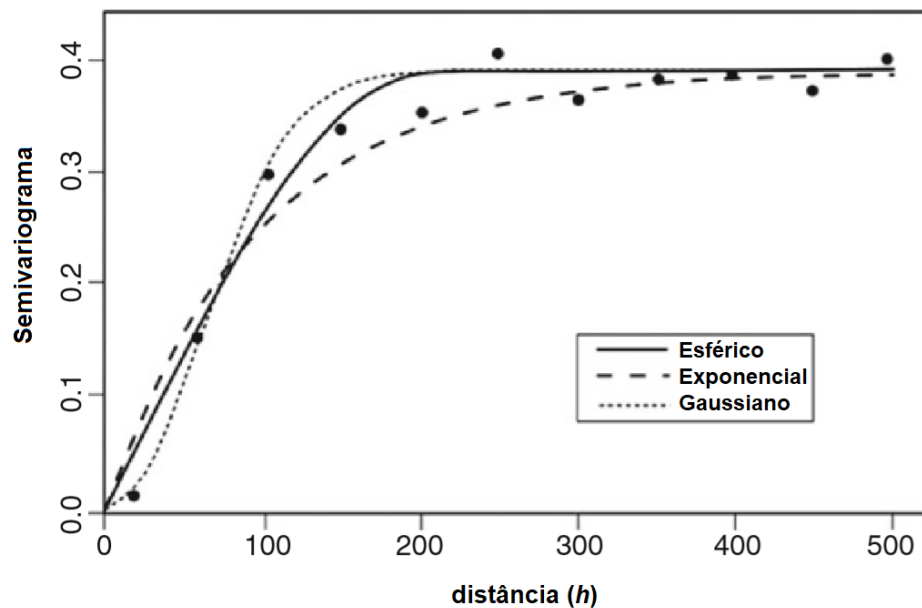


Figura 15. Exemplos de modelos usuais de variogramas.

Fonte: Adaptado de Sarkar (2019).

O procedimento de ajuste de um modelo matemático a um semivariograma experimental consiste em várias etapas. Estimativas preliminares dos parâmetros do modelo (por exemplo, a e C) podem ser obtidas por análise visual ou pelo método de mínimos quadrados ponderado. O procedimento de ajuste pode ser orientado pelo conhecimento das propriedades físicas do contaminante, da pluma, do aquífero e dos padrões de escoamento de água subterrânea locais.

Por exemplo, a anisotropia (variâncias espaciais diferentes para diferentes direções de análise) pode ocorrer em virtude do transporte advectivo e dispersivo das substâncias na direção do escoamento da água subterrânea. O tipo de modelo teórico a utilizar para o ajuste é interpretado a partir do semivariograma experimental. Quando houver ambiguidade em relação à seleção do modelo, o melhor modelo pode ser determinado pelo procedimento de validação cruzada (Cooper & Istok, 1988).

4.2.4. Validação cruzada

A validação cruzada consiste em uma estimativa por krigagem pontual (técnica de estimativa geoestatística que será detalhada no próximo item) onde somente serão estimados locais que tenham sido previamente amostrados. Para isso, mascara-se da base de dados o valor que a amostra apresenta e estima-se a sua localização baseada no modelo teórico de variograma e nos parâmetros de vizinhança definidos. O objetivo da validação cruzada é aferir a qualidade do ajuste do modelo teórico de variograma e definir os melhores parâmetros de vizinhança (Rocha, 2019).

A interpretação da técnica de validação cruzada é realizada através da comparação entre valores estimados e valores reais para todos os pontos de amostragem, validando o modelo teórico de variograma. Para a análise, são calculados o erro médio quadrático (MSE) e a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), definidos pelas seguintes equações (Cooper & Istok, 1988):

$$MSE = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z^*(x_i) - Z(X_i)]^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z^*(x_i) - Z(X_i)]^2}$$

em que: $Z^*(x_i)$ é o valor estimado em x_i ; $Z(X_i)$ é o valor medido em x_i ; $N(h)$ é o número de pares ordenados.

A escolha do modelo é otimizada encontrando-se o modelo com os valores mínimos de MSE ou $RMSE$. Além disso, como regra prática, o MSE deve ser menor que a variância dos dados amostrais, isto é, $MSE < s^2$, em que s^2 é a variância dos dados (Cooper & Istok, 1988).

4.2.5. Técnica de krigagem

As estimativas das densidades de contaminante desconhecidas são realizadas pelo método de krigagem, podendo ser feitas em malhas de blocos ou de pontos regulares (Cooper & Istok, 1988; Rocha, 2019).

O estimador da krigagem ordinária é um interpolador linear exato e é definido como:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

em que: $Z^*(x_0)$ é o valor estimado no ponto x_0 ; $Z(x_i)$ são as amostras utilizadas para a estimativa; e λ_i são os ponderadores (pesos da krigagem) cuja somatória deve ser restrita a 1.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Para minimizar a variância da estimativa (ou erro de estimativa) são utilizadas técnicas lagrangeanas. A otimização da solução é encontrada a partir de um sistema de equações lineares (com $n + 1$ equações lineares e $n + 1$ incógnitas), como (Cooper & Istok, 1988):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i; x_j) + \mu = \gamma(x_0; x_i) & \text{para } i; j = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases}$$

em que: μ é o multiplicador de Lagrange.

A solução deste sistema resulta em n valores para os ponderadores e um valor para o multiplicador de Lagrange, μ (Cooper & Istok, 1988).

5. RESULTADOS

5.1. Análises dos dados

Os dados de qualidade da água subterrânea utilizados no presente trabalho foram obtidos da dissertação de Cardoso (2019), que utilizou como base de dados os documentos de poços outorgados na cidade de Campo Grande – MS registrados no Sistema IMASUL de Registros e Informações Estratégicas do Meio Ambiente (SIRIEMA), do Instituto do Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL), entre os anos de 2015 e 2018. O acesso aos dados foi autorizado pelo Instituto, mantendo-se o sigilo das pessoas físicas ou jurídicas.

A quantidade total de poços outorgados foi de 146, sendo 18 deles localizados em área rural e 128 em área urbana (Figura 16) com dados de amostras de água apresentados nos laudos de outorga entre as datas 20/10/2015 e 24/09/2018. As finalidades de uso dos poços outorgados são diversas, tais como: indústria, abastecimento público, consumo humano, dessedentação animal, mineração, irrigação e outros.

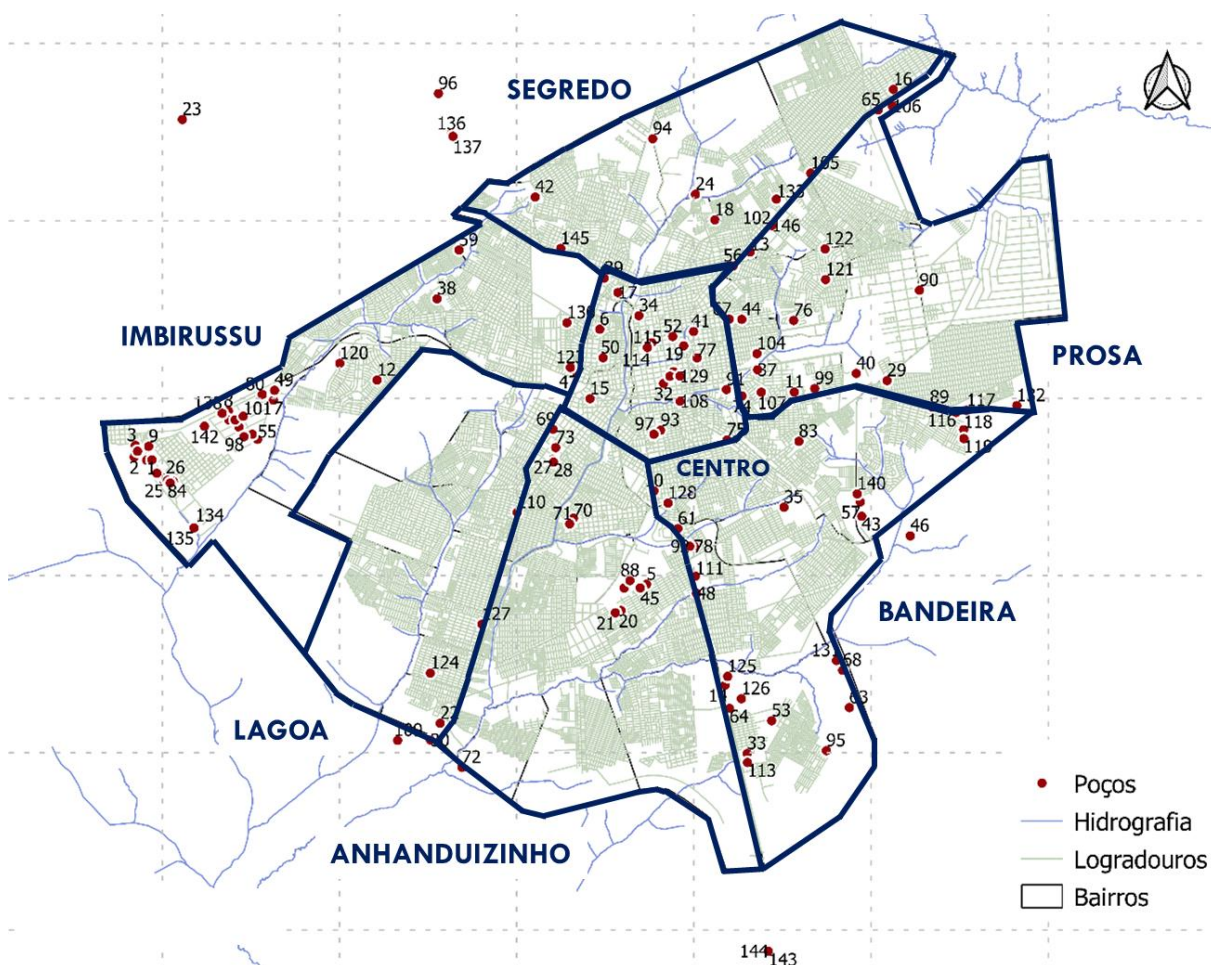


Figura 16. Regiões urbanas e localização dos poços outorgados.
Fonte: Própria.

Os sistemas aquíferos explorados são o Sistema Aquífero Bauru (SAB), Sistema Aquífero Guarani (SAG) e Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), sendo que, 126 poços apresentam como aquífero aflorante o SASG e 20 poços, o SAB.

O nível estático dos poços variou conforme apresentado na Tabela 2. O maior nível estático foi de 166 m. A maior vazão de estabilização dos poços tubulares outorgados foi de 303 m³/h (Tabela 3).

Tabela 2. Distribuição do nível estático dos poços tubulares outorgados.

Nível estático (N.E.) (m)	Número de poços	Quantidade percentual
N.E. ≤ 5	9	6%
$5 < \text{N.E.} \leq 10$	34	23%
$10 < \text{N.E.} \leq 20$	50	34%
$20 < \text{N.E.} \leq 30$	19	13%
$30 < \text{N.E.} \leq 50$	8	5%
$50 < \text{N.E.} \leq 100$	12	8%
N.E. > 100	14	10%

Fonte: Própria.

Tabela 3. Distribuição das vazões de estabilização dos poços tubulares outorgados.

Vazões de estabilização (Q) (m ³ /h)	Número de poços	Quantidade percentual
$Q \leq 5$	48	33%
$5 < Q \leq 10$	44	30%
$10 < Q \leq 20$	22	15%
$20 < Q \leq 30$	10	7%
$30 < Q \leq 50$	11	8%
$50 < Q \leq 100$	6	4%
$Q > 100$	5	3%

Fonte: Própria.

Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos apresentados nos relatórios dos processos de outorga compreendem: pH, dureza total, nitrato, nitrito, fluoreto, sulfato, sódio, cloreto, ferro total, alcalinidade total, temperatura, sólidos totais dissolvidos, turbidez, cor, condutividade elétrica, coliformes termotolerantes, coliformes totais, *Escherichia coli*. As análises físico-químicas e microbiológicas foram feitas utilizando metodologias diversas, conforme os métodos adotados em cada laboratório.

Além das análises de água contidas nos relatórios para outorga de direito de uso da água, também foram apresentados na dissertação de Cardoso (2019), resultados de análises físico-

químicas de monitoramento, os quais são inseridos anualmente junto à Declaração de Uso de Recursos Hídricos (DURH) do IMASUL.

As análises de monitoramento qualitativo de três poços localizados em um mesmo empreendimento industrial apresentaram concentrações de nitrato acima de 10 mg/L, valor este definido como VMP pela Portaria nº. 2914 de 2011 do Ministério da Saúde (que não haviam sido identificados nas análises para outorga), evidenciando, portanto, a ocorrência de contaminação pontual da água subterrânea dentro do período de um ano. Esses poços apresentaram concentrações de nitrato de 1,2; 0,9 e 0,8 mg/L nas análises para outorga e de 19,9; 26,3 e 11,4 mg/L nas análises de monitoramento (Cardoso, 2019).

Analizando os dados apresentados para solicitação de outorga, 26 poços apresentaram concentrações acima de 5 mg/L (VP), e 5 poços acima de 10 mg/L (VMP). As análises de monitoramento evidenciaram concentrações maiores que 10 mg/L em mais 3 poços.

5.2. Concentrações dos parâmetros de qualidade da água

Segundo Cardoso (2019), os 146 pontos de captações subterrâneas outorgadas destinam-se a finalidades de uso diversas, conforme distribuição a seguir (ver Figura 8 da seção 3.6):

- 1 poço para dessedentação animal e consumo humano (0,7%);
- 3 poços para finalidade de uso mineração (2,1%);
- 12 poços para abastecimento público (8,2%);
- 26 poços para finalidade de uso industrial (17,8%);
- 19 poços para finalidade de consumo humano (13,0%);
- 9 poços para finalidade de consumo humano e outras finalidades de uso (6,2%);
- 1 poço para irrigação (0,7%);
- 1 poço para indústria, consumo humano e outras finalidades (0,7%);
- 74 poços (50,6%) destinados a outras finalidades de uso (50,7%).

Pela análise das Figuras 17 (e Figura 9 da seção 3.6) observa-se que alguns dos poços com concentrações acima de 5 mg/L são utilizados como fonte de abastecimento para consumo humano, o que gera uma preocupação quanto à saúde da população que utiliza essa água.

A distribuição do parâmetro nitrato é assimétrica positiva (Figura 18), os valores de maior frequência estão entre 0 e 5 mg/L para o nitrato, e o valor médio é igual a 5,68 mg/L para N-NO_3^- (Tabela 4). O valor mínimo indicado na tabela é o limite de detecção da análise.

Tabela 4. Estatísticas descritivas das concentrações de nitrato.

Parâmetro	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio-padrão	Coefficiente de Curtose	Coefficiente de Assimetria
Nitrato	5,68	1,00	230,80	0,001	23,48	69,04	7,97

Fonte: Própria.

Do total de 146 poços, 67 possuem laudos apresentados para outorga e para monitoramento, sendo a comparação entre as concentrações apresentada na Figura 19. Deste total, 40 poços apresentaram concentrações na data da outorga maiores que as concentrações de monitoramento, sendo a maior diferença observada para o poço de ID35, com 230 mg/L N-NO₃⁻ no laudo de outorga (não representada na Figura 19) e 0,6 mg/L no laudo de monitoramento. Dos 27 poços que apresentaram maiores concentrações nos laudos de monitoramento, as diferenças mais significativas foram verificadas nos poços de ID 37, 78, 79, 92 e 93. Como discutido por Cardoso (2018), os poços de ID 78, 79 e 92 localizam-se na região de uma mesma indústria, indicando possivelmente uma contaminação industrial pontual durante o período de um ano desde a outorga.

No estudo de Cardoso (2019) também foram verificadas contaminações em alguns poços que exploram o SAG, diferentemente do que foi observado por Manzano (2018), o qual analisou outro conjunto de dados. É importante salientar que a contaminação desses poços que exploram o SAG pode ser agravada por meio da contaminação cruzada pelo revestimento não adequado dos poços.

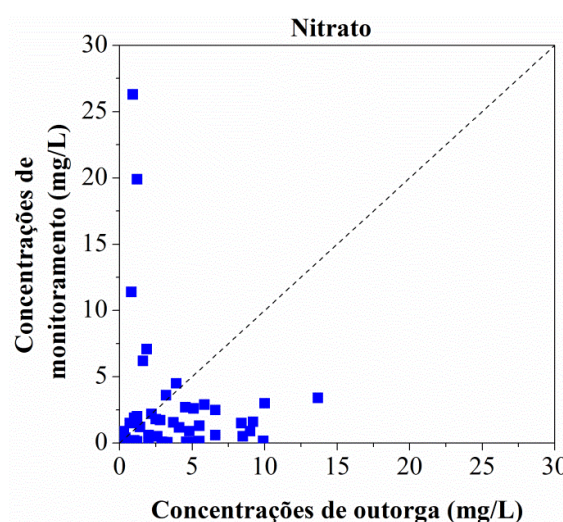


Figura 19. Concentrações de nitrato apresentados nos laudos de outorga *versus* laudo de monitoramento.

Fonte: Própria.

5.3. Estudo variográfico

Para o estudo variográfico, os dados referentes aos poços de ID 23, 54, 87, 96, 136, 139, 141, 143 e 144 não foram considerados por estarem localizados fora do perímetro urbano (Figura 20). O campo geométrico na direção leste-oeste é de 25.000 m, enquanto que na direção norte-sul, o campo geométrico é de 19.000 m. A distância média entre pares de amostras para a direção leste-oeste foi calculada como 1.250 m, enquanto para a direção norte-sul foi de 930 m, sendo o passo da direção adotado igual a 1.000 m para o cálculo do variograma.

Para o tratamento dos dados, os valores de concentrações foram ajustados por uma transformada logarítmica, a fim de aproximá-los de uma distribuição mais simétrica (Figura 21). Nota-se que após fazer a transformação logarítmica, a distribuição apresenta uma característica bimodal. As medidas estatísticas para as variáveis transformadas estão apresentadas na Tabela 5.

Parâmetro	Valor Médio	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio-padrão
Nitrato	-0,050	0,080	2,363	-3,000	0,624

Fonte: Própria.

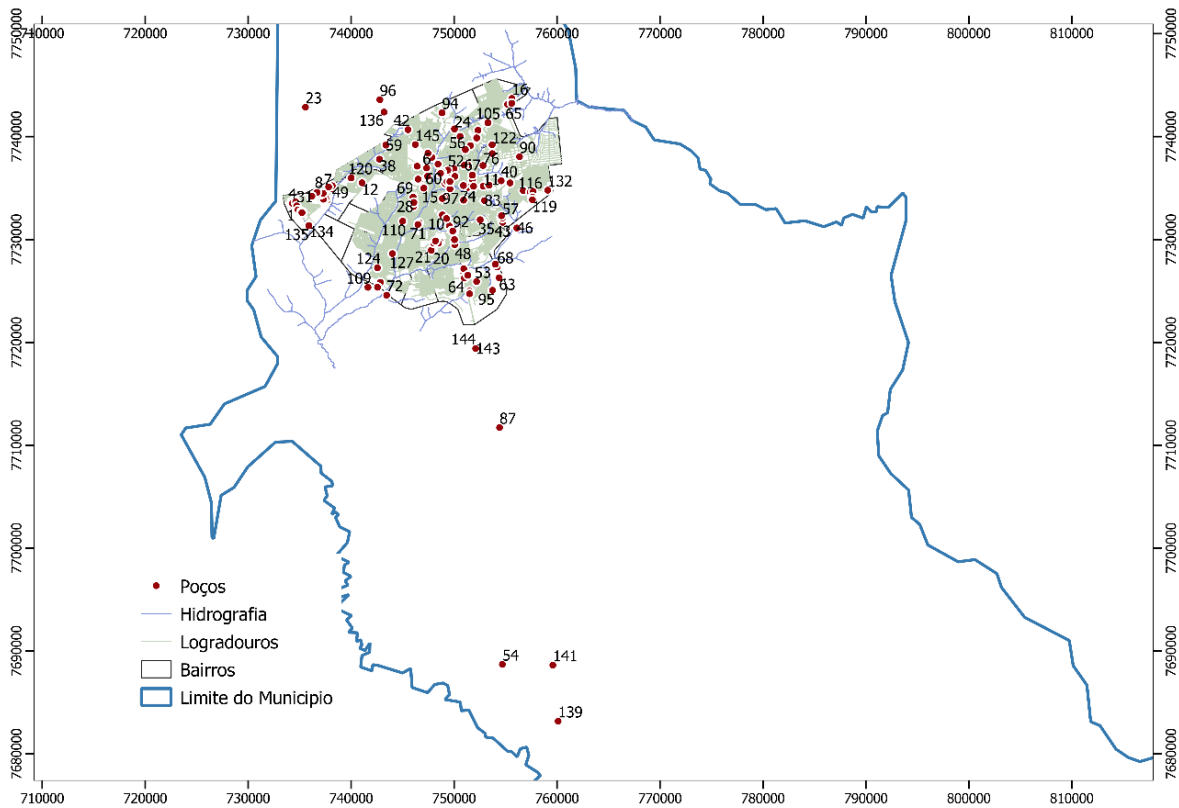


Figura 20. Distribuição espacial dos poços outorgados dentro do limite do município.
Fonte: Própria.

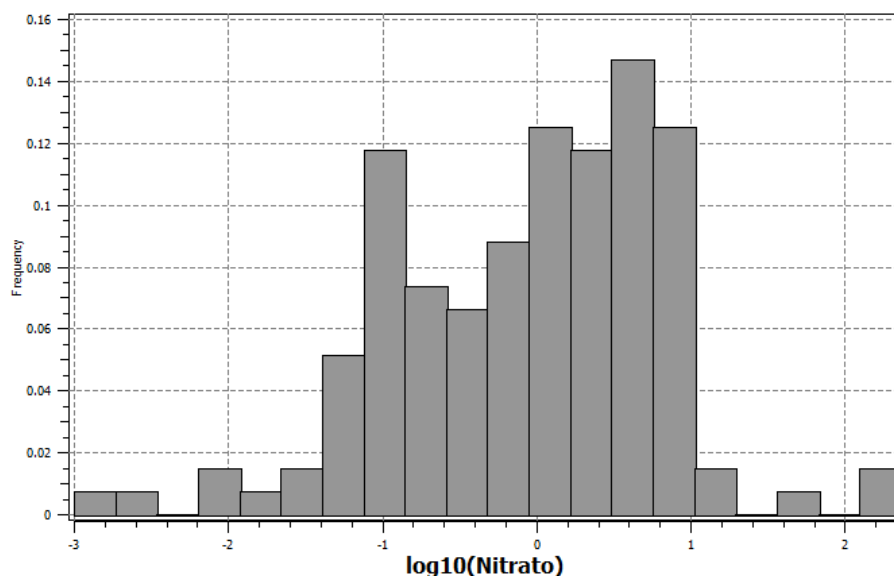


Figura 21. Histograma para os dados de nitrato transformados.
Fonte: Própria.

Após a análise exploratória (cálculo dos variogramas para as direções de 0°, 45°, 90° e 135°, usando tolerância angular de 22,5°), foram escolhidas as direções 0° e 90° como as direções representativas da elipse de anisotropia para análise por apresentarem variogramas melhor estruturados (Figura 22). Ainda assim, os variogramas nestas direções são pouco estruturados, o que pode ser atribuído a não regularidade da malha de amostragem, não conseguindo capturar plenamente a variabilidade espacial da distribuição de nitrato no domínio. Os parâmetros de cálculo utilizados foram: passo de 1.200 m; tolerância de passo 600 m; número de passos 16; duas direções de cálculo 0° e 90° com tolerância angular de 45°. Pelos resultados obtidos interpretou-se a presença de anisotropia geométrica. O modelo teórico ajustado aos variogramas experimentais foi o modelo descrito na Tabela 6 e apresentado nas Figuras 23 e 24.

Tabela 6. Parâmetros característicos do modelo ajustado aos variogramas experimentais.

Parâmetro	Modelo	Número de estruturas	Efeito pepita	Patamar	Amplitude ^a
Nitrato	Exponencial	1	0,5	0,4	12.000 (para 90°) 12.000 (para 0°)

^aRotação do modelo de 0°.

Fonte: Própria.

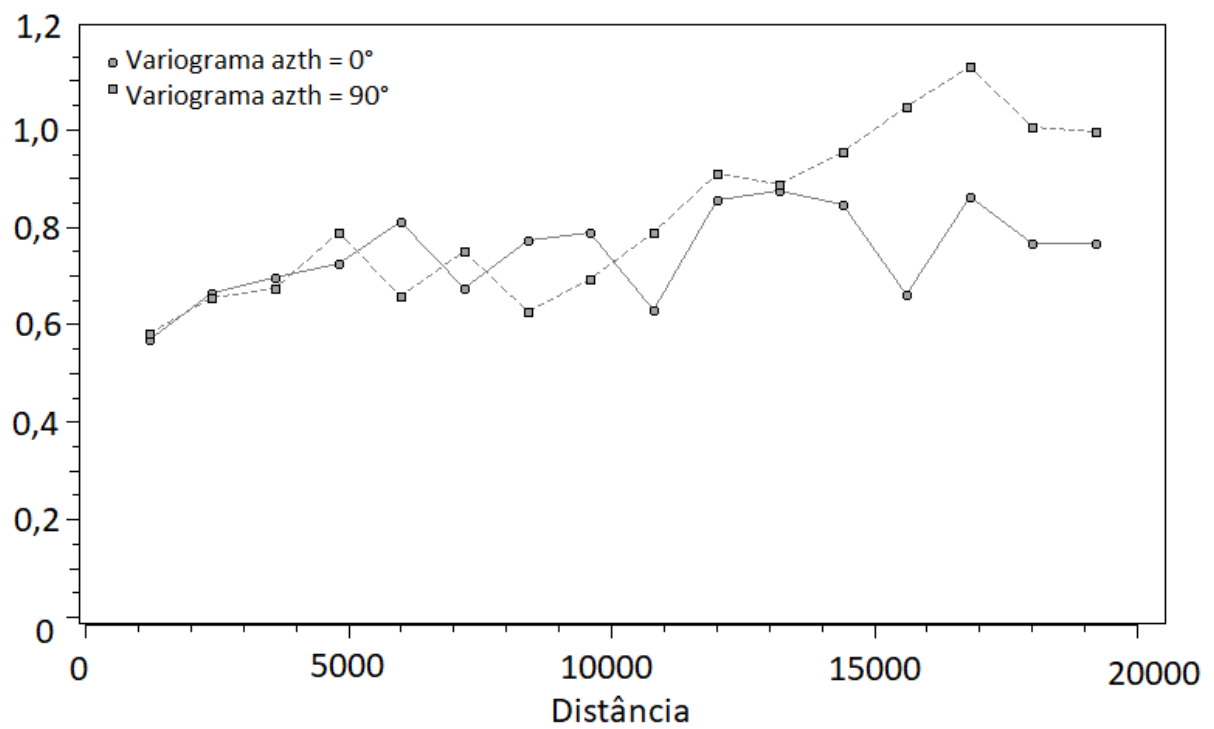


Figura 22. Variogramas calculados para o nitrato nas direções de 0° e 90°.
Fonte: Própria.

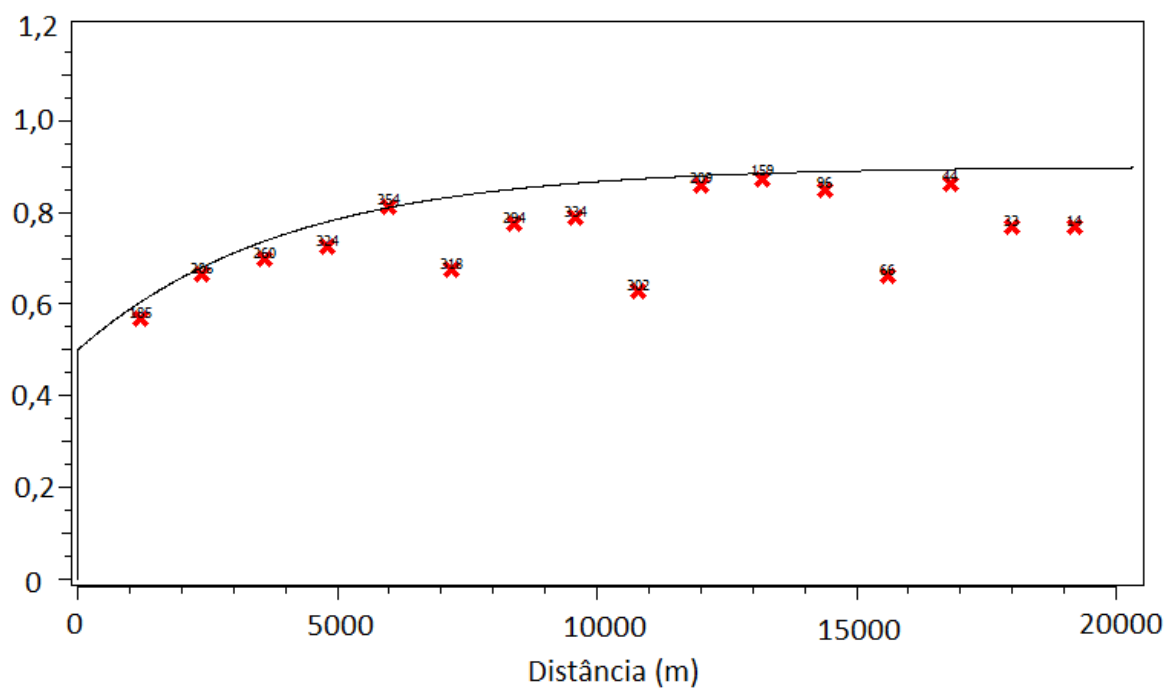


Figura 23. Ajuste do modelo teórico de variograma para o nitrato na direção 0°.
Fonte: Própria.

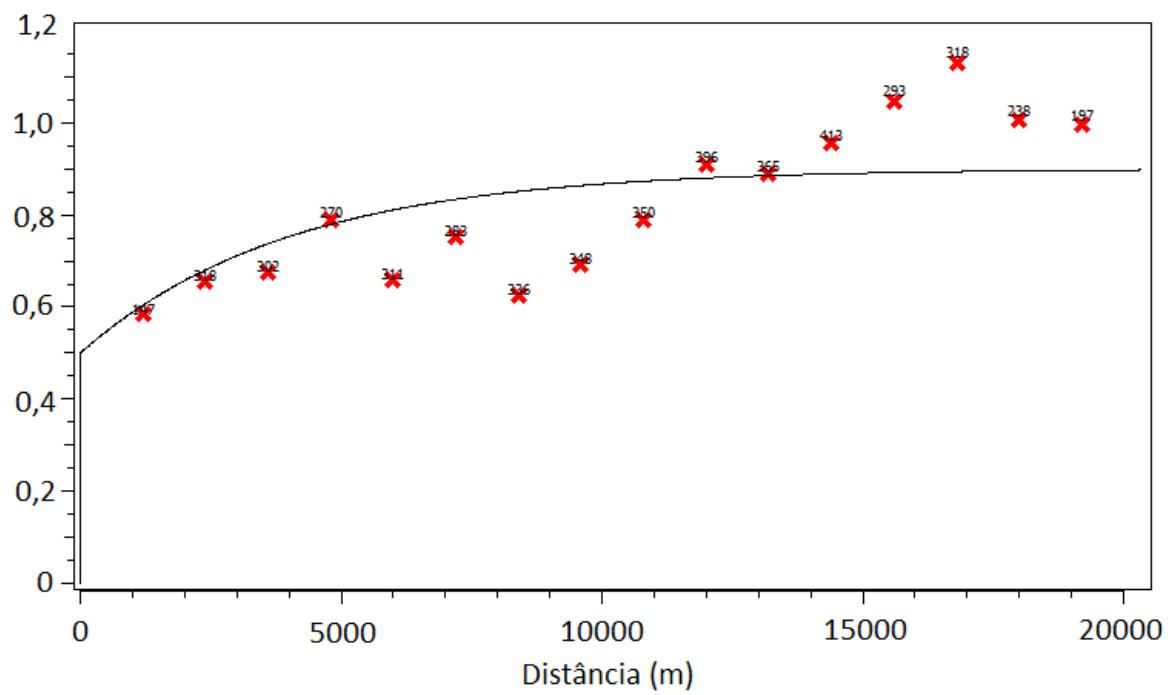


Figura 24. Ajuste do modelo teórico de variograma para o nitrato na direção 90°.
Fonte: Própria.

5.4. Distribuição espacial dos parâmetros por meio de estimativa por krigagem ordinária

Após o ajuste dos modelos dos variogramas, foi realizada a estimativa do parâmetro nitrato pelo método da krigagem ordinária, não sendo feita a etapa de validação cruzada. O tamanho de cada célula da malha escolhido para a estimativa por krigagem ordinária foi de 800 m para os eixos x e y, com 30 células em cada direção. O elipsoide de busca foi definido para o azimuth 90°, com intervalo máximo de 12.000 e médio de 10.000. Optou-se pela krigagem ordinária em blocos, sendo a discretização dos blocos de 2 x 2 (4 sub-blocos), limitação de busca entre 4 e 16 amostras para a estimativa dos blocos, busca por no mínimo 4 octantes não vazios, mínimo por octante 1 e máximo por octante 2.

Os resultados das estimativas das concentrações por krigagem ordinária são apresentados na Figura 25 (conforme visualização da interface do software SGeMS) e no mapa representado na Figura 26, em valores absolutos.

O valor mais elevado da concentração estimada pelo método de krigagem ordinária foi de 7,4 mg/L, significativamente inferior aos valores máximos apresentados nos laudos de outorga, o que pode ser explicado pela característica inerente do método em suavizar os dados. Alguns dos fatores que podem ter interferido na qualidade dos resultados são: irregularidade na malha dos pontos amostrados, com alguns pontos muito distantes entre si; poços com teores de nitrato muito elevado são pontuais, apenas 5 poços apresentam teores acima de 10 mg/L; além dos variogramas serem pouco estruturados. Na região norte/nordeste do município, onde existem poços de monitoramento espacialmente mais concentrados e os valores das concentrações não apresentam grandes variações entre si, a pluma parece ter sido melhor estimada (Figura 26). Dessa forma, espera-se que a utilização de informações de um conjunto de poços de monitoramento mais regularmente espaçados resultaria em melhores estimativas para a pluma de contaminação por nitrato em todo o município.

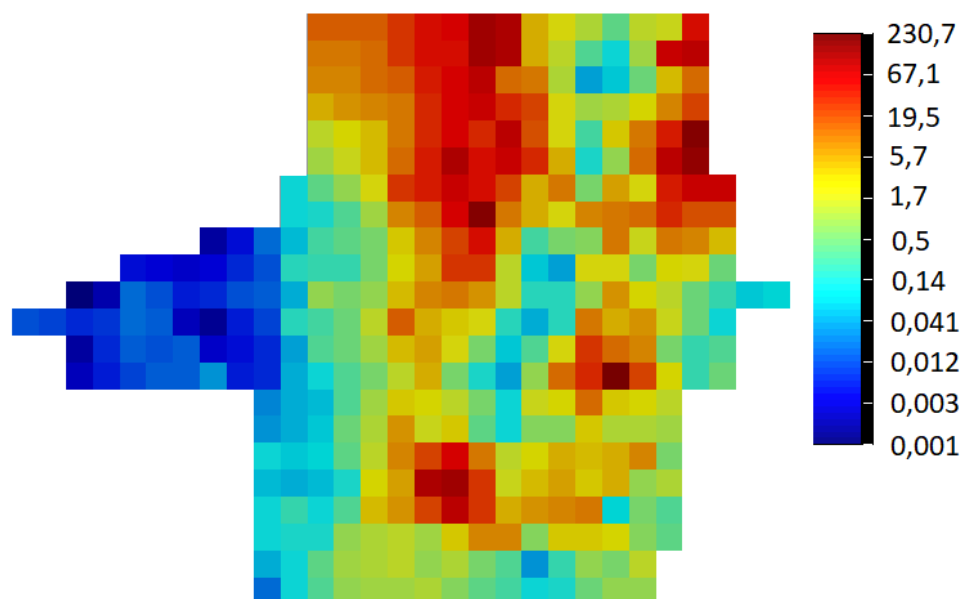


Figura 25. Distribuição espacial dos valores absolutos das concentrações de nitrato estimadas por krigagem ordinária – saída do programa SGeMS.
Fonte: Própria.

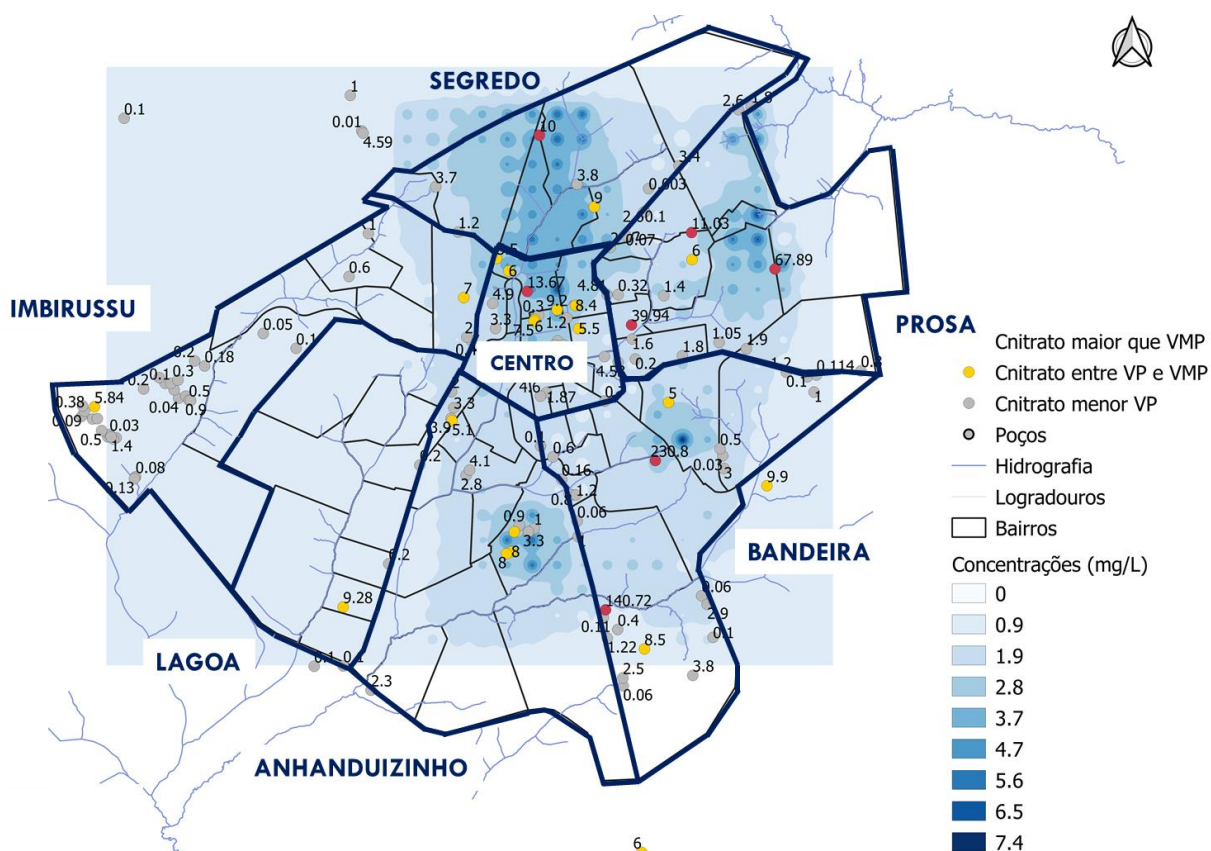


Figura 26. Distribuição espacial dos valores absolutos das concentrações de nitrato estimadas por krigagem ordinária.

5.5. Análise das estimativas pela krigagem ordinária e comparação com resultados da literatura

As regiões onde foram identificadas plumas mais extensas de contaminação por nitrato, com teores acima do VP, correspondem sobretudo às regiões do Prosa, Centro, Segredo e parte do Bandeira e Anhanduizinho (ver Figura 26).

Na região urbana do Bandeira e do Anhanduizinho são observadas Unidades Homôneas do tipo III A e III B, as quais possuem características como nível de água muito próximo à superfície, baixa capacidade de suporte e carga, solos orgânicos ou moles, e nível de água aflorante em épocas de chuva (Figura 27). Dessa forma, a maior contaminação identificada nessas regiões pode estar associada ao nível do lençol freático e tipo de solo, o que requer priorização para a implantação da rede de esgoto e para o estabelecimento de medidas para proteção da água subterrânea e saúde pública. Alguns dos problemas diagnosticados nas regiões do Bandeira e Anhanduizinho relatados no Plano Municipal de Saneamento Básico (PLANURB, 2013) foram constante entupimento da rede de esgoto e transbordamento de fossas em eventos de chuva. Nessas regiões, atenção especial deve ser dada principalmente àqueles poços cuja finalidade de uso é o consumo humano, que podem ter sua qualidade comprometida com o avanço da pluma de contaminantes.

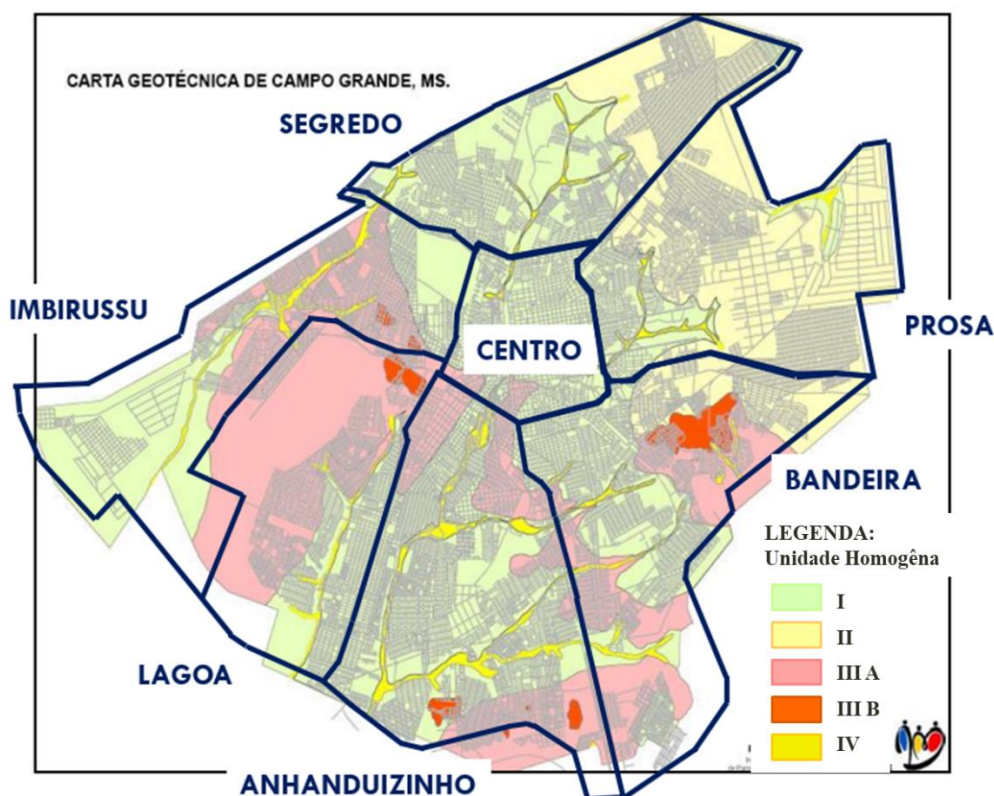


Figura 27. Regiões urbanas de Campo Grande - MS e carta geotécnica de Campo Grande - MS.
Fonte: Adaptado de PLANURB (2013).

As regiões Imbirussu e Lagoa também constituem Unidades Homogêneas do tipo IIIA e IIIB com níveis d'água próximo à superfície, entretanto, os teores de nitrato atendem os padrões de potabilidade, o que pode ser explicado pelo menor adensamento populacional. Na região do núcleo industrial do Imbirussu (extremo oeste do mapa), onde existe uma grande quantidade de poços para atendimento da demanda de água para uso industrial e consumo humano, não foram observados altos teores de nitrato, mostrando que a água está isenta de contaminação por nitrato, característica relevante principalmente para o consumo humano.

Na região Prosa (região nordeste do mapa) também foram caracterizadas altas concentrações de nitrato, representada sobretudo pelo poço de ID90 (ver Apêndice A e B) utilizado para abastecimento de consumo humano. Este poço se localiza na área de afloramento do Sistema Aquífero Bauru (SAB), de forma que as altas concentrações podem estar relacionadas com características intrínsecas desse aquífero que permitem maior mobilidade do contaminante. No Plano Municipal de Saneamento Básico (PLANURB, 2013), um dos problemas relatados na região Prosa foi o vazamento constante de fossas sépticas, gerando forte odor. É importante salientar que o aumento das concentrações ao longo dos anos entre 2011 e 2016 provavelmente se deve ao aumento populacional nesta região, como constatado por Manzano (2018).

De forma geral, as maiores concentrações nos poços das regiões Bandeira, Anhanduizinho, Segredo e Prosa coincidem com as regiões de maior vulnerabilidade natural dos aquíferos representadas na Carta Geotécnica de Campo Grande, com classe de vulnerabilidade alta-baixa (PLANURB, 2020) – Figura 28. A vulnerabilidade natural determina a susceptibilidade de um aquífero ser adversamente afetada por uma carga de contaminante devido às suas características intrínsecas, não levando em conta as influências antrópicas (Foster & Hirata, 1993 apud PLANURB, 2020). Além disso, a agricultura urbana também pode constituir como fonte de contaminação na Região do Segredo e Prosa (Figura 29).

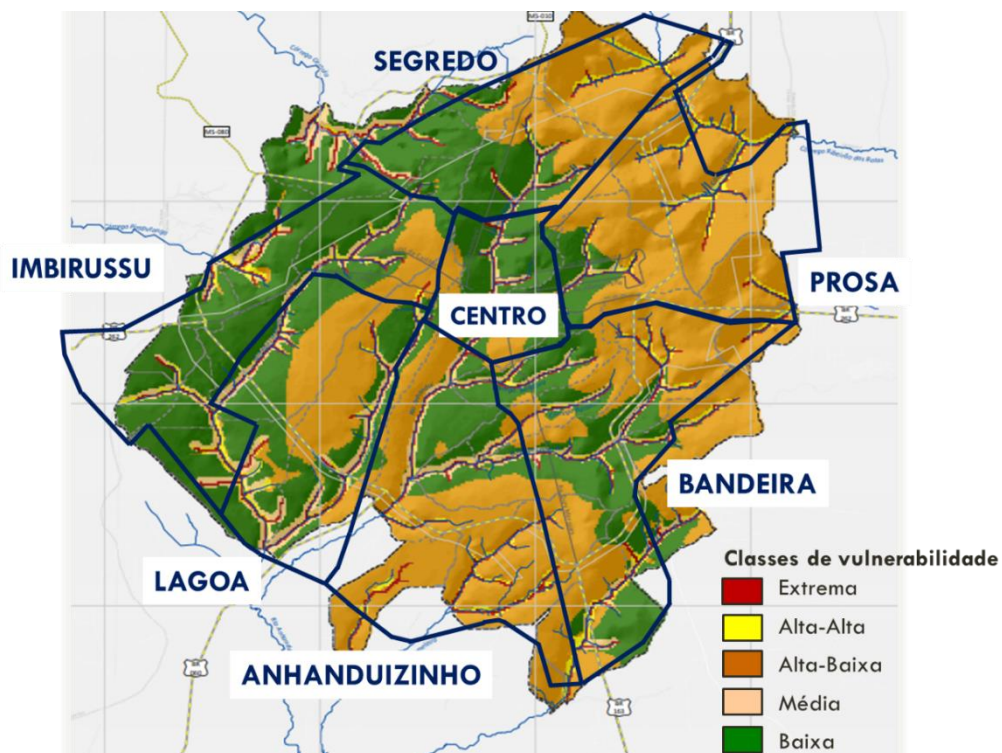


Figura 28. Regiões urbanas e classes de vulnerabilidade natural dos aquíferos.
Fonte: Adaptado de PLANURB (2020).

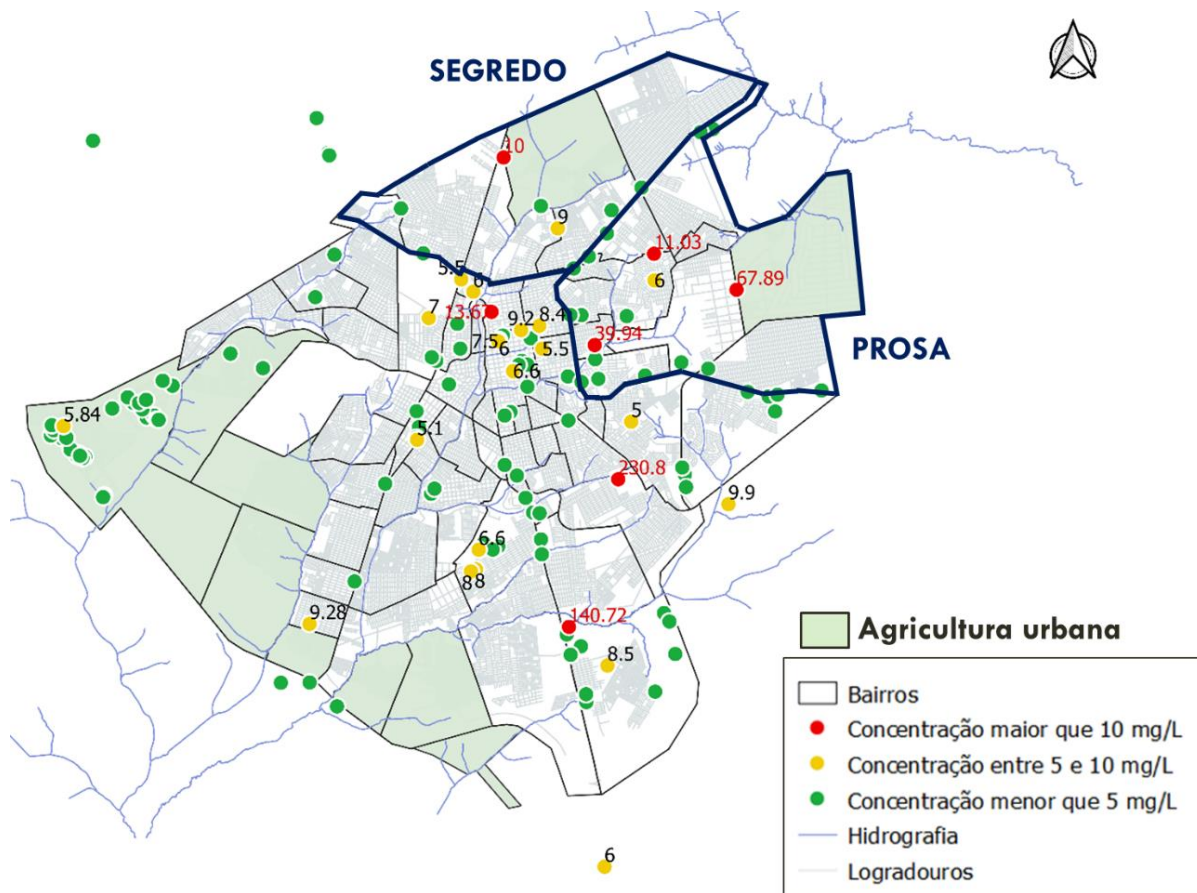
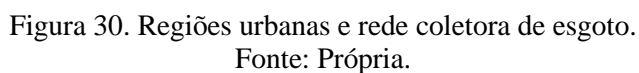


Figura 29. Regiões urbanas do Segredo e Prosa e zoneamento de agricultura urbana.
Fonte: Própria.

Na região urbana Centro (região centro-norte do mapa), existe uma concentração de poços com concentrações acima de 5 mg/L. Como esta região constitui uma região mais antiga da cidade e possui alto adensamento populacional, as contaminações podem estar associadas a fossas sépticas desativadas (Figura 30).



Outra consideração relevante apontada por Cardoso (2019) foi que a maior concentração de nitrato de 230 mg/L está próxima dos córregos Bandeira, Bálsamo e Lageado, o que pode evidenciar o lançamento clandestino de efluentes nesses corpos de água. Salienta-se que os corpos de água superficiais se enquadram na classe extrema quanto à vulnerabilidade natural dos aquíferos. Na região Imbirussu, a canalização de esgoto a céu aberto desaguardando no córrego, foi um dos problemas levantados no Plano Municipal de Saneamento Básico (PLANURB, 2013).

A análise poderia ser complementada com a verificação da abrangência da rede de esgoto na cidade e identificação de regiões com fossas desativadas, recomendando-se o desenvolvimento deste tipo de análise em trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

O aumento nas concentrações de nitrato nos mananciais subterrâneos tem sido observado em diversas cidades brasileiras e no mundo, mostrando a necessidade do desenvolvimento de estudos nessa temática. Nesse sentido, o presente trabalho possibilitou avaliar a distribuição espacial das concentrações de nitrato, na cidade de Campo Grande – MS, dando continuidade a alguns trabalhos da literatura, os quais alertaram que um monitoramento do parâmetro nitrato na cidade deveria ser frequentemente realizado.

A geoestatística com krigagem ordinária em blocos foi a técnica utilizada para se determinar as concentrações dos parâmetros analisados dentro do perímetro urbano, a partir dos valores identificados em amostras de água de poços outorgados. O estudo compreendeu: análise estatística dos dados de qualidade de água; cálculo dos variogramas experimentais; ajuste do modelo teórico do variograma e inferência por meio de krigagem ordinária em blocos. A etapa de validação cruzada não foi realizada no presente trabalho.

Como já discutido no estudo de Cardoso (2019), as concentrações de nitrato atingiram valores elevados de até 230 mg/L, sendo que em 14,9% e 5,0% dos poços foram identificadas concentrações entre 5 e 10 mg/L e acima de 10 mg/L, respectivamente, limites estes definidos como valor de prevenção e valor máximo permitido pelos órgãos reguladores.

Após o ajuste do modelo teórico de variograma, a distribuição espacial das concentrações de nitrato foi estimada utilizando o método da krigagem ordinária. Os resultados foram comparados com os resultados de Cardoso (2019) e buscou-se relacioná-los com informações do zoneamento urbano do Plano Diretor e de Unidades Homogêneas de nível d'água do lençol freático em relação à superfície (definidas na Carta Geotécnica da PLANURB, 2013).

As regiões urbanas com maiores concentrações de nitrato foram as do Anhanduizinho e Bandeira, as quais podem estar relacionadas ao nível d'água muito próximo da superfície como mostra a carta geotécnica e por problemas com esgotamento sanitário, como constante entupimento na rede de esgotos e transbordamento de fossas quando chove. A região Prosa também foi identificada com um poço com alto teor de nitrato. As regiões Centro e Segredo, ainda que apresentem concentrações em geral abaixo do valor máximo permitido, devem ser frequentemente monitoradas pela identificação da pluma com concentrações acima de 5 mg/L. Especial atenção deve ser dada aos poços cuja finalidade de uso é o consumo humano nessas

regiões, que podem ter a qualidade da água comprometida pelo avanço da pluma de contaminantes.

Recomenda-se para trabalhos futuros que sejam avaliados resultados de laudos de qualidade da água em diferentes anos, de modo que os resultados possam ser relacionados quanto à ocupação urbana, uso do solo e instalação das redes coletoras de esgoto, além do desenvolvimento de um programa de monitorização da qualidade das águas subterrâneas. Em Campo Grande, os aquíferos que apresentaram contaminações foram sobretudo o Aquífero Serra Geral e Aquífero Bauru, demonstrando uma preocupação quanto à qualidade da água desses aquíferos e possibilidade ainda de contaminação de aquíferos mais profundos como o Aquífero Guarani.

A geoestatística com estimativa por krigagem ordinária representa uma ferramenta importante na análise dos dados ambientais, sendo possível definir regiões urbanas que tenham a qualidade de água afetada pelas fontes de contaminação e definir políticas públicas para a proteção dos mananciais e proteção da saúde pública. Especificamente para a avaliação do nitrato nas cidades, espera-se como resultados de um estudo mais abrangente: a determinação de áreas prioritárias para o controle do transporte de nitrato no subsolo e medidas de mitigação; entendimento básico dos sistemas de água subterrânea e da evolução temporal da pluma contaminante de nitrato; delimitação de áreas potenciais de poluição pontual e poluição difusa.

REFERÊNCIAS¹

Brasil. (2011). *Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011*. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF.

Brasil. (2005). *Resolução CONAMA nº. 357 de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF.

Cardoso, J. M. (2019). *Avaliação da qualidade da água subterrânea de poços tubulares outorgados no município de Campo Grande – MS* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira.

Cooper, R. M., & Istok, J. D. (1988). Geostatistics applied to groundwater contamination. I: Methodology. *Journal of Environmental Engineering*, 114 (2), 270-286.

Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1997). *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press. 2a ed. 369 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2020). *Banco de dados climáticos do Brasil*. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/bdclima/balanco/resultados/ms/107/balanco.html>. Acesso em: maio de 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Sistema Agregador de Informações do IBGE sobre os municípios e estados do Brasil. Panorama do Município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ms/campo-grande/panorama>. Acesso em: maio de 2020.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2020). *Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Estação de Campo Grande – Climatologia local*. Disponível em: http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/campogrande_clima.html. Acesso em: maio de 2020.

Lacerda Filho, J. V., Brito, R. S. C., Silva, M. G., Oliveira, C. C., Moreton, L. C., Martins, E. G., Lopes, R. C., Lima, T. M., Larizzatti, J. H., & Valente, C. R. (2006). *Geologia e recursos minerais do Estado de Mato Grosso do Sul: Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado de Mato Grosso do Sul – Escala 1: 1.000.000*. Goiânia: CPRM, 2004 (Convênio CPRM/SICME).: 121 p. il. + mapas. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10217>. Acesso em: maio de 2020.

Manzano, L. M. T. (2018). *Monitoramento dos sistemas aquíferos utilizados no abastecimento público do município de Campo Grande, MS* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PERH – MS. (2010). Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. (2010). *Plano estadual de recursos hídricos de Mato Grosso do Sul*. Campo Grande, MS: Editora UEMS, 2010. 194 p.

PLANURB. Agência Municipal de Meio Ambiente e Planejamento Urbano, Prefeitura Municipal de Campo Grande, MS. (2013). *Plano Municipal de Saneamento Básico de Campo Grande*. 182 p.

PLANURB. Agência Municipal de Meio Ambiente e Planejamento Urbano, Prefeitura Municipal de Campo Grande, MS. (2007). *Relatório de avaliação ambiental. Viva Campo Grande – Programa de desenvolvimento integrado e qualificação urbana do município de Campo Grande-MS*. Disponível em: http://www.campogrande.ms.gov.br/planurb/downloads/programa-viva-campo-grande/?post_type=sec-downloads. Acesso em: maio de 2020.

PLANURB. Agência Municipal de Meio Ambiente e Planejamento Urbano, Prefeitura Municipal de Campo Grande, MS. (2017). *Plano Diretor*. Disponível em: <http://www.campogrande.ms.gov.br/planurb/downloads/plano-diretor-de-campo-grande/>. Acesso em: dezembro de 2020.

PLANURB. Agência Municipal de Meio Ambiente e Planejamento Urbano, Prefeitura Municipal de Campo Grande, MS. (2020). *Revisão e atualização da Carta Geotécnica de Campo Grande: Produto II Interpretação dos dados e geração dos produtos cartográficos*. Disponível em: <http://www.campogrande.ms.gov.br/planurb/carta-geotecnica/>. Acesso em: setembro de 2020.

Rocha, M. M. (2019). *Geoestatística aplicada a dados de ciências ambientais*. Notas de aula. MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields. Universidade de São Paulo.

Sarkar, B. C. (2019). Geostatistics in Groundwater Modelling. In Sikdar P. (Eds.), *Groundwater Development and Management* (pp. 147-169), Springer, Cham.

SEMADUR. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano. (2011). *Programa Manancial Vivo: Aspectos conceituais, metodológicos e resultados obtidos entre os anos de 2009- 2011*. –Disponível em: <http://www.campogrande.ms.gov.br/semadur/canais/manancial-vivo/>. 45 f.

Shinzato, M. H. (2007). *Recursos hídricos subterrâneos no município de Campo Grande-MS: Aspectos técnicos e jurídicos* (Dissertação de Mestrado). Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande.

Varnier, C., Rocha, G. A., Campos, J. E., Albuquerque Filho, J. L., Simonato, M., & Hirata, R. (2019). *Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual*. São Paulo: SIMA/IG, 2019. 128 p.

WHO. (2016). *Nitrate and nitrite in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. WHO/FWC/WSH/16.52. Genebra: WHO, 2016. 41 p. Disponível em: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/nitrate-nitrite-background-jan17.pdf. Acesso em: junho 2020.

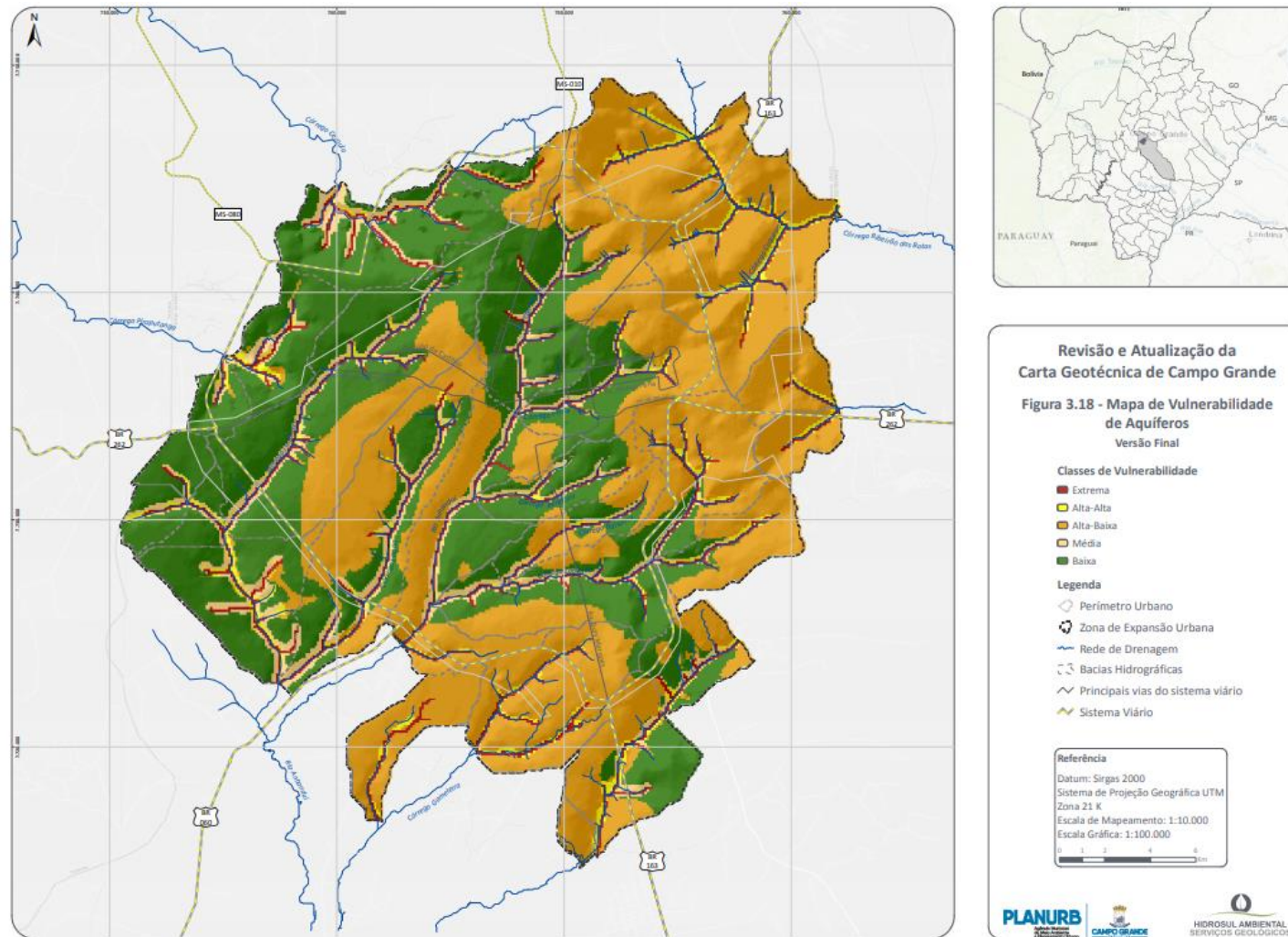
ANEXOS

ANEXO A – Regiões urbanas de Campo Grande - MS



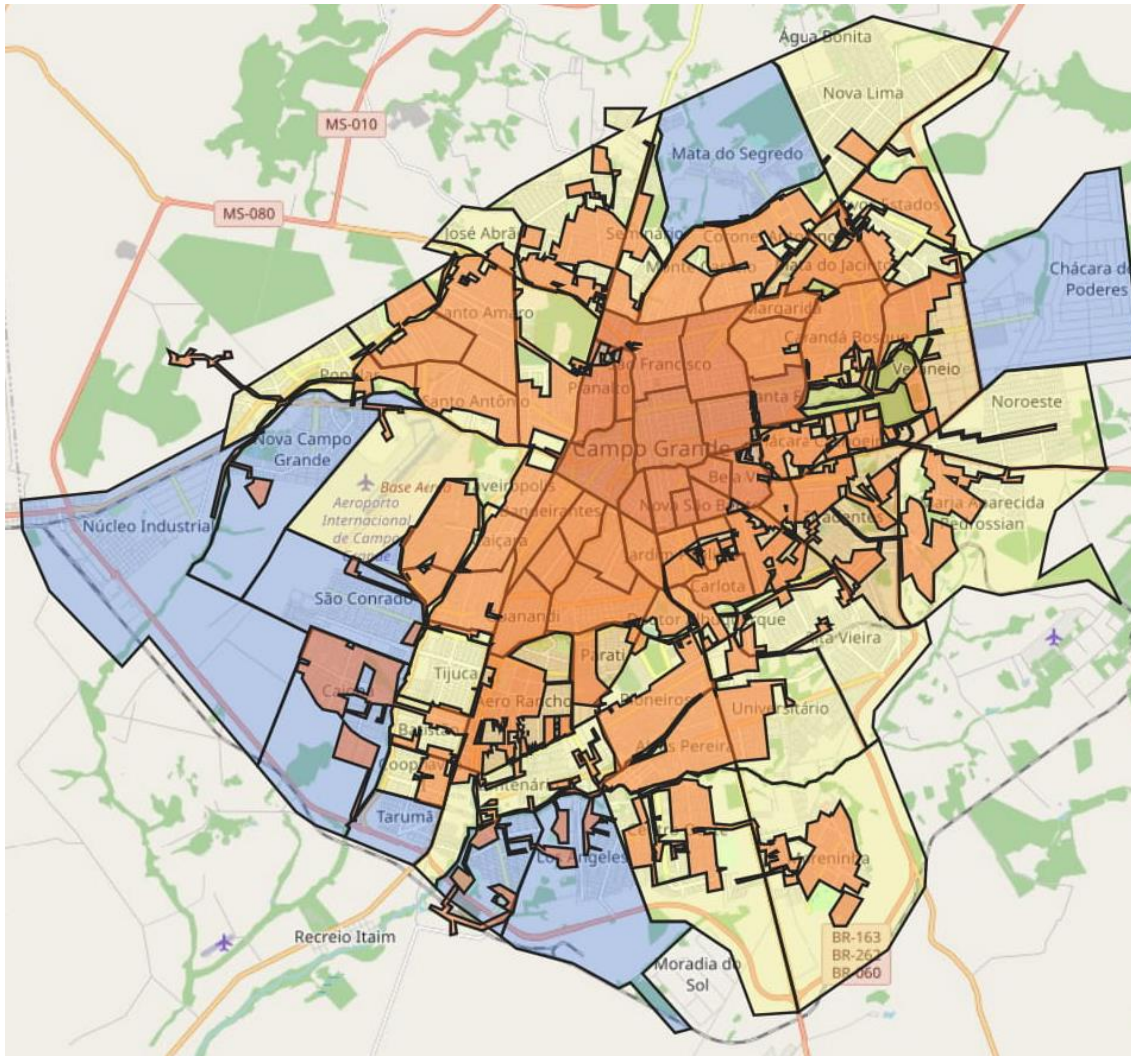
Fonte: Adaptado de <http://www.campogrande.ms.gov.br/planurb/downloads/mapa-de-campo-grande-com-regioes-bairros-e-malha-urbana/>.

ANEXO B – Carta Geotécnica de Campo Grande – MS. Mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos



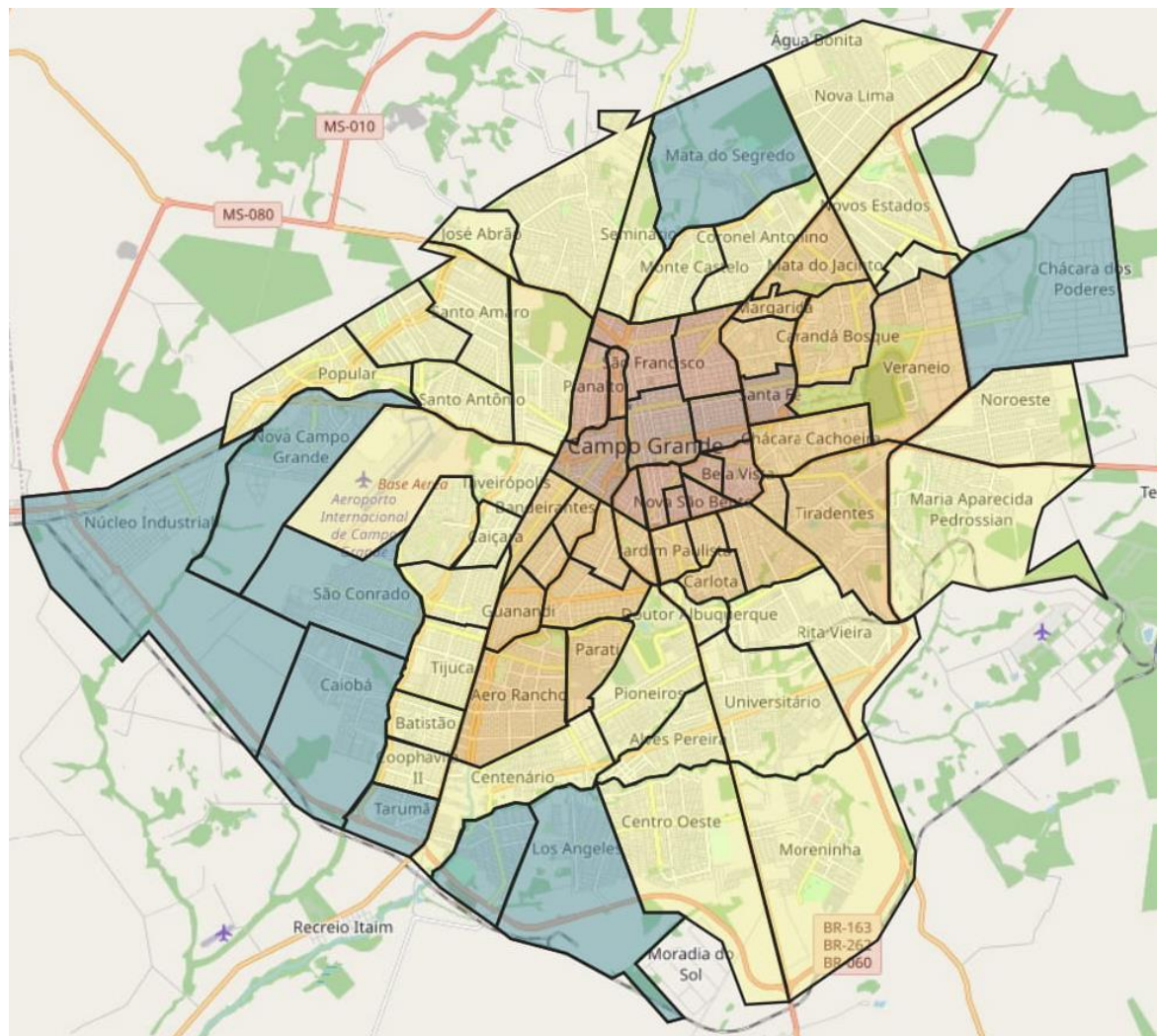
Fonte: PLANURB (2020).

ANEXO C – Zonas urbanas e infraestrutura de coleta de esgoto em Campo Grande – MS



Infraestrutura de coleta de esgoto indicada na cor laranja. Fonte: sisgran.campogrande.ms.gov.br/mapas/.

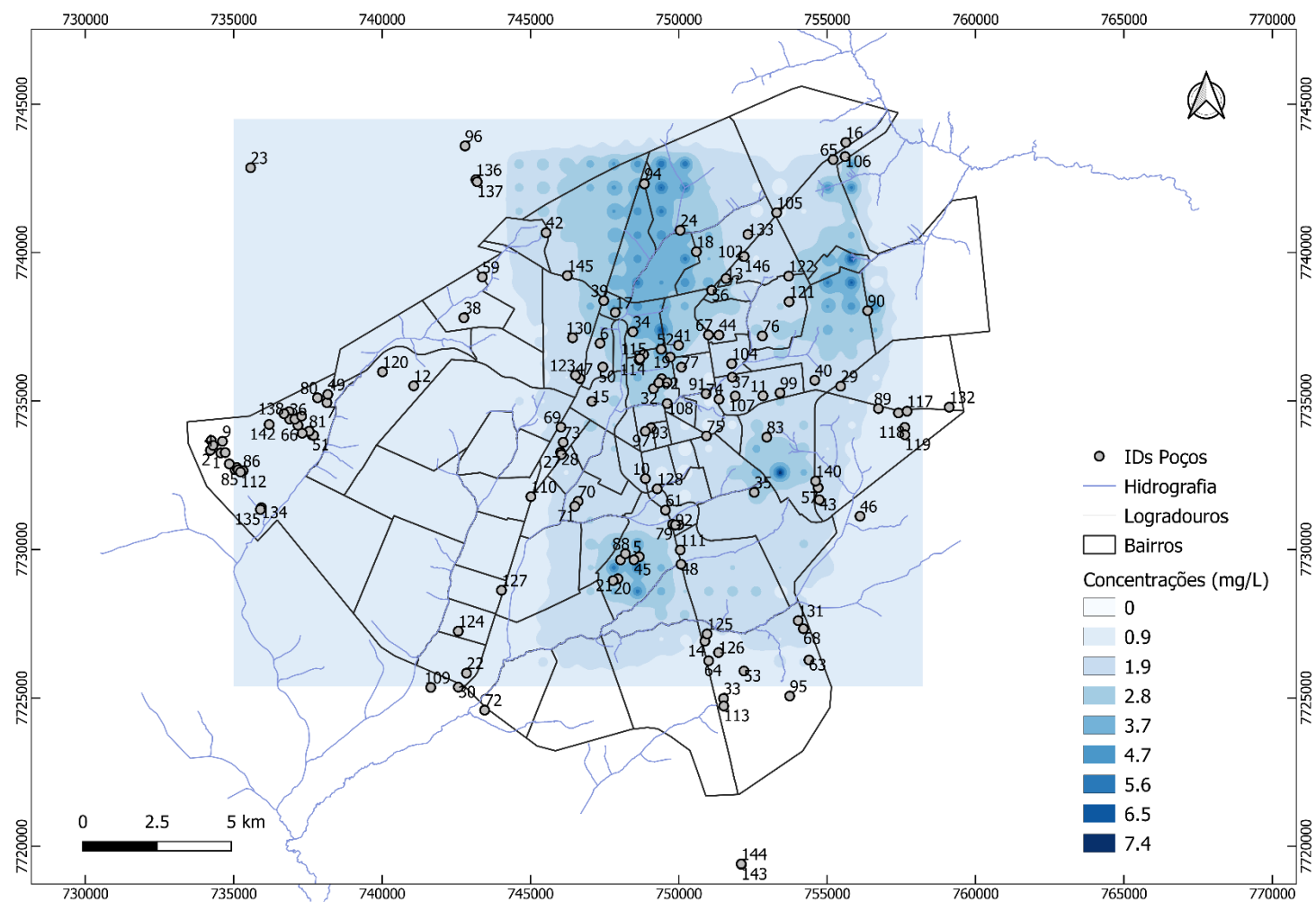
ANEXO D – Zonas urbanas e regiões de agricultura urbana em Campo Grande – MS



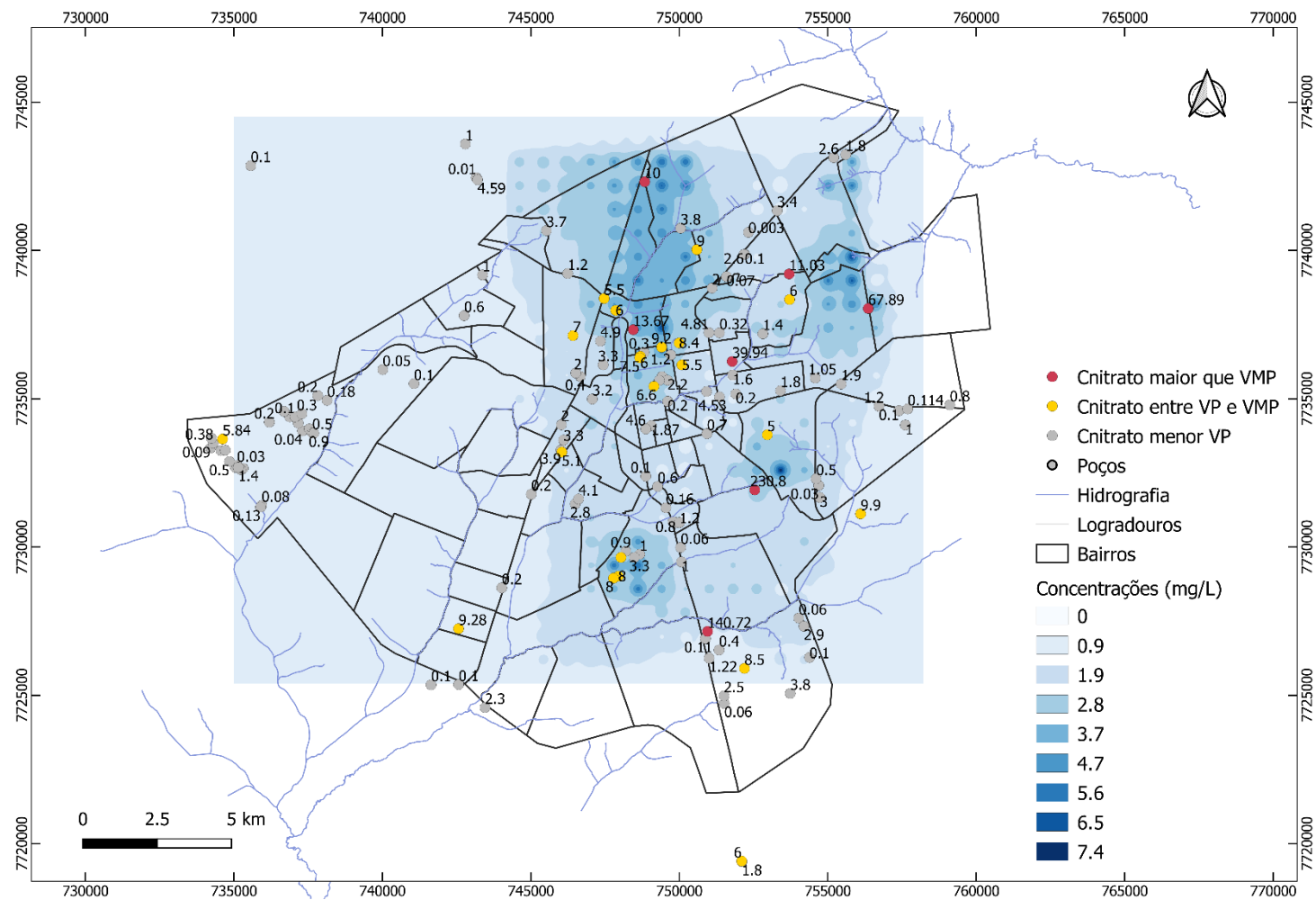
Agricultura urbana indicada na cor verde. Fonte: sisgran.campogrande.ms.gov.br/mapas/.

APÊNDICE

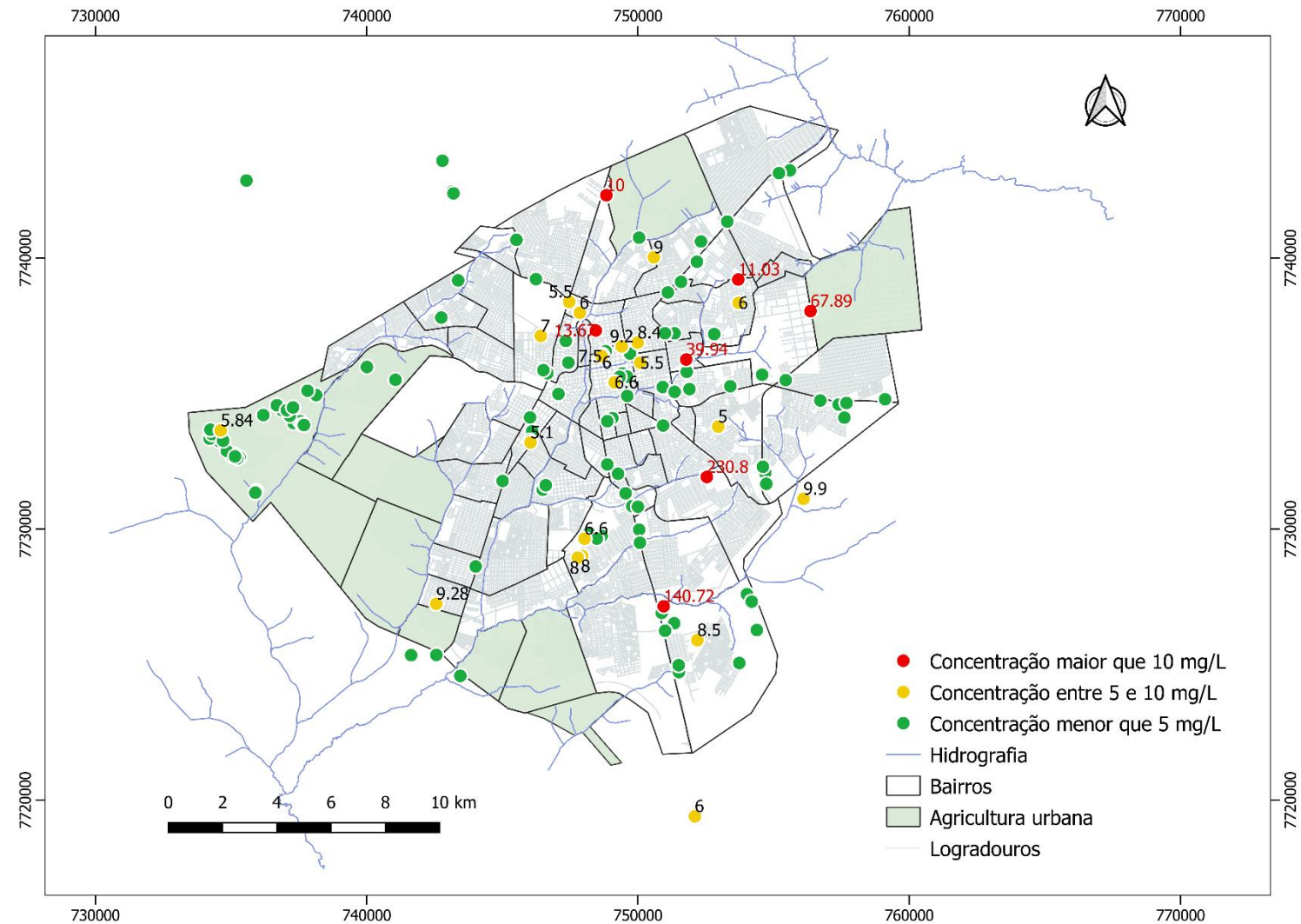
APÊNDICE A – Resultado da krigagem ordinária para nitrato. Representação da identificação dos poços outorgados



APÊNDICE B – Resultado da krigagem ordinária para nitrato. Representação das concentrações nos poços outorgados



APÊNDICE C – Mapa com localização dos poços, concentrações dos poços com concentrações de nitrato maiores que 5 mg/L, e regiões de agricultura urbana no município



APÊNDICE D – Mapa com localização dos poços, concentrações dos poços com concentrações de nitrato maiores que 5 mg/L, e regiões com infraestrutura de coleta de esgoto no município

