



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

DIEGO ALLYSON ROCHA

**EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EXPLORAÇÃO E
POTENCIOMETRIA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA
GERAL (SASG) NA ÁREA URBANA DE LONDRINA/PR**

DIEGO ALLYSON ROCHA

**EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EXPLORAÇÃO E
POTENCIOMETRIA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA
GERAL (SASG) NA ÁREA URBANA DE LONDRINA/PR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Moreira dos Santos

Londrina
2020

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

Rocha, Diego Allyson.

Evolução espaço-temporal da exploração e potenciometria do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na área urbana de Londrina/PR / Diego Allyson Rocha. - Londrina, 2020.
98 f.

Orientador: Maurício Moreira dos Santos.

Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2020.
Inclui bibliografia.

1. Recursos hídricos subterrâneos - Tese. 2. Gestão hídrica - Tese. 3. Hidrogeografia - Tese. 4. Planejamento urbano - Tese. I. Moreira dos Santos, Maurício. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

DIEGO ALLYSON ROCHA

**EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EXPLORAÇÃO E
POTENCIOMETRIA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL
(SASG) NA ÁREA URBANA DE LONDRINA/PR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Maurício Moreira dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Prof. Dr. Weliton Rodrigues Borges
Universidade de Brasília – UnB

Prof. Dr. Marciel Lohmann
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 04 de maio de 2020.

Dedico este trabalho aos meus pais Donizetti e Cleide e a minha noiva Caroline pelo apoio incondicional. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos derramadas sobre a minha vida, além de que com sua infinita sabedoria foi um importante guia em minha trajetória.

Aos meus pais, Cleide e Donizetti que desde o meu primeiro dia de vida sempre lutaram para que eu pudesse ter todo o conforto e possibilidade de educação, pelo amor e carinho que sempre recebi, pela paciência que sempre tiveram e por estarem ao meu lado em exatamente todos os momentos da minha vida, me ajudando a conquistar tudo que sempre sonhei, me apoiando e guiando para o caminho do bem.

Aos meus avôs Jocel e Albino (in memoriam), minhas avós Ana e Helena, ao meu tio Francisco, além de toda a minha família, que sempre me incentivou e apoiou em minhas decisões por toda a minha vida.

À minha noiva Caroline, pelo carinho, companheirismo e paciência, principalmente nos momentos mais difíceis, bem como pelo amor e apoio que foram fundamentais para que eu concluisse mais essa etapa da minha vida.

Ao meu orientador e grande amigo Prof. Dr. Maurício Moreira dos Santos, que desde o TCC e agora no mestrado confia, apoia e me auxilia na conclusão de mais uma etapa importante em minha vida acadêmica, além disso agradeço pelo grande conhecimento científico que me passou e que com certeza elevou o nível deste trabalho.

Agradeço também aos professores do curso de Pós-Graduação em Geografia que contribuíram na minha formação.

Aos amigos que fiz no curso de Pós-Graduação pelo convívio, amizade sincera, apoio e principalmente por compartilharmos tantos momentos e também aos amigos que sempre me apoiaram e auxiliaram nessa jornada, em especial ao meu grande amigo Thiago Henrique por toda ajuda e ensinamentos nesse período, serei eternamente grato a você.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para minha formação pessoal e profissional, e que por alguma distração não tenham sido citados, meu muito obrigado.

*"Conhecimento não é aquilo que você sabe,
mas o que você faz com aquilo que você sabe."*

Aldous Huxley

ROCHA, Diego Allyson. **Evolução espaço-temporal da exploração e potociometria do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na área urbana de Londrina/PR.** 2020. 98 f. Dissertação. (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2020.

RESUMO

O rápido crescimento da cidade de Londrina/PR produziu pressão crescente sobre a demanda de água originando conflitos pela disponibilidade hídrica, o que levou a busca por novas fontes de abastecimento, inclusive a exploração de aquíferos. Assim, estudos sobre as águas subterrâneas ganham importância, nesse sentido, o artigo A apresenta o diagnóstico histórico situacional da disponibilidade de informações sobre poços tubulares profundos inseridos no perímetro urbano do município de Londrina/PR e o diagnóstico da variação temporal do nível d'água e da produtividade do SASG no intervalo de tempo de 1977 a 2013, formando uma base referencial e de dados, essencial e acessível para consulta de tomadores de decisão e planejadores dos recursos hídricos. Os resultados apresentados demonstram que dados hidrodinâmicos do aquífero sofrem alterações negativas à medida que o número de poços tubulares profundos da área de estudo aumentam ao longo de 4 séries históricas, citando alguns valores, a vazão (Q) que tinha mediana de 14 m³/h na classe 1 caiu para 4 m³/h na classe 4, enquanto a capacidade específica (Q/s) sofreu importantes alterações, com valor de mediana em 1,34 m³/h/m para a classe 1 e na classe 4 passou para 0,2 m³/h/m. Já o artigo B, expôs o mapeamento das áreas de exploração do SASG na área urbana de Londrina/PR, sendo realizada análise espacial de distribuição e evolução histórica dos poços tubulares profundos com o auxílio de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permitiu a geração de importantes produtos cartográficos. Os resultados mostraram a evolução histórica dos níveis potenciométricos do SASG ao longo de 4 classes temporais, onde foi possível constatar o aparecimento espacial de distorção anômalas das curvas equipotenciais representados pelo contínuo rebaixamento dos níveis e/ou interferência de bombeamento produzidos por cones de depressão causados pelo crescente número de poços na zona central da cidade, constatando-se nessa última condição a presença de inversões do fluxo potencial para a classe 3 em Hotspot. Nessa zona, constatou-se grande rebaixamento dos valores dos níveis potenciométricos do aquífero, representado por uma diferença de 60 metros entre a primeira e a classe 4, com a classe 3 sendo apresentando o cenário mais preocupante com rebaixamento de 100 metros para o Hotspot quando comparado com a primeira classe. A melhora potenciométrica verificada para a classe 4 está relacionada a resposta ao aumento dos volumes da reserva reguladora que chegou a 4×10^8 m³/ano. Contudo, com os resultados apresentados é possível apontar um cenário futuro preocupante no que diz respeito à produtividade do SASG em área urbana caso mecanismos de gestão não sejam aplicados. Dessa forma, a presente pesquisa apresenta um panorama evolutivo histórico acerca da exploração do SASG na área urbana de Londrina/PR, tornando-se um instrumento que poderá ser utilizado pelos gestores municipais na busca pela gestão correta dos recursos hídricos subterrâneos, pois o gerenciamento adequado das águas subterrâneas é ação obrigatória para proteção desse recurso renovável, caso isso não ocorra os

futuros poços podem sofrer ainda mais com a diminuição da oferta de água, podendo até mesmo surgir uma crise hídrica em longo prazo.

Palavras-Chave: Recursos hídricos subterrâneos. Aquífero. Gestão hídrica. Hidrogeografia. Planejamento urbano.

ROCHA, Diego Allyson. **Spatio-temporal evolution of exploration and potentiometry of the Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) in the urban area of Londrina/PR.** 2020. 98 p. Dissertation. (Master's degree in Geography) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2020.

ABSTRACT

The rapid growth of the city of Londrina/PR produced increasing pressure on the demand for water, causing conflicts over water availability, which led to the search for new sources of supply, including the exploration of aquifers. Thus, studies on groundwater gain importance, in this sense, article A presents the situational historical diagnosis of the availability of information about deep tubular wells inserted in the urban perimeter of the city of Londrina/PR and the diagnosis of the temporal variation of the water level. and the productivity of SASG in the period from 1977 to 2013, forming a referential and data base, essential and accessible for consultation with decision makers and water resources planners. The results presented show that hydrodynamic data of the aquifer undergoes negative changes as the number of deep tubular wells in the study area increases over 4 historical series, mentioning some values, the flow (Q) which had a median of 14 m³/h in class 1 it dropped to 4 m³/h in class 4, while the specific capacity (Q/s) underwent important changes, with a median value of 1.34 m³/h/m for class 1 and in class 4 it went to 0,2 m³/h/m. Article B, on the other hand, exposed the mapping of the exploitation areas of the SASG in the urban area of Londrina/PR, with a spatial analysis of the distribution and historical evolution of the deep tubular wells with the aid of the Geographic Information System (GIS), which allowed the generation of important cartographic products. The results showed the historical evolution of the SASG potentiometric levels over 4 time classes, where it was possible to verify the spatial appearance of anomalous distortion of the equipotential curves represented by the continuous lowering of the levels and/or pumping interference produced by depression cones caused by the depression, increasing number of wells in the central area of the city, with the presence of inversions in the potential flow for class 3 in the Hotspot. In this zone, there was a great decrease in the values of the potentiometric levels of the aquifer, represented by a difference of 60 meters between the first and class 4, with class 3 being the most worrying scenario with a 100 meter decrease for the Hotspot when compared to the first class. The potentiometric improvement observed for class 4 is related to the response to the increase in the volume of the regulatory reserve that reached 4×10^8 m³/year. However, with the results presented it is possible to point out a worrying future scenario with regard to the productivity of the SASG in urban areas if management mechanisms are not applied. In this way, the present research presents a historical evolutionary panorama about the exploration of the SASG in the urban area of Londrina/PR, becoming an instrument that can be used by the municipal managers in the search for the correct management of underground water resources, because the adequate management groundwater is a mandatory action for the protection of this renewable resource, if this does not happen, future wells may suffer even more from the decrease in water supply, and a long-term water crisis may even arise.

Key words: Underground water resources. Aquifer. Water management. Hydrogeography. urban planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Ciclo hidrológico e seus principais componentes	19
Figura 2 –	Os papéis do SIG no planejamento urbano	23
Figura 3 –	Limites municipais de Londrina/PR	29
Figura 4 –	Precipitação média anual para o estado do Paraná.....	30
Figura 5 –	Mapa de abrangência da Formção Serra Geral	31
Figura 6 –	Pedologia do município de Londrina/PR	35
Figura 7 –	Hidrografia do município de Londrina/PR.....	36
Figura 8 –	Perímetro urbano de Londrina/PR	42
Figura 9 –	Poços outorgados em Londrina/PR	45
Figura 10 –	Poços outorgados e selecionados para o trabalho no perímetro urbano de Londrina/PR	46
Figura 11 –	Gráfico de dados faltantes do banco de dados do Águas Paraná	48
Figura 12 –	Gráfico de dados faltantes do banco de dados do SIAGAS.....	48
Figura 13 –	Porcentagem do uso da água dos poços cadastrados no banco de dados compilado	49
Figura 14 –	Número de poços perfurados ao longo dos anos.....	50
Figura 15 –	Aumento do número populacional e de domicílios em Londrina/PR ...	51
Figura 16 –	Gráfico da profundidade do NE (m) de 218 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013.....	52
Figura 17 –	Diagrama da frequência acumulada do NE (m)	52
Figura 18 –	Variação da profundidade mediana do NE (m) ao longo dos intervalos de tempo	53
Figura 19 –	Gráfico da profundidade do ND (m) de 215 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013.....	54
Figura 20 –	Diagrama da frequência acumulada do ND (m)	54
Figura 21 –	Variação da profundidade mediana do ND (m) ao longo do intervalo de tempo	55
Figura 22 –	Gráfico de Q (m ³ /h) de 226 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013.	56
Figura 23 –	Diagrama da frequência acumulada de Q (m ³ /h)	56
Figura 24 –	Variação da mediana de Q (m ³ /h) ao longo dos intervalos de tempo	57

Figura 25 – Gráfico de Q/s ($m^3/h/m$) de 207 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013	58
Figura 26 – Diagrama de frequência acumulada de Q/s ($m^3/h/m$).....	58
Figura 27 – Variação da mediana de Q/s ($m^3/h/m$) ao longo dos intervalos de tempo	59
Figura 28 – Porcentagem de poços ao longo das classes temporais	60
Figura 29 – Localização dos poços na área urbana central município de Londrina/PR	68
Figura 30 – Mapa hipsométrico da região de estudo	71
Figura 31 – Mapa de localização da Estação Fluviométrica	72
Figura 32 – Mapa potenciométrico da Classe 1	76
Figura 33 – Mapa potenciométrico da Classe 2	78
Figura 34 – Mapa potenciométrico da Classe 3	80
Figura 35 – Mapa potenciométrico da Classe 4	82
Figura 36 – Imagem integrada das 4 classes históricas para potenciometria	84
Figura 37 – Variação da mediana da precipitação (mm) ao longo das classes temporais	86
Figura 38 – Reserva reguladora do aquífero (m^3/ano)	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	18
2.2	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) NO PLANEJAMENTO URBANO	21
2.3	GEOESTATÍSTICA	25
2.4	LEGISLAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	26
3	CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	29
3.1	CLIMA	29
3.2	CONTEXTO GEOLOGICO	30
3.3	CONTEXTO HIDROGEOLOGICO	32
3.3.1	Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)	32
3.4	GEOMORFOLOGIA	33
3.5	PEDOLOGIA	34
3.6	HIDROGRAFIA	35
4	ARTIGO A: EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA EXPLORAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG) NO PERÍMETRO URBANO DE LONDRINA NO PERÍODO DE 1977 A 2013	37
4.1	RESUMO	37
4.2	ABSTRACT	38
4.3	INTRODUÇÃO	39
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	41
4.5	METODOLOGIA	43
4.6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.6.1	Informações Sobre Poços Tubulares Profundos	47
4.6.2	Uso da Água Subterrânea	49
4.6.3	Evolução do Número de Poços ao Longo do Tempo	50
4.6.4	Parâmetros Analisados	51
4.6.4.1	Nível estático (NE)	51

4.6.4.2	Nível dinâmico (ND)	53
4.6.4.3	Vazão (Q).....	55
4.6.4.4	Capacidade Específica (Q/s).....	57
4.6.4.5	Total de poços ao longo das classes temporais definidas	59
4.7	CONCLUSÕES.....	60
5	ARTIGO B: MAPEAMENTO E EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA POTENCIOMETRIA E RESERVA REGULADORA DO SASG NA ÁREA URBANA DE LONDRINA/PR	64
5.1	RESUMO	64
5.2	ABSTRACT	65
5.3	INTRODUÇÃO	66
5.4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	67
5.5	METODOLOGIA	69
5.6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.7	CONCLUSÕES	87
6	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

A abordagem do presente trabalho tem como grande área de domínio a Geografia Física, que segundo Strahler (2006) se objetiva a investigar e estudar a superfície do planeta e o modo em que as mudanças ocorrem ao longo do tempo. Com o enfoque se dando na Hidrogeografia, um dos ramos da ciência geográfica, tal como a Climatologia, a Geomorfologia e a Biogeografia.

Segundo Pimenta (2012) a Hidrogeografia estuda as relações dos fenômenos hídricos no espaço geográfico, bem como a sua distribuição e casualidades, além de buscar assimilar e elucidar a circulação de água no planeta e as consequências da sua utilização pelo ser humano, evidenciando principalmente as ações antrópicas de interferências nos recursos hídricos.

A água é considerada como imprescindível para qualquer atividade humana e indispensável à sobrevivência de qualquer espécie. Além disso, o crescimento populacional acaba por desencadear uma demanda crescente de água para abastecimento em todos os setores de atividades, produzindo, muitas vezes conflitos pela disponibilidade hídrica e a busca por novas fontes, inclusive a exploração de aquíferos.

Nesse sentido, Ramos (2005) destaca que é fundamental elaborar planos de manejo integrados a gestão dos recursos hídricos, pautados nas legislações vigentes, nas condições hidrológicas, bem como realizar estudos quanto a capacidade de exploração dos aquíferos, o que os torna indispensável para a sua preservação.

No município de Londrina/PR a condição crescente sobre a demanda e disponibilidade hídrica não é diferente, principalmente em sua área urbana, que observou um rápido crescimento nas últimas décadas, não apenas relacionado ao incremento populacional que ocorreu para todo o território brasileiro sobretudo em cidades, mas também acompanhado de intensa expansão físico-territorial do município e verticalização urbana, como aponta o trabalho de Casaril (2009).

A verticalização urbana, promovida pela instalação de condomínios na área urbana, impulsiona ainda mais a busca por fontes alternativas de água que sejam independentes das empresas de saneamento, principalmente por meio da

perfuração de poços tubulares profundos para a captação de água subterrânea. O crescimento populacional, a expansão físico-territorial da cidade, e, consequentemente, acompanhada pela evolução de outros setores da sociedade, seja público ou outras atividades da economia, também levam a procura por novas fontes de abastecimento hídrico, especialmente a exploração de aquíferos.

Dessa forma, as premissas ora citadas foram os propósitos inspiradores para o desenvolvimento do presente trabalho, mas que a princípio balizou a pesquisa de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulada: “Proposta de exploração do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e Sistema Aquífero Guarani (SAG) no município de Londrina-PR para abastecimento público” (ROCHA, 2017).

Os resultados deste último trabalho mostraram a importância das águas subterrâneas para o abastecimento público no município, algo que não está muito claro no contexto cotidiano da sociedade londrinense, além disso, foi possível conduzir a formulação de cenários econômicos futuros do uso das águas subterrâneas para o consumo humano, considerando sua condição de disponibilidade, qualidade e vantagens sobre os mananciais superficiais.

Ainda segundo Rocha (2017) foi possível constatar a existência de centenas de poços tubulares profundos, principalmente de particulares e que exploram o SASG, concentrados principalmente na área central urbana de Londrina-PR, resultado que mostra grande preocupação quanto à possíveis impactos na exploração dos recursos hídricos subterrâneos.

Com isso, reflexões e hipóteses emergem no contexto do uso e gestão dos recursos hídricos subterrâneos, com possibilidade de se formular uma questão central: “O grande número de poços que explotam o SASG na área urbana de Londrina-PR está interferindo na produtividade hídrica do aquífero ao longo do tempo?”. Tendo ainda diversas questões secundárias a serem respondidas tais como: “O mapeamento espacial das áreas explotadas do SASG, sobretudo a de maior concentração de poços na área urbana de Londrina-PR, pode contribuir para a gestão hídrica do aquífero?”, “O SASG, se respeitado os limites de exploração surge como uma alternativa para a população em períodos de secas prolongadas?”, “Quais medidas devem ser tomadas buscando a sustentabilidade de aquífero?”, “Quais os problemas podem ser causados para a população caso não haja uma correta gestão da exploração do aquífero?”.

Para responder essas questões, que auxiliarão no desenvolvimento de políticas públicas visando à sustentabilidade do aquífero e uma melhor gestão e planejamento dos recursos hídricos subterrâneos, além de contribuir para o bem-estar da população, foram tomados alguns caminhos metodológicos definidos acerca dos objetivos do presente trabalho.

A primeira parte da dissertação consistiu em pesquisa bibliográfica acerca da importância da hidrogeografia e a gestão das águas subterrâneas, além de temas correlatos, possibilitando o embasamento teórico para o posterior entendimento e análise dos resultados que foram obtidos com o banco de dados de poços tubulares profundos outorgados no município de Londrina-PR a partir do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e Instituto das Águas do Estado do Paraná, com vistas a constituir uma sólida base de informação.

Em seguida, os resultados da presente pesquisa foram divididos em dois artigos científicos, com o propósito de serem publicados em periódicos indexados, no qual o primeiro foi intitulado “Evolução espaço temporal da exploração do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no perímetro urbano de Londrina/PR no período de 1977 a 2013”, que teve como objetivo principal a apresentação de informações disponíveis sobre poços tubulares profundos inseridos no município de Londrina/PR, a distribuição estatística de dados hidrodinâmicos e correlações que contribuíram para o diagnóstico da variação temporal do nível d’água e da produtividade do SASG no intervalo de tempo de 1977 a 2013.

Cabe destacar que a análise de parâmetros estatísticos tem auxiliado no entendimento acerca de fenômenos naturais como a ocorrência de água subterrânea e a vazão potencial explotável de poços, ou seja, vazão limite sem que o aquífero seja prejudicado, gerando um instrumento capaz de auxiliar os planejadores nas atividades de planejamento, gestão e gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos.

Gonçalves (2009) destaca ainda que conhecer a produtividade hídrica do aquífero se torna fundamental, pois possibilita auxiliar na construção de um modelo de gestão e outorga da água subterrânea, contribuindo para a exploração sustentável do aquífero.

Já o segundo artigo foi intitulado: “Mapeamento e evolução histórica da potociometria e reserva reguladora do SASG na área urbana de Londrina/PR”

que teve como objetivo principal apresentar o mapeamento das áreas de exploração do SASG na área urbana de Londrina/PR, com destaque, devido à maior concentração de poços, para a área central da cidade, onde foi realizada análise espacial de distribuição e evolução histórica dos poços tubulares profundos com o auxílio de Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permitiu a geração de produtos cartográficos, tais como: a evolução potenciométrica e de exploração do SASG para o recorte espacial na área de estudo (através da aplicação de método geoestatístico de interpolação).

Dessa forma, com o presente trabalho foi possível apresentar um panorama acerca da exploração do SASG em Londrina/PR e espera-se que o mesmo contribua a partir de seus resultados com a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos no município, visto que as águas subterrâneas se inserem cada vez mais como uma alternativa ao abastecimento para os mais diversos setores da sociedade, além disso, espera-se que o trabalho possa compartilhar assim o propósito de atender aos anseios da sociedade naquilo que se considera ser o bem mais precioso do terceiro milênio, além de que possa auxiliar e ser incorporado pelos planejadores municipais na gestão urbana, bem como servir como base para o bom uso do SASG garantindo o uso da água para gerações futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para que haja uma contextualização do tema deste estudo, este capítulo apresenta uma abordagem geral teórica e referencial com informações relevantes no que tange os recursos hídricos subterrâneos, os SIG, além da descrição de outras fontes importantes na realização desta pesquisa, como legislação pertinente ao tema e a caracterização da área de estudo.

2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas são um recurso renovável, em que estudos hidrogeológicos, bem como o correto gerenciamento da exploração são imprescindíveis, visto que é necessário compreender e explorar racionalmente os recursos hídricos subterrâneos para que haja um futuro sustentável para a sociedade. Sendo as águas subterrâneas definidas como aquela encontrada em três diferentes formações, as que ocorrem abaixo do nível de saturação ou nível freático, as que estão parcialmente saturadas em formações geológicas aflorantes e também naquelas que estão mais profundas e totalmente saturadas (SALES et al., 2014).

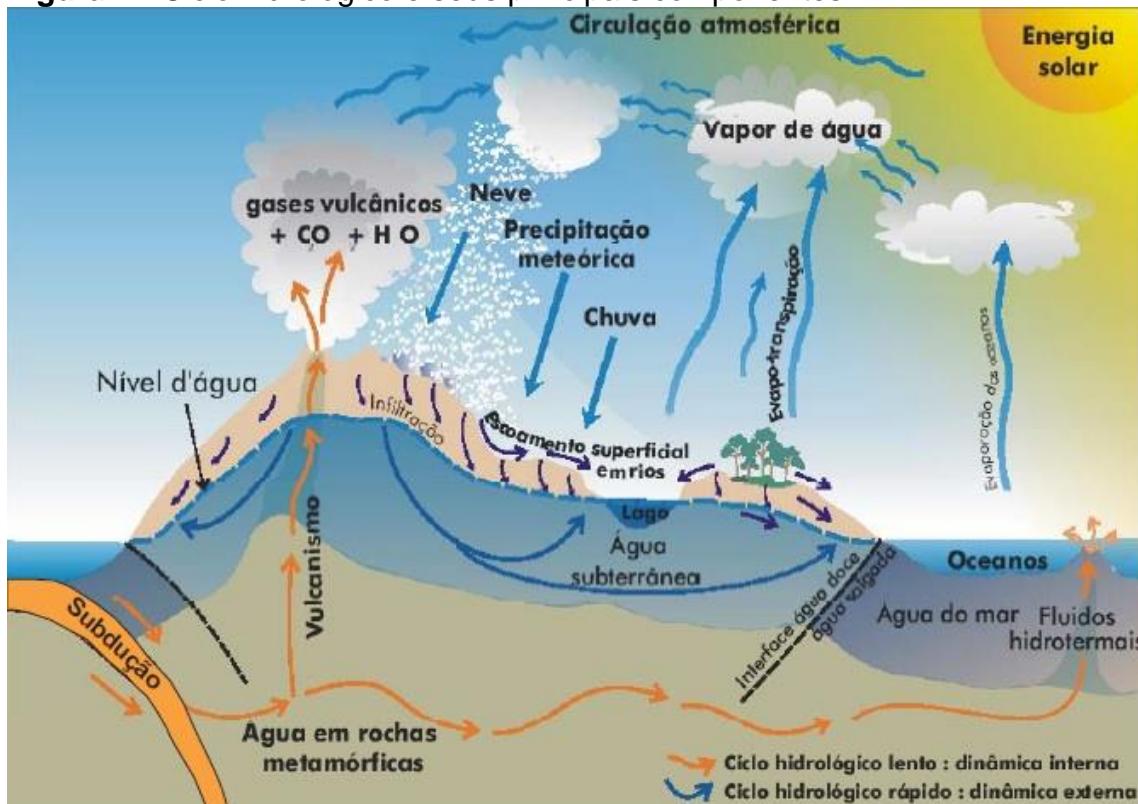
Rebouças (2006) cita as inúmeras formas que os aquíferos, ou principalmente suas formações geológicas se relacionam e modificam o armazenamento e circulação das águas subterrâneas tendo esses as mais diversas dimensões, extensões ou características. O autor explica que as formações possuem consideráveis variações que partem de alguns quilômetros quadrados e podem chegar até a milhões de quilômetros quadrados, espessuras desde alguns poucos metros até centenas de metros, com relação a porosidade e permeabilidade podem ser intergranulares ou de fraturas, possuir água de excelente qualidade, sendo essas distribuídas a população para consumo ou possuir problemas químicos, como águas muito salinizadas ou fluoretadas por exemplo, e impossibilitar o consumo humano e até mesmo águas que ocorrem na superfície ou a profundidades de milhares de metros, visto que as águas subterrâneas preenchem fraturas, poros, fissuras e outros vazios das rochas.

As águas subterrâneas estão intrinsecamente ligadas ao ciclo hidrológico, um importante aspecto biótico da natureza, consoante a isso Filho (2008) explica que praticamente toda a água subterrânea existente no nosso planeta

origina-se no ciclo hidrológico, podendo esse ser resumido como a contínua circulação da água no planeta Terra, como pode ser observado na Figura 1 e como explica Silva (2009).

[...] O ciclo hidrológico é o processo cíclico e contínuo de transporte das águas no planeta, interligando atmosfera, continentes e oceanos. É um processo complexo, impulsionado fundamentalmente pela energia solar, sendo esse ciclo o responsável pela renovação de água na terra.

Figura 1 - Ciclo hidrológico e seus principais componentes



Fonte: Karmann (2001)

O ciclo hidrológico é um dos elementos que se relacionam com a recarga, armazenamento e disponibilidade das águas subterrâneas, este ciclo tem influência pela ação da gravidade no solo e subsolo, além do tipo e da densidade da cobertura vegetal que nele se encontra, bem como por elementos e fatores climáticos como temperatura do ar, ventos, umidade relativa e insolação ao se tratar da atmosfera e superfícies líquidas. Tendo cada elemento papel de extrema importância para o manancial subterrâneo em questão.

Sales (2014) cita a temperatura do ar, evaporação, insolação e a

precipitação pluvial como elementos climáticos que influenciam grandemente na quantidade dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis. Já Goiás (2006) dá ênfase ao uso do solo e cobertura vegetal, visto que para o autor esses elementos estão diretamente associados aos processos de recarga, pois o tipo de uso e ocupação que uma determinada região está aliada a densidade e o tipo de cobertura vegetal no solo, podem aumentar ou até mesmo acabar com os processos de recarga, sendo esses elementos importantes e que devem ter cuidados especiais, uma vez que existam grandes influências humanas no meio em questão, tornando-os cada vez mais vulneráveis.

Para Rebouças (2006) o aspecto geológico é de extrema importância, pois é através dele que o processo existencial dos mananciais subterrâneos se baseia, este elemento condiciona quais serão as formas de recarga, como a água será estocada, de que forma ocorrerá a circulação e descarga, influenciando consideravelmente na qualidade das águas subterrâneas, bem como determinando todo o processo construtivo da obra de captação, como que tipo de poço será perfurado, os equipamentos e materiais utilizados e demais características que serão empregadas, sendo esse um elemento que possui uma heterogeneidade enorme.

A litologia, estratigrafia e a estrutura das formações geológicas controlam a natureza e a distribuição dos aquíferos. A litologia é a que se refere a composição mineral, o grau de compactação dos sedimentos ou rochas constituintes, bem como a distribuição de tamanho dos grãos. Já a estratigrafia explica as relações geométricas e cronológicas que ocorrem entre os diversos elementos que integram o sistema geológico. A diferença entre as superfícies das rochas devido ao intervalo de tempo que elas foram intemperizadas e que estão diretamente associadas a ocorrência dos aquíferos. (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000)

Feitosa e Manoel Filho (2000) explicam ainda que as características geométricas que surgem no sistema geológico resultado de deformações, como fraturas, falhas e dobras estão relacionadas a estrutura da formação geológica. Desta forma, conhecer a geologia da região em questão é ponto essencial para que se possa compreender a distribuição espacial dos aquíferos.

2.2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) NO PLANEJAMENTO URBANO

O conjunto de tecnologias remetidas a coletar e tratar as informações espaciais é definido por Geoprocessamento, tendo como uma das suas formas de aplicação o SIG, que é um sistema de informação que começou a ser desenvolvido por volta da década de 60, sendo o Canadá em 1964, o primeiro país a possuir um sistema com os atributos de um SIG.

Um sistema fadado ao armazenamento, manipulação, aquisição, análise, simulação, modelagem e apresentação de dados relacionados espacialmente na superfície terrestre e que integre diversas tecnologias pode ser definido como SIG, sendo esse uma característica particular do sistema de informação (ROCHA, 2000).

Segundo Marques et al (2011) com ferramentas computacionais, como os SIG, é possível manusear grande volume de dados e criar banco de dados geo-referenciados, automatizando assim a produção de documentos cartográficos, além de integrar dados de diversas fontes, de modo que as análises complexas são mais facilmente realizadas, sendo de fundamental importância para manipular informações geográficas.

Por se tratar de um sistema que integra diversos meios como a aquisição, o armazenamento, a análise (seja ela estatística ou de modelos espaciais) e a apresentação de resultados por meio de representações em gráficos e mapas de dados geográficos relativos a referências espaciais associadas aos fenômenos que estão sendo avaliados, os SIG ao utilizar as informações disponíveis, constituem-se em uma ferramenta primordial para a tomada de decisão, pois representa as atividades inteligentes do homem no estudo do território e na procura das melhores soluções para os problemas. (ALMEIDA et al., 2007)

Muitos apontam como um dos principais benefícios da sua utilização a capacidade de integração, interação e inter-relação da informação geográfica de variada fonte, formato e natureza. (BORGES, 2000)

De modo que além dessas competências, salienta-se a possibilidade de executar análises espaciais e temporais essenciais, o tratamento de dados de diferentes escalas, a construção de cenários e a elaboração de modelos que

auxiliarão o planejamento e a tomada de decisões. (DOMINGUES & FRANÇOSO, 2008)

A base de dados é o elemento mais relevante do SIG (PEREIRA; SILVA, 2001). Frequentemente, se utilizam três tipos de dados no planejamento urbano: os físicos territoriais que dizem respeito às características físicas de um território, sendo essa a principal metodologia de análise e tecnologias de aquisição de dados (RAMOS, 2005). Os socioeconômicos, em que a principal fonte se dá através de pesquisas censitárias feitas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, e que são realizadas regularmente a cada 10 anos, contemplando um amplo sistema de informações, tendo como exemplo o nível de renda, educação, faixa etária e acesso a infraestruturas como rede de água e esgoto. E por fim os dados cadastrais, cuja principal fonte são os levantamentos realizados através de imagens de satélites ou fotografias aéreas, referindo-se assim às características do ambiente construído. (RAMOS, 2005)

Os SIG, trabalham com duas bases de dados integradas, a espacial (locacional) que é aquela que contém a informação por meio de coordenadas digitais e que é originária de mapas ou pontos, linhas e polígonos, chamados de detecção remota. Já a base de dados dos atributos (estatística) é a que contém a informação por meio das características ou qualidades da configuração espacial. Ao se utilizar os dois tipos de bases de dados integrados, os SIG tornam-se ferramentas capazes de investigar assuntos a respeito de diversos temas, como a localização, condições, tendências ou percursos e padrões, além de ser utilizado para fazer simulações. (SANTANA, 2009)

Ao se conhecer a realidade urbana, é possível monitorar de maneira eficaz os impactos resultantes das políticas públicas, além de disponibilizar as mais diversas informações dos diversos setores da administração local, o que faz com que se tenha uma maior eficiência para se realizar os trabalhos e se oferece à população serviços com transparência, qualidade e acessibilidade, gerando um maior bem-estar para a população. (DOMINGUES, FRANÇOSO, 2008)

Os SIG se mostram então, ferramentas indispensáveis na gestão pública, contribuindo para que as decisões tomadas pelas administrações públicas occasionem áreas urbanas desenvolvidas de forma saudável e estruturada. (ALMEIDA et al., 2007)

Através das inúmeras vantagens da aplicação dos SIG, os planejadores urbanos aumentaram o interesse em lidar com esse conjunto de instrumentos em suas atividades práticas. Muito se deve a forte presença de ferramentas SIG e também de mapas online, além dos inúmeros avanços nos softwares livres, bem como na promoção da educação à distância, no aumento do acesso a base de dados abertos e a disseminação das geotecnologias no setor privado.

Aliado ao interesse crescente dos planejadores os SIG possuem papéis importantes no planejamento urbano, que foram se adaptando as novas tecnologias e que são apresentados na Figura 2, em uma análise de acordo com Bugs (2014).

Figura 2 – Os papéis dos SIG no planejamento urbano

Período	Teoria	Papel das tecnologias	Tecnologias
1960	Positivista, ciência aplicada: planejamento racional.	Tecnologias utilizadas por especialistas, fornecem a informação necessária para um processo racional de planejamento, neutro e objetivo.	Computadores de grande porte e custo elevado, início dos SIG.
1970	Economia política: planejamento advocatício.	Tecnologias são consideradas ferramentas inherentemente políticas, reforçando as estruturas de poder existentes.	Advento dos PCs e desenvolvimento de tecnologias como o CAD.
1980	Comunicativa: planejamento comunicativo.	O conteúdo das análises realizadas pelos especialistas são frequentemente subvalorizados face à importância atribuída ao modo como essa informação é transmitida.	Softwares SIG, GPS portáteis, imagens de satélite.
1990	Pensamento pluralista: planejamento colaborativo.	Tecnologias são percebidas como facilitadoras da interação social, da comunicação interpessoal, do debate para alcançar objetivos coletivos, e envolver a comunidade.	WebGIS, SIG livre, Sistemas de Suporte ao Planejamento, PPSIG.
2000 em diante	Planejamento eletrônico.	Ubiquidade das tecnologias. Inclusão do conhecimento local na base de dados. Cidadãos como sensores. Cidades inteligentes.	Web 2.0, VGI, Neogeography, <i>Google Earth</i> , realidade aumentada.

Fonte: Bugs, (2014), adaptado de Klosterman, 2001; e Footh et al. 2009.

Segundo Bugs (2014), a abordagem acerca do planejamento urbano na década de 1960 foi a de um planejamento racional, muito influenciado pelo paradigma positivista, onde as tecnologias disponíveis eram utilizadas por departamentos governamentais e universidades e serviam para fornecer suporte ao planejamento neutro e objetivo, que não contava com a participação do público. Na década de 1970, passou a se questionar a abordagem positivista de modo que as tecnologias eram vistas como beneficiadoras dos interesses políticos e não das

comunidades.

A partir da teoria comunicativa de Habermas, a década de 1980 foi influenciada por um planejamento comunicativo e que fosse voltada para a participação pública no processo decisório com fins no planejamento, tal que as tecnologias tinham o papel de facilitar a transmissão das informações e a comunicação, de modo que simultaneamente a isso, às geotecnologias se tornaram mais acessíveis.

Foi possível observar então que desde a década de 1990, houve uma tendência crescente em se utilizar os SIG. Pois os cidadãos se envolveram ainda mais com o planejamento o que causou uma equipe multidisciplinar, pluralista e que teve como ênfase o planejamento colaborativo. (BUGS, 2014)

Porém, as décadas seguintes não são analisadas pelo autor. O que fica claro é que com o maior nível tecnológico e sendo esse cada vez mais acessível à população, o papel dos SIG no planejamento urbano irá aumentar, pois inúmeras aplicações começam a surgir, aliadas as novas tecnologias cada vez mais difundidas globalmente, como as cidades inteligentes, os cidadãos com sensores, o estabelecimento do planejamento eletrônico e principalmente com a inclusão do conhecimento dos habitantes na base de dados espacial. (RAMOS, 2005)

A utilização dos SIG aumentou consideravelmente nas últimas décadas, isso ocorreu pois o método possibilita a coleta, armazenamento e principalmente o processamento dos dados de forma georreferenciada, dessa forma é possível com os SIG melhorar ainda mais o gerenciamento das informações e de forma ainda mais concreta integralizar o processo de tomada de decisão das mais diversas áreas, como a proteção ambiental por exemplo, auxiliando no planejamento local, ou seja, dos próprios municípios, bem como de áreas maiores como o estado e até mesmo o país (SILVA, 2004).

A necessidade de facilitar a tomada de decisão, dinamizando cada vez mais o processo de gestão fez com o uso dos SIG fossem cada vez mais difundidos na gestão dos recursos hídricos, para isso dois elementos principais precisam ser entendidos. Segundo Cirilo et al. (2000) de um lado está a progressiva complexidade em se administrar os diversos usos da água, que força a melhoria da dinâmica de gestão dos recursos hídricos, do outro está a também crescente oferta de serviços para tal, que resulta do desenvolvimento tecnológico, que aperfeiçoa

modelos matemáticos computacionais e traz melhores representações dos sistemas físicos através dos SIG e do sensoriamento remoto, a junção desses dois elementos auxilia na utilização dos SIG no gerenciamento dos recursos hídricos.

2.3 GEOESTATÍSTICA

A Teoria das Variáveis Regionalizadas foi desenvolvida na década de 60 por Matheron (1963), o autor definiu a teoria como uma função espacial numérica que dependia da localização de determinado ponto, ou seja, não apresentava continuidade aparente, dessa forma suas características não podiam ser definidas através de uma simples função matemática.

O autor elaborou a teoria a partir de constatações de Krige (1951) que disse não fazer sentido a não consideração das distâncias entre as amostras ao se realizar a abordagem clássica da amostragem. Ao se aplicar a teoria em fenômenos naturais ela foi denominada como geoestatística, tendo então como objetivo caracterizar espacialmente determinada variável a fim de demonstrar a correlação de um conjunto amostral. Sendo possível então, segundo Yamamoto e Landim (2013) a determinação de erros relativos ao processo de interpolação.

Através da aplicação da geoestatística é factível estimar valores em regiões em que eles não são conhecidos, o método apresenta ainda o erro associado ao ponto ou região em que se realiza o estudo, para isso é necessário que se tenha as coordenadas geográficas para que se aplique a análise espacial.

Visto que de acordo com Journel e Huijbregts (1978) as variáveis podem apresentar inúmeras características, assumindo assim qualquer valor dependendo do local em que se encontra. Dessa forma, segundo Landim (1998) é de extrema importância a realização de uma análise variográfica, necessária para determinar o modelo de correlação que será utilizado. A análise fundamenta-se na elaboração de um variograma, ou semivariograma como é definido por alguns autores.

Consoante a Yamamoto e Landim (2013) o objetivo de um semivariograma é medir o quanto amostras vizinhas são parecidas, ou seja, qual a distância máxima em que os valores se correlacionam. Ao se aplicar o semivariograma se supõe que uma maior semelhança entre pontos se dará

naqueles em que a distância espacial ou temporal entre eles for a mais próxima possível, fazendo com que a variância diminua, já em pontos mais afastados entre si a variância irá aumentar, diminuindo a semelhança entre os pontos.

Com essa análise é possível observar e entender o comportamento de determinada variável, além de ser exequível a identificação da dimensão da zona de influência das amostras. Após a elaboração do semivariograma é utilizado então um método de interpolação, que no caso do estudo em questão será a *Krigagem*.

A *Krigagem* é o processo geoestatístico que se utiliza dos pontos amostrados em uma determinada região e estima os dados de pontos que não possuem nenhum valor, esse processo utiliza então pontos de controle, sejam eles amostras ou dados de campo e define a equação matemática que será utilizada na interpolação. Ou seja, é um processo que se utiliza do semivariograma e correlaciona os pontos a fim de se chegar em uma estimativa para os pontos desconhecidos na área do estudo, apresentando ainda o erro dessa estimativa, sendo essa a principal diferença em relação aos demais algoritmos existentes. (MELLO, 2004)

O autor cita ainda as mais frequentes formas de *krigagem*, são elas: a simples, ordinária, de bloco, simples com médias locais variando, com modelo de tendência ou universal, média, intrínseca, dos resíduos, dual e *krigagem* fatorial.

2.4 LEGISLAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), foi criada em 8 de janeiro de 1997, por meio da Lei Federal nº 9.433 e estabelece os fundamentos que devem ser seguidos para com a sua conservação, tal que o Art. 2º da Lei traz os objetivos e demonstra a importância da gestão correta dos recursos hídricos.

- I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;
- III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (BRASIL, 1997).

Apesar da ênfase da PNRH às águas visíveis, ou seja, as superficiais, as ações e intervenções com a implementação da Lei se dá seja nas

águas superficiais ou subterrâneas, não havendo nenhuma forma de dissociação entre si.

A resolução nº 22 de 24 de maio de 2002 (BRASIL, 2004), reforça ainda a ideia de se abordar as águas subterrâneas nos planos de recursos hídricos visando a promoção da caracterização dos aquíferos, bem como a definição das inter-relações dos mesmos com os demais corpos hídricos que o circundam, além do meio ambiente como um todo, objetivando-se uma gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.

Além disso, a resolução CONAMA nº 396/08 têm por objetivo em seu Art. 3 classificar as águas subterrâneas através de categorias, visto que essas são enquadradas de acordo com sua utilização, desta forma busca-se uma simplificação do processo de gestão, facilitando o trabalho dos gestores, a seguir é possível observar as classes em que as águas subterrâneas podem ser divididas.

I - Classe Especial: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses destinadas à preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral e as que contribuam diretamente para os trechos de corpos de água superficial enquadrados como classe especial;

II - Classe 1: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que não exigem tratamento para quaisquer usos preponderantes devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;

III - Classe 2: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;

IV - Classe 3: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, para as quais não é necessário o tratamento em função dessas alterações, mas que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas Características hidrogeoquímicas naturais;

V - Classe 4: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que somente possam ser utilizadas, sem tratamento, para o uso preponderante menos restritivo; e

VI - Classe 5: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas a atividades que não têm requisitos de qualidade para uso (CONAMA nº 396/2008).

Para Paulo Silva (2011), projetos que conscientizem a população, visando a promoção do uso sustentável dos recursos hídricos, é um dos primeiros passos para que políticas públicas de interesse hídrico possam ser realizadas. O autor salienta ainda que é necessário criar ações conjuntas que tratem da questão

dos recursos hídricos e do uso do solo, pois são elementos que estão intrinsecamente ligados.

No estado do Paraná, foi criado em 26 de novembro de 1999, o Sistema Estadual de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SEGR/PR) juntamente com a Política Estadual de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 12.726. O SEGR/PR tem por objetivo:

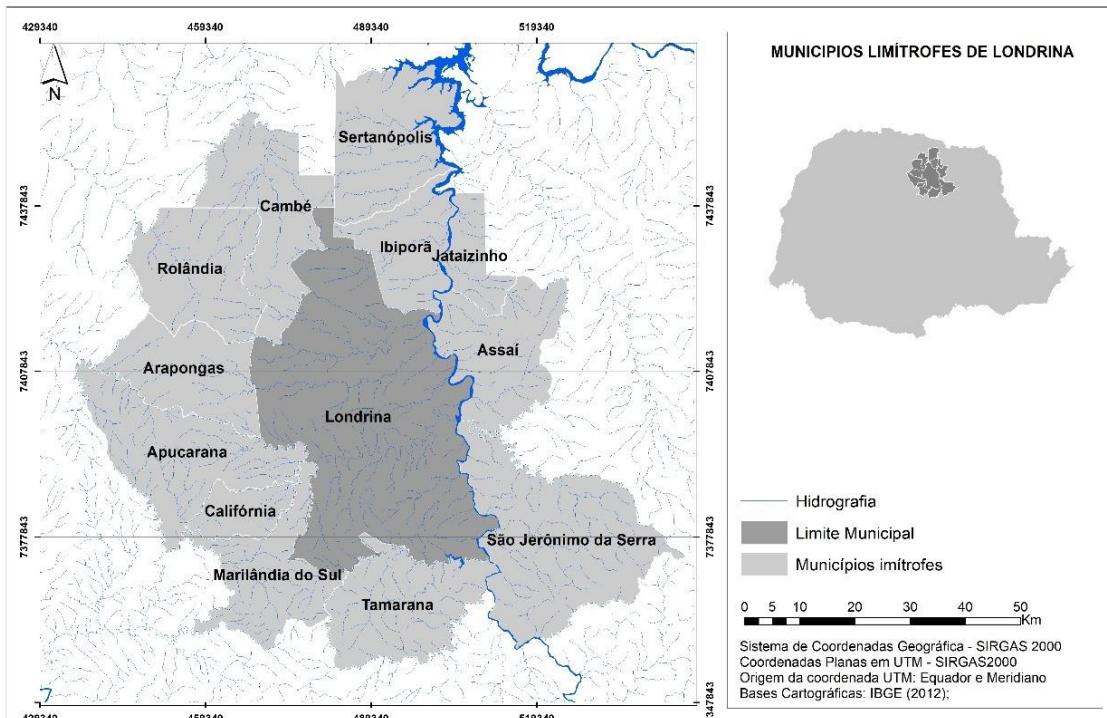
- I - coordenar a gestão integrada das águas;
- II - arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos;
- III - implementar a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH/PR);
- IV - planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos e dos ecossistemas aquáticos do Estado;
- V - promover a cobrança pelos direitos de uso de recursos hídricos.

O sistema é composto pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH), Instituto das Águas do Paraná, Comitês de Bacia Hidrográfica, Agências de Bacia Hidrográfica e Secretaria do Meio Ambiente (SEMA).

3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho encontra-se nos limites geográficos do município de Londrina/PR e que será melhor apresentada no decorrer do trabalho. O município está localizado a $23^{\circ} 18' 37''$ de latitude Sul e $51^{\circ} 09' 46''$ de longitude Oeste. Os limites territoriais municipais são: Sertanópolis, Cambé, Ibirapuã, Arapongas, Apucarana, Marilândia do Sul, Tamarana, Ortigueira, São Jerônimo da Serra e Assaí, conforme Figura 3. O município possui população estimada para o ano de 2019 de 569.733 habitantes em uma área territorial de 1.652,569km², possuindo assim densidade demográfica de 344,76 hab./km². (IBGE, 2019, org. ROCHA, D. A.)

Figura 3 - Limites municipais de Londrina/PR



Elaboração: Diego A. Rocha - Data: Fevereiro/2020

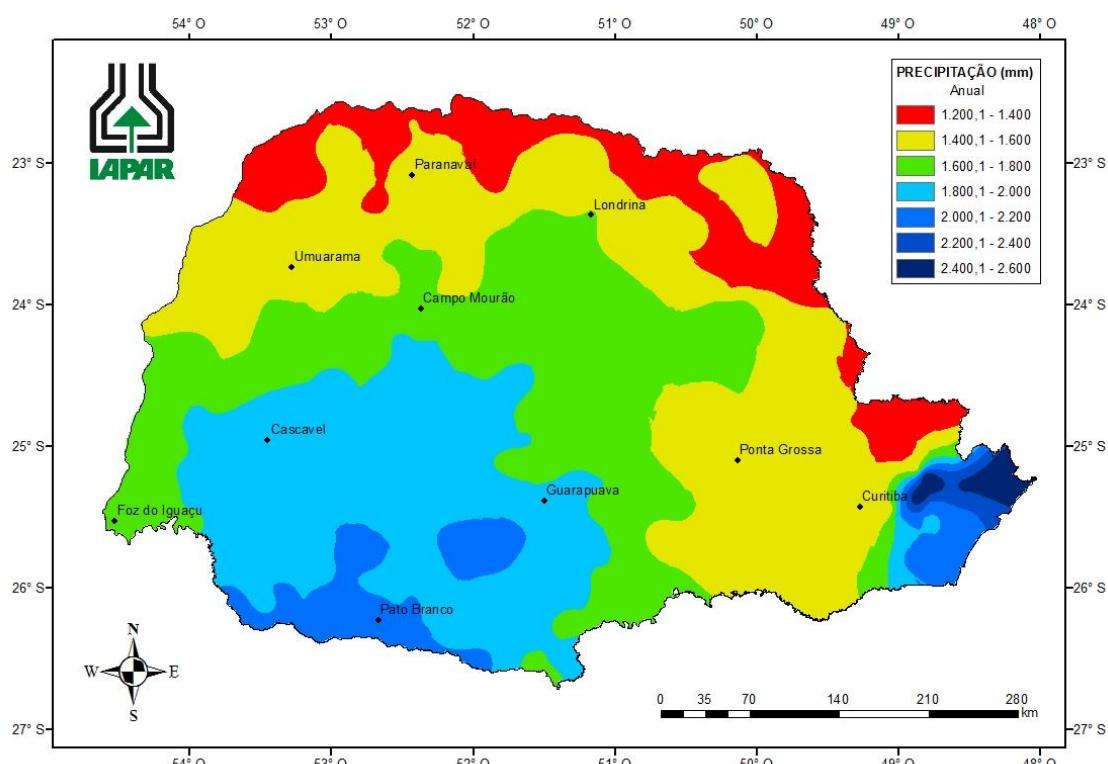
3.1 CLIMA

O clima de Londrina é considerado do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen, sendo assim tido como de clima subtropical úmido, com a ocorrência de chuvas em todas as estações, porém podendo ocorrer diminuição da

quantidade de chuvas no período de inverno. A temperatura média do mês mais quente é, normalmente, superior a 25,5 °C e a do mês mais frio, inferior a 16,4 °C, tendo umidade relativa do ar média, em torno de 69%.

Além disto, é possível observar no mapa de precipitação do estado do Paraná, que a média anual para o município de Londrina/PR varia entre 1600 – 1800 mm, de acordo com dados do IAPAR (2019), conforme pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4 - Precipitação média anual para o estado do Paraná

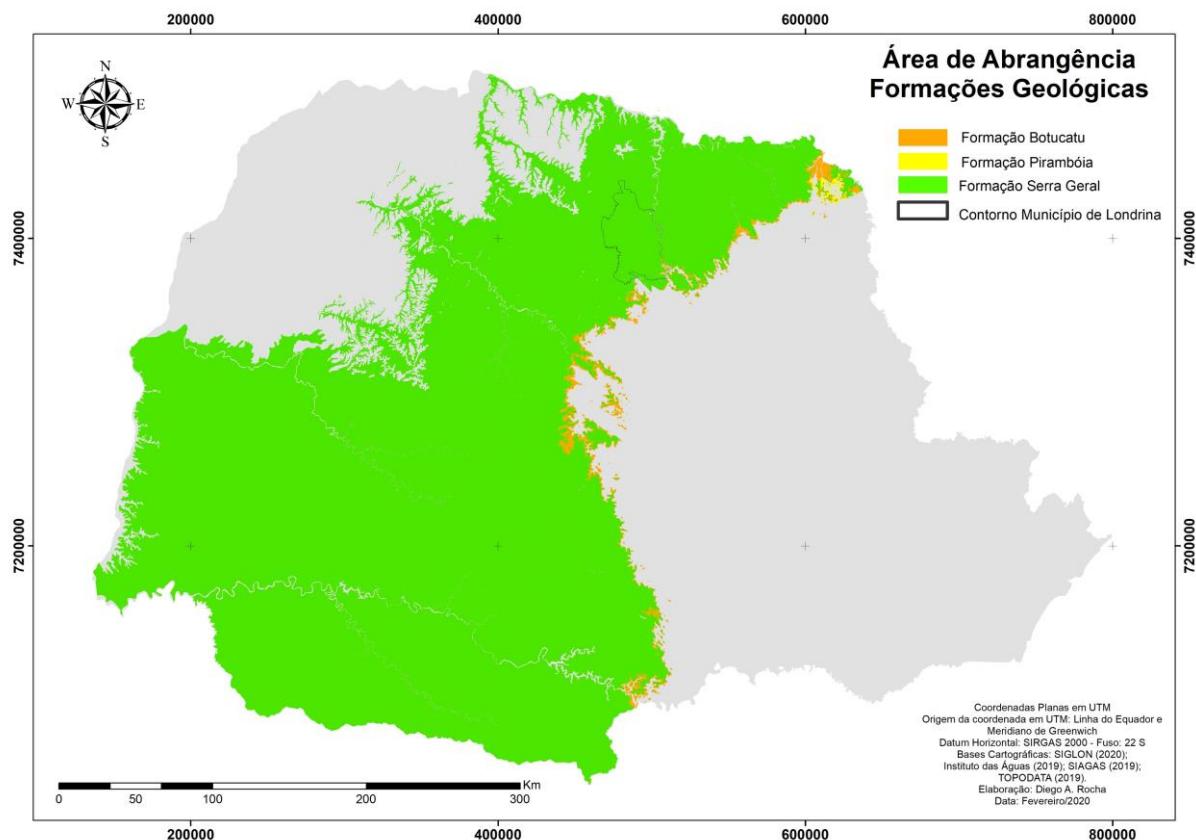


Fonte: IAPAR (2019)

3.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

Consoante a Celligoi (1993) Londrina está localizada na porção sudeste da Bacia Sedimentar do Paraná, com ocorrências de formações geológicas aflorantes pertencentes ao Grupo São Bento. Esse Grupo é composto por arenitos eo-fluviais das formações Botucatu e Pirambóia e rochas predominantemente basálticas pertencentes à Formação Serra Geral, dado que essa última formação é predominante na região em estudo, conforme Figura 5.

Figura 5 - Mapa de abrangência da Formação Serra Geral



Segundo Manasses (2007), a Formação Serra Geral é caracterizada pela sequência de derrames toleíticos ocorridos principalmente durante o Cretáceo. Sua área de ocorrência é de cerca de 109.000 Km², em território Paranaense e se distribui geomorfologicamente por toda a extensão do Terceiro Planalto Paranaense, com intrusões magmáticas que se estendem por outras províncias morfológicas do estado.

De acordo com Peate et al. (1992) os derrames ocorridos na região se deram através de condições não explosivas, o que gerou diversos e extensos platôs. O magmatismo ocorreu ainda em clima árido, parando e recomeçando por diversas vezes, ou seja, de forma intermitente e assincrônica.

Consoante a Rocha (2017) a Formação Serra Geral apresenta pequenas quantidades de riolitos e riodacitos, porém tem sua grande maioria composta por rochas ígneas vulcânicas, que são comprovadas por basaltos toleíticos e andesitos basálticos. Essa formação possui ainda diversos lineamentos estruturais, tal que o armazenamento e a circulação de água subterrânea ocorrem

por esses lineamentos, criando assim uma importante unidade hidro geológica, o SASG.

3.3 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

De acordo com Santos (2009) o município de Londrina/PR possui dois tipos de ocorrência de águas subterrâneas, um de porosidade primária intergranular, que está diretamente relacionado à rocha alterada e à zona saturada da camada de solo, denominado como aquífero freático e o outro, que está condicionado à existência de descontinuidades das rochas ígneas, classificado então como aquífero fissural, ou por fraturas.

De acordo com Celligoi (1993) e Zanetti (2012) os aquíferos fissurais, ocorrem devido as características estruturais litológicas e a distribuição das zonas de fraturamentos ou falhamentos nas rochas. Essa condição de descontinuidade é que determina a vazão obtida em cada poço ou sua produtividade hídrica, pois essas zonas limitam ou intensifica, o armazenamento e circulação da água subterrânea no meio.

3.3.1 Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

O SASG é um sistema aquífero que se estende além do estado do Paraná, ultrapassando ainda os limites de Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo e Mato Grosso, ocorrendo ainda em países como Argentina, Paraguai e Uruguai. Porém, no Paraná está condicionado ao terceiro planalto paranaense, tendo área em torno de 110.000 Km² e possuindo espessura máxima de 1400 metros, segundo explica Souza (2004).

O aquífero é formado por rochas ígneas da Formação Serra Geral, tal que segundo Celligoi e Viana (2002) o SASG evidencia-se litologicamente de rochas vulcânicas e cristalinas, formando assim a camada confinante do aquífero Botucatu. O autor ainda salienta que as rochas que compõe o aquífero originalmente não permitiriam o armazenamento e a circulação de água pelas estruturas, porém através do próprio resfriamento das rochas e ação de alguns eventos tectônicos foi criada uma certa porosidade e permeabilidade secundárias, possibilitando assim que

ocorra o armazenamento e circulação de água através de fraturas ou falhas presentes nas rochas.

Manasses et al, (2007) destaca então, que por isso o SASG se evidencia como um aquífero de difícil avaliação, visto que sua condutividade hidráulica é modificável e extremamente complexa, explicando assim uma forte heterogeneidade e anisotropia.

Segundo Mendes et al. (2002) relata que as águas que pertencem à Formação Serra Geral normalmente apresentam algumas características físico-químicas específicas, sendo comumente classificadas como bicarbonatada cálcica, porém Filho et al. (2003) salienta que também existe a ocorrência de águas bicarbonatadas cálcicas sódicas.

Apesar de haver inúmeras dificuldades na exploração do SASG, a unidade aquífera apresenta um grande número de poços outorgados no Paraná, tal que de acordo com Mourão (2011) existem mais de 21.000 poços cadastrados no banco de dados do SIAGAS.

3.4 GEOMORFOLOGIA

Conforme anteriormente explicado por Celligoi (1993) a área de estudo está situada no terceiro planalto paranaense, localizada na porção sudeste da Bacia Sedimentar do Paraná, onde existe a ocorrência de afloramentos de rochas basálticas pertencentes à Formação Serra Geral.

De acordo com Maack (2002, p. 419) o terceiro planalto paranaense representa a escarpa mesozoica, recebendo o nome de Serra da Boa Esperança, a serra se constitui como a formadora da encosta da escarpa da Serra Geral do Paraná. A área do Planalto de Londrina é de 3.233,83 km², de modo que em uma área de 2475,50 km² a classe de declividade predominante é menor que 12%. A variação da altitude do relevo varia entre 360 metros e 1180 metros, apresentando gradiente de 820 metros para toda área municipal. O Planalto de Londrina tem por características os topos alongados, seus vales são em "V" e suas vertentes são convexas, tal que suas formas são modeladas em rochas da Formação Serra Geral (MINEROPAR, 2006). Segundo Carmello (2011) Londrina se encontra num relevo em que há uma certa regularidade nas áreas de ondulação.

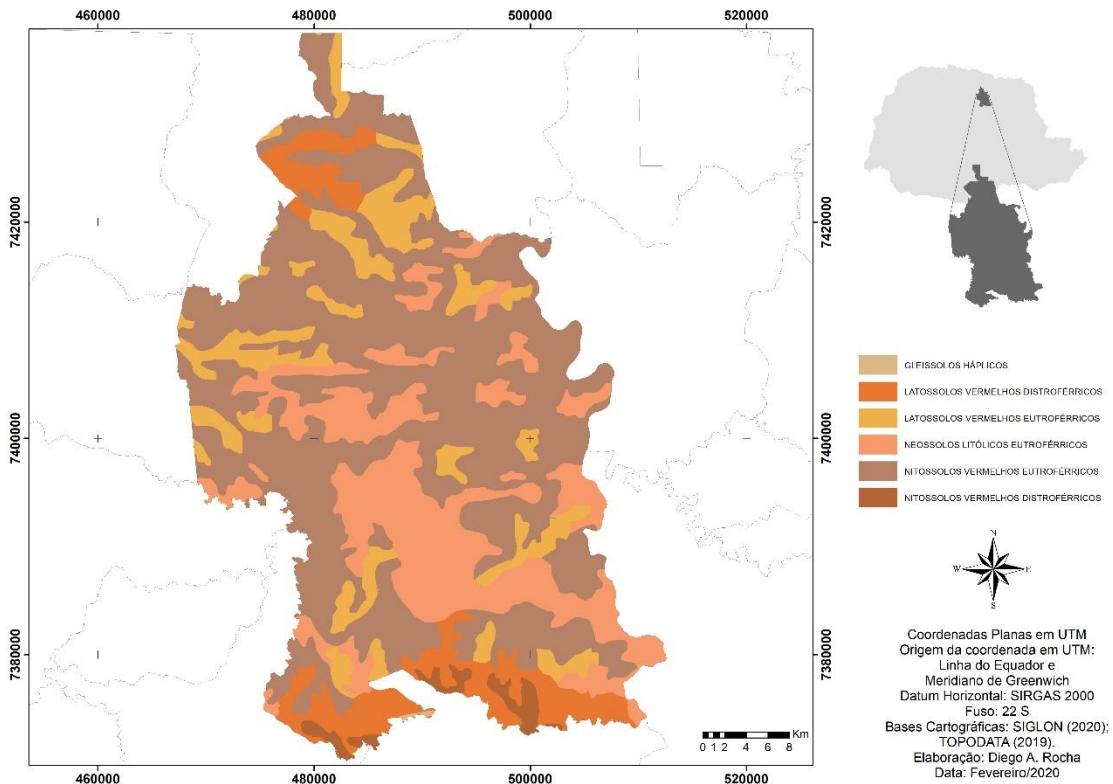
3.5 PEDOLOGIA

Segundo Maack (2002) o terceiro planalto paranaense possui em sua maior parte solos do tipo argilosos vermelhos que são aqueles decompostos das rochas eruptivas básicas. Esse tipo de solo contém potencial agrícola elevado, porém são necessárias muitas vezes técnicas de correção e adubação, visto que por causa de sua constante utilização, esses solos têm tendência a apresentar erosões. (LARINI, 2013)

Carmelo (2011) salienta ainda que o vulcanismo fissural gerou espessas camadas de derramas de lavas, recobrindo assim grande parte do terceiro planalto paranaense, sendo que no município de Londrina de acordo com dados da Prefeitura Municipal de Londrina (2019) a camada de solos vai de dezenas de metros em regiões de espiões, até mesmo a menos de um metro próximo aos cursos d'água, no qual a água verte através de uma superfície compacta do basalto.

No município de Londrina/PR, são encontrados diversos tipos de solo, que variam de acordo com a topografia da região, conforme a Figura 6, contudo em sua maior parte o solo é de origem basáltica, porém, por haver diversos tipos de solo a fertilidade encontrada é variável. (PREFEITURA MUNICIPAL DE LONDRINA - PR, 2019).

Figura 6 - Pedologia do município de Londrina/PR



3.6 HIDROGRAFIA

De acordo com dados da Prefeitura Municipal de Londrina (2019) o subsistema hidrográfico do município verte no sentido Leste, isso é explicado pois o relevo é inclinado para o Rio Tibagi, tal que esse possui sentido Sul-Norte. Porém, isso demonstra uma diferença do subsistema hidrográfico do município em comparação com o sistema hidrográfico do Paraná, que em sua grande maioria drena no sentido Oeste.

De acordo com Barros (2008) o município de Londrina está localizado na bacia hidrográfica do Rio Tibagi, considerado esse um dos afluentes mais importantes do Rio Paranapanema, que desemboca na bacia do rio Paraná.

O autor salienta ainda que as bacias hidrográficas do Jacutinga, Cambé, Lindóia, Limoeiro, Três Bocas e Cafetal são as principais bacias da área urbana de Londrina.

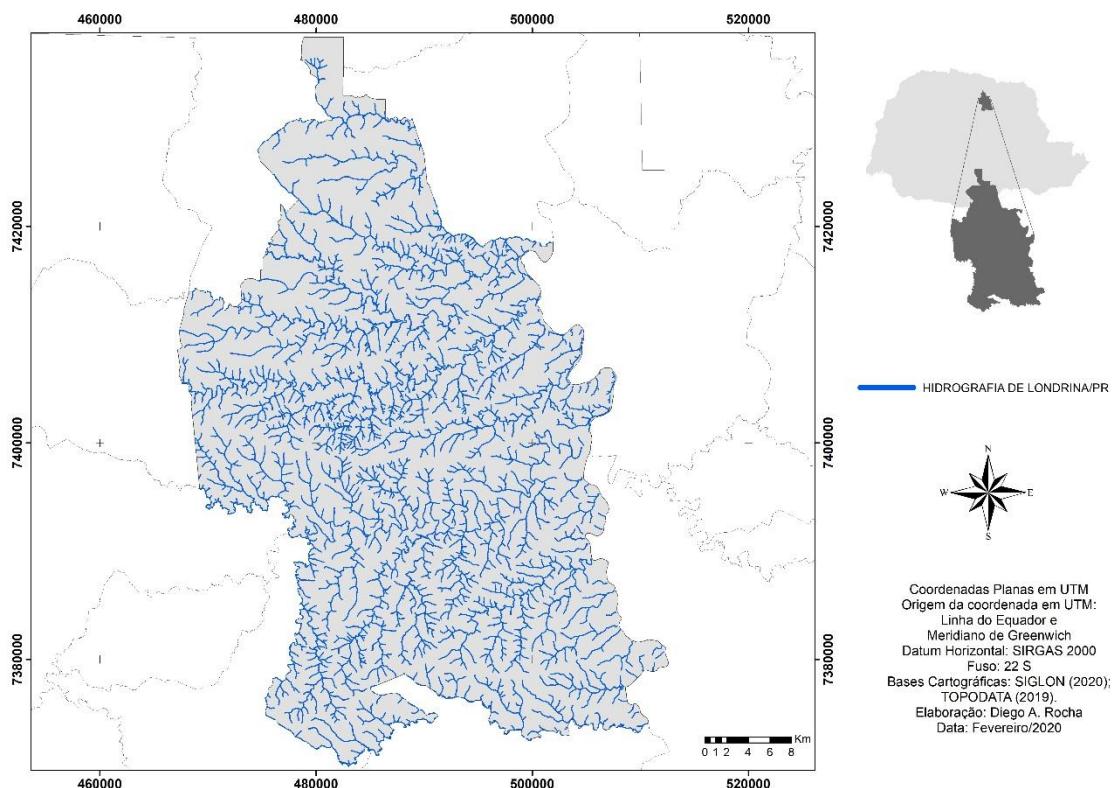
A hidrografia de Londrina, segundo Juliano Silva (2011) é caracterizada por uma drenagem natural em que suas formações são em vales e os córregos possuem água fluindo em todas as épocas do ano, ou seja, são de caráter

perene. A rede de drenagem possui um regime hidrográfico fluvial caracterizado por uma grande quantidade de afluentes e subafluentes, sendo assim considerada numerosa e bem distribuída.

O principal rio de Londrina/PR é o Tibagi, que possui grande potencialidade hídrica e percorre uma extensão aproximada de 69,25 km no município, porém outros podem ser citados como o Taquara e o Apucarana. O município possui ainda inúmeros ribeirões importantes como o Apertados, Cafezal, Apucaraninha, Jacutinga, Cambezinho, Bom Retiro e Quati. (PREFEITURA MUNICIPAL DE LONDRINA, 2019)

A Figura 7 apresenta o mapa de hidrografia do município de Londrina.

Figura 7 - Hidrografia do município de Londrina/PR



4 ARTIGO A: EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA EXPLORAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG) NO PERÍMETRO URBANO DE LONDRINA/PR NO PERÍODO DE 1977 A 2013.

4.1 RESUMO

A degradação crescente dos recursos superficiais, somada às tendências de aumento de consumo e a consequente diminuição da disponibilidade de água, são fatores que incentivam cada vez mais a discussão acerca dos riscos da gestão incorreta dos recursos subterrâneos e o impacto futuro para a sociedade e meio ambiente. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo principal apresentar diagnóstico situacional da disponibilidade de informações sobre poços tubulares profundos inseridos no perímetro urbano do município de Londrina/PR, bem como apresentar o diagnóstico da variação temporal do nível d'água e da produtividade do SASG no intervalo de tempo de 1977 a 2013, formando uma base referencial e de dados essenciais e acessíveis para consulta de tomadores de decisão e planejadores dos recursos hídricos. Dessa forma, o levantamento de poços tubulares profundos cadastrados em agências oficiais permitiu a seleção de 226 poços tubulares profundos locados no perímetro urbano do município de Londrina/PR possibilitando a realização de uma análise evolutiva histórica e estatística de importantes parâmetros hidrodinâmicos distribuídos em quatro classes temporais: 1977-1985, 1986-1994, 1995-2003 e 2004-2013. A partir dos resultados foi possível demonstrar confrontando dados de censos oficiais que o aumento do número de poços tubulares profundos instalados no SASG, diferença positiva de cerca de 1230% entre os poços da classe 1 e o acumulado na classe 4, está estreitamente ligado a expansão populacional e domiciliar do município, sendo o primeiro com 89% de crescimento entre os anos de 1980 e 2019, e o segundo com 57% de efusão apenas entre o período 1991 a 2010. Os dados apresentados demonstram que a evolução positiva do número de poços ao longo das classes temporais na área de estudo, como demonstraram os índices estatísticos, afeta de maneira significativa a dinâmica parâmetros hidrodinâmicos analisados como Nível Estático-NE (m), que possuía mediana de 31 metros na classe 1 e passou a ter mediana de 34,05 metros para a classe 4, Nível Dinâmico-ND (m) que tinha mediana de 55 metros na primeira classe e piorou para 65 metros para a classe 4, Vazão-Q (m^3/h) em que a mediana inicial era de 14 m^3/h passou para apenas 4 m^3/h de mediana para a classe 4 e Capacidade Específica-Q/s ($m^3/h/m$) que sofreu grandes modificações desde a classe 1 em que tinha mediana de 1,34 $m^3/h/m$ e na última classe analisada passou a ter 0,2 $m^3/h/m$, demonstrando assim que os parâmetros analisados foram sofrendo grandes impactos. Sendo assim, o gerenciamento adequado das águas subterrâneas é ação obrigatória para restauração desse recurso renovável, caso isso não ocorra os futuros poços podem sofrer ainda mais com a diminuição da oferta de água, prejudicando diretamente a população envolvida, demonstrando a partir dos resultados encontrados que a tendência decrescente do nível da água é muito preocupante, podendo até criar uma crise hídrica em longo prazo.

Palavras-chave: Poços tubulares; Gestão hídrica; Parâmetros hidrodinâmicos; Crise

hídrica; Águas subterrâneas.

4.2 ABSTRACT

The increasing degradation of surface resources, added to trends in increased consumption and the consequent decrease in water availability, are factors that increasingly encourage discussion about the risks of incorrect management of underground resources and the future impact on society and the environment. Thus, the present article has as main objective to present situational diagnosis of the availability of information about deep tubular wells inserted in the urban perimeter of the city of Londrina/PR, as well as to present the diagnosis of the temporal variation of the water level and the productivity of the SASG in the time span from 1977 to 2013, forming a reference and essential and accessible data base for consultation with decision makers and water resource planners. Thus, the survey of deep tubular wells registered with official agencies allowed the selection of 226 deep tubular wells located in the urban perimeter of Londrina/PR, enabling the realization of a historical and statistical evolutionary analysis of important hydrodynamic parameters distributed in four temporal classes: 1977-1985, 1986-1994, 1995-2003 and 2004-2013. From the results it was possible to demonstrate by comparing data from official census that the increase in the number of deep tubular wells installed in the SASG, a positive difference of about 1230% between the class 1 wells and the accumulated in class 4, is strictly linked to population expansion and household housing in the municipality, the first with 89% growth between the years 1980 and 2019, and the second with 57% effusion only between the period 1991 to 2010. The data presented show that the positive evolution of the number of wells throughout over the time classes in the study area, as shown by the statistical indices, significantly affects the dynamic hydrodynamic parameters analyzed as Static Level-NE (m), which had a median of 31 meters in class 1 and now has a median of 34,05 meters for class 4, Dynamic Level-ND (m) which had a median of 55 meters in the first class and worsened to 65 meters for class 4, Flow-Q (m^3/h) in which the initial median was $14 m^3/h$, it changed to just $4 m^3/h$ of median for class 4 and Specific Capacity-Q/s ($m^3/h/m$), which has undergone major changes since class 1, with a median of $1,34 m^3/h/m$ in the last analyzed class increased to $0,2 m^3/h/m$, thus demonstrating that the analyzed parameters were suffering great impacts. Therefore, the adequate management of groundwater is a mandatory action for the restoration of this renewable resource, if this does not occur, future wells may suffer even more from the decrease in water supply, directly harming the population involved, demonstrating from the results found that the downward trend in water levels is very worrying, and could even create a water crisis in the long run.

Key words: Tubular wells; Water management; Hydrodynamic parameters; Water crisis; Groundwater.

4.3 INTRODUÇÃO

A degradação crescente dos recursos superficiais, somada às tendências de aumento de consumo e a consequente diminuição da disponibilidade de água, são fatores que incentivam cada vez mais a discussão acerca dos riscos da gestão incorreta dos recursos subterrâneos e o impacto futuro para a sociedade e meio ambiente. Deste modo, os recursos hídricos subterrâneos crescentemente se mostram como um recurso estratégico que necessitam de estudos cada vez mais aprofundados para compreensão de sua dinâmica hidrogeológica e a seu potencial de disponibilidade para o consumo humano, aliado a isso, os recursos hídricos subterrâneos são a principal fonte de água do rio em estações não chuvosas, além de serem fontes essenciais de água em muitas áreas que sofrem com a poluição dos recursos hídricos superficiais, exercendo papel vital na busca por uma melhor qualidade de vida para a população (LAMICHHANE e SHAKYA, 2019).

Nas últimas décadas o município de Londrina/PR, principalmente em sua área urbana, produziu uma demanda crescente de água para abastecimento nos mais diversos setores de atividades, muito devido ao contínuo desenvolvimento econômico e crescimento populacional, como aponta o trabalho de Casaril (2009). Visto isso, é crescente o número de investimentos da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), que segundo dados da própria companhia, desde 2011 mais de 280 milhões de reais foram investidos em obras de água para abastecimento e esgoto no município, com previsão de um total de 545 milhões de reais para os próximos anos (SANEPAR, 2018) e também o grande número de poços tubulares profundos inseridos na região em estudo, que totalizam 592 poços segundo o banco de dados compilado nesse trabalho.

Segundo Santos (2009), a crescente exploração dos recursos hídricos pode provocar impactos indesejáveis sobre o meio físico, sobre os condicionantes sociais, ambientais e econômicos, afetando a sociedade atual e, até mesmo, gerações futuras, conduzidos não só por superexplorações desse recurso, mas, principalmente pela má gestão da água.

Dessa forma, a crescente demanda por água produz a necessidade de que gestores municipais busquem conhecer mais profundamente as unidades aquíferas que compõe o município de Londrina, além de buscar um gerenciamento

mais eficiente no que tange o uso dos recursos hídricos subterrâneos, integralizando políticas públicas que visem o estabelecimento de um conjunto de ações e diretrizes que sejam voltadas ao adequado uso dos recursos hídricos, para que assim seja possível construir e manter a qualidade de vida da população no que tange os recursos hídricos. (HONDA, et al., 2015)

Os estudos que envolvam poços tubulares profundos cadastrados no município de Londrina se tornam uma importante ação, tanto no diagnóstico hidrodinâmico do aquífero, como no controle de suas condições hidrogeológicas, uma vez que ao analisá-lo é possível obter informações mais atualizadas possíveis em que o SASG se encontra, bem como inter-relacionar os parâmetros analisados e observar tendências que podem acontecer por meio de ações antrópicas ou naturais, adquirindo então os elementos que podem contribuir efetivamente para o planejamento, controle, recuperação e preservação do aquífero para fins de sustentabilidade.

Um banco de dados articulado, apresentando diagnósticos da condição hidrodinâmica de aquíferos pode se tornar a base estrutural para a gestão mais eficiente dos recursos hídricos subterrâneos, pois informações organizadas e disponíveis são essenciais para que os tomadores de decisões sejam orientados para uma boa gestão dos recursos hídricos.

Ramos (2005) destaca que é fundamental elaborar planos de manejo integrados a gestão dos recursos hídricos, pautados nas legislações vigentes, nas condições hidrológicas, bem como realizar estudos quanto a capacidade de exploração dos aquíferos, o que os torna indispensável para a sua preservação.

Gonçalves et al. (2009) destacam ainda que conhecer o potencial hídrico do aquífero se torna fundamental, tornando possível a construção de um modelo de gestão e outorga da água subterrânea, além de garantir a exploração sustentável do aquífero.

Portanto, o baixo número de trabalhos acerca do referido assunto, o desconhecimento de grande parte da população a respeito das reais consequências da possível exploração desordenada do SASG e a importância de se realizar estudos relacionados à hidrogeologia de Londrina/PR, visando à produção de informações que contribuam para a gestão consciente e racional do SASG, foram

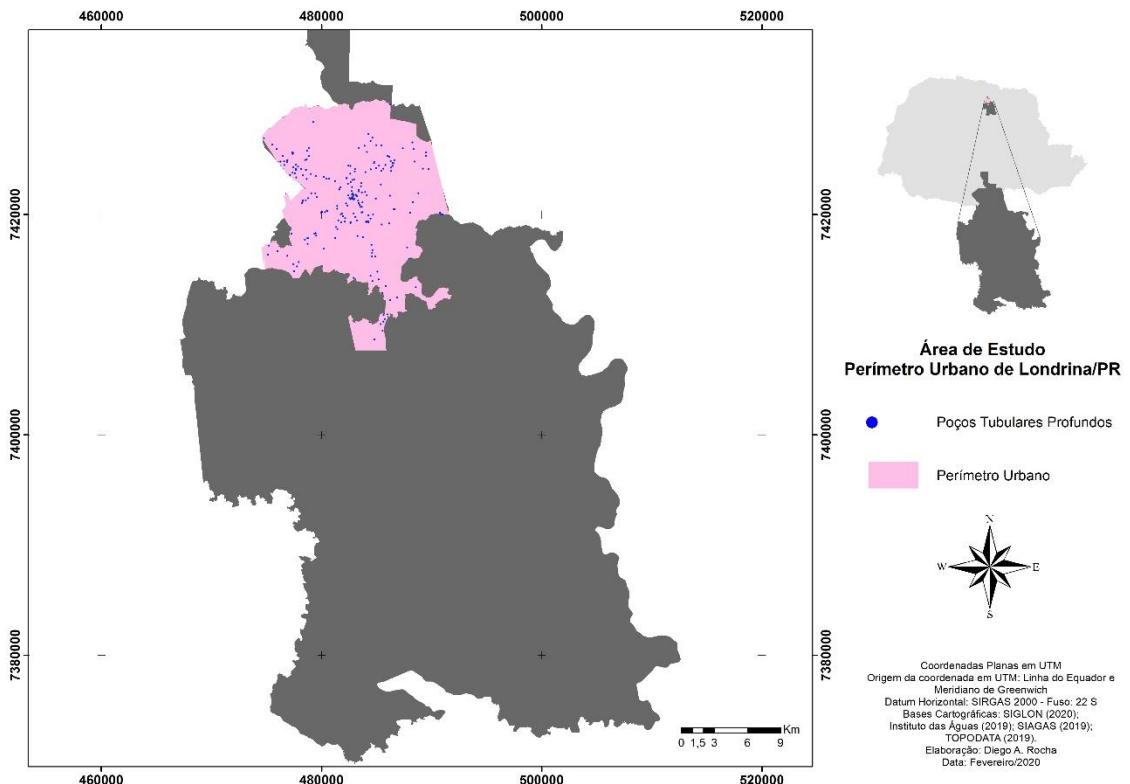
fatores que motivaram a realização deste trabalho.

Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo principal apresentar diagnóstico da disponibilidade de informações sobre poços tubulares profundos inseridos no perímetro urbano do município de Londrina/PR, a partir de dois bancos de dados distintos e que posteriormente foram compilados, bem como apresentar o uso diagnóstico da variação temporal do nível d'água e da produtividade do SASG no intervalo de tempo de 1977 a 2013.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo do presente trabalho comprehende o perímetro urbano do município de Londrina/PR, visto que é onde se encontram o maior número de poços tubulares profundos, conforme Figura 8. O município possui população estimada para o ano de 2019 de 569.733 habitantes em uma área territorial de 1.652,569km², possuindo assim densidade demográfica de 344,76 hab./km². (IBGE, 2019, org. ROCHA, D. A.)

Figura 8 - Perímetro urbano de Londrina/PR



Segundo Celligoi (1993) área de estudo está situada no terceiro planalto paranaense, localizada na porção sudeste da Bacia Sedimentar do Paraná, onde existe a ocorrência de afloramentos de rochas basálticas pertencentes à Formação Serra Geral. O clima de Londrina é considerado do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen, sendo assim tido como de clima subtropical úmido, com a ocorrência de chuvas em todas as estações, porém podendo ocorrer diminuição da quantidade de chuvas no período de inverno. A temperatura média do mês mais quente é, habitualmente, superior a 25,5 °C e a do mês mais frio, inferior a 16,4 °C, tendo umidade relativa do ar média, em torno de 69%. Além disto, é possível observar o mapa de precipitação do estado do Paraná, que de acordo com dados do IAPAR (2019) demonstra que a precipitação anual para o município de Londrina tem valores que variam de 1600 – 1800 mm ao ano.

De acordo com Barros (2008) o município de Londrina está localizado na bacia hidrográfica do Rio Tibagi, considerado esse um dos afluentes mais importantes do Rio Paranapanema, que desemboca na bacia do rio Paraná.

O autor salienta ainda que as bacias hidrográficas do Jacutinga,

Cambé, Lindóia, Limoeiro, Três Bocas e Cafetal são as principais bacias da área urbana de Londrina.

A hidrografia de Londrina, segundo Juliano Silva (2011) é caracterizada por uma drenagem natural em que suas formações são em vales e os córregos possuem água fluindo em todas as épocas do ano, ou seja, são de caráter perene. A rede de drenagem possui um regime hidrográfico fluvial caracterizado por uma grande quantidade de afluentes e subafluentes, sendo assim considerada numerosa e bem distribuída.

A área de estudo é composta principalmente por rochas ígneas, resultado de diversos derrames basálticos de idade jurássico-cretácea pertencente ao Grupo São Bento que é representado pela Formação Serra Geral (MINEROPAR, 2003).

Essa formação possui diversos lineamentos estruturais que permitem o armazenamento e a circulação de água subterrânea, constituindo então uma importante unidade hidrogeológica, o SASG.

Este aquífero abrange os estados de Santa Catarina, Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo e Mato Grosso, engloba ainda parte da Argentina, Paraguai e Uruguai. No Estado do Paraná está restrito ao 3º Planalto Paranaense possuindo uma área com cerca de 110.000 Km², com espessura máxima de 1.400 metros (SOUZA, 2004).

4.5 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizado o registro dos poços tubulares profundos cadastrados em todo o município de Londrina/PR a partir de duas fontes de dados, a primeira do Instituto das Águas do Paraná, que nesse trabalho será tratado como banco de dados “Águas Paraná” e a segunda do Sistema de Informações de Águas subterrâneas (SIAGAS)..

Os dados do Instituto das Águas do Paraná (2019a) são disponibilizados para o público no site www.aguasparana.pr.gov.br, contudo é necessária a instalação de um software FTP (*File Transfer Protocol*), ou "Protocolo de Transferência de Arquivos", que é basicamente um tipo de conexão que permite que haja a troca de arquivos entre dois computadores, desde que estejam

conectados à internet, tal que no caso do presente trabalho foi utilizado o *software WinSCP®*.

Após a instalação foi necessário configurar o servidor com as chaves de acesso predefinidas pelo Instituto das Águas do Paraná para ter acesso aos dados de outorga disponíveis, no qual foi feito o *download* dos dados do dia 26 de agosto de 2019, sendo esses os últimos dados disponíveis no momento do acesso que foi no dia 9 de setembro de 2019.

Já os dados do SIAGAS (2019) possuem uma abrangência nacional e são disponibilizados para o público através do site www.siagasweb.cprm.gov.br em que foram feitas pesquisas referentes aos dados de poços outorgados no município de Londrina, sendo que a busca dos dados foi feita também no dia 9 de setembro de 2019, buscando igualar as datas de pesquisa para uma melhor padronização.

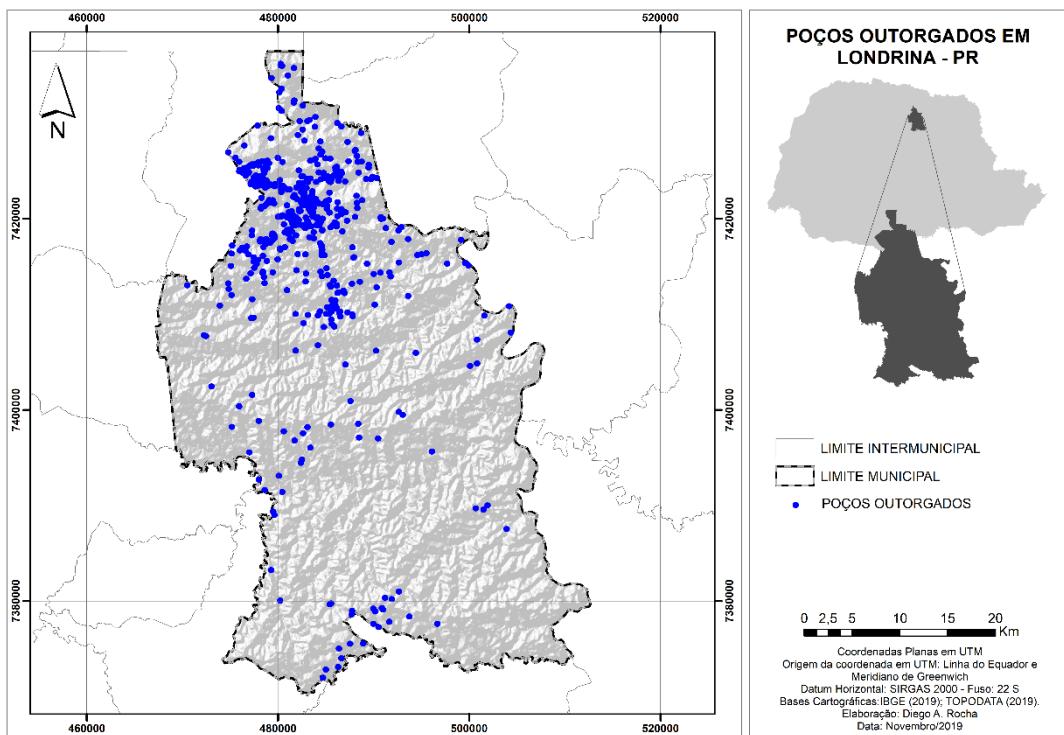
Após o *download* os dados foram organizados em planilha eletrônica e foram assim contabilizados: Águas Paraná foram obtidos 583 poços tubulares profundos, enquanto que os dados baixados do SIAGAS apresentaram 733 poços distribuídos na área de estudo.

Foi realizada então a compilação do banco de dados, no qual foi necessário um criterioso trabalho de análise desses dados, visando eliminar poços repetidos ou até mesmo aqueles que não possuíam nenhum dado relevante para a pesquisa.

Ao compilar os dados foi levado em consideração de que os dados do Instituto das Águas do Paraná são fontes primárias, ou seja, é o órgão que recebe primeiramente as informações e o SIAGAS, que recebe as informações do banco de dados primário, sendo então uma fonte secundária que possui mais chances de ocorrerem erros, com isso ao encontrar divergência nos valores dos parâmetros analisados o dado encontrado no banco de dados do Águas Paraná é o que foi utilizado no trabalho.

Após a compilação e tratamento do banco de dados foram obtidos 592 poços cadastrados no município de Londrina/PR, conforme a Figura 9, já excluídos poços repetidos, sendo possível observar que a maior parte dos poços tubulares se encontram próximos a área urbana do município.

Figura 9 - Poços outorgados em Londrina/PR



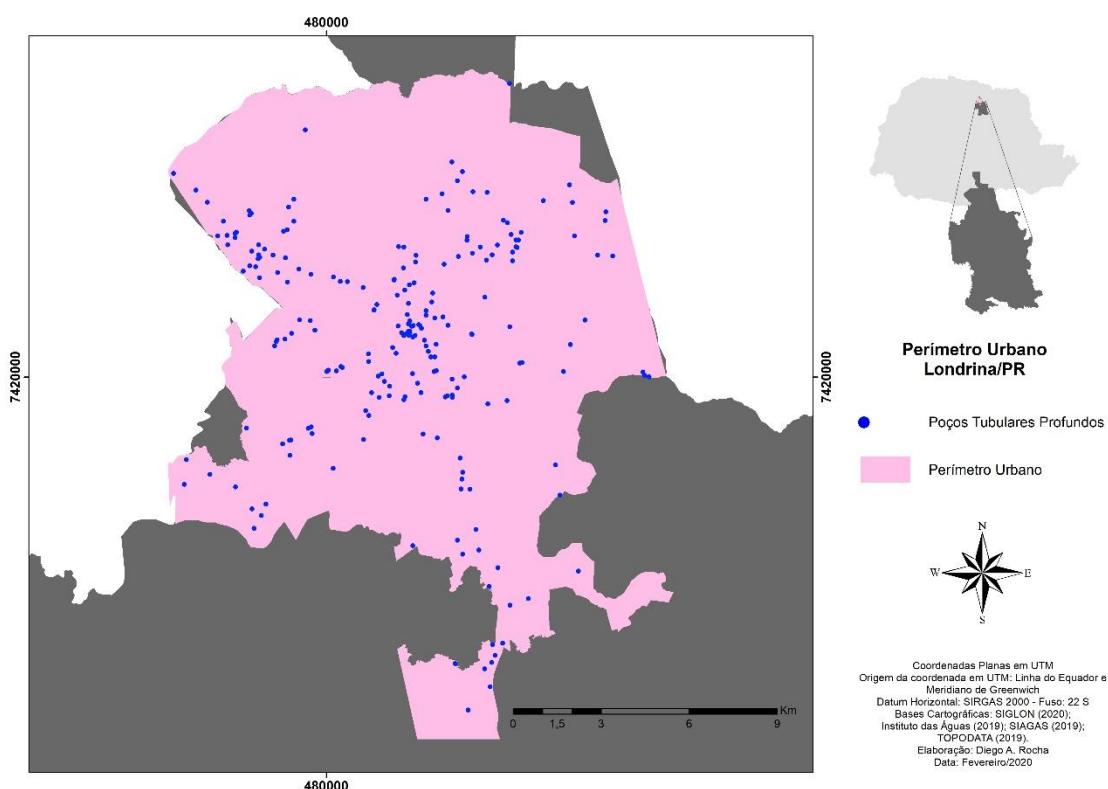
O banco de dados compilados e georreferenciados permitiu a distribuição estatística acerca da quantidade de dados faltantes em ambos bancos de dados, analisando os seguintes parâmetros: localização, profundidade de perfuração (m), perfil geológico, data de perfuração, usos da água, ou seja, para quais fins são usadas, vazão (m^3/h) e nível estático (m) aliado ao nível dinâmico (m). Feito isso, foi possível criar um ambiente SIG, com as informações disponibilizadas e georreferenciadas, servindo como base para a metodologia que foi utilizada no artigo B.

Devido à grande variabilidade dos dados e a distribuição espacial geográfica dos poços, de modo a otimizar os dados hidrodinâmicos e um melhor balanço estatístico, optou-se por restringir a avaliação da exploração do SASG em Londrina ao recorte reduzido do perímetro urbano de Londrina/PR, totalizando assim 332 poços tubulares cadastrados no banco de dados, conforme mostra a Figura 10. Desse total uma nova filtragem foi estabelecida, excluindo poços que não possuíam dados de vazão (Q), valores imprescindíveis para a pesquisa, obtendo-se 226 poços.

A formulação de um banco de dados principal (composto pela

compilação dos dois principais bancos de dados de disponibilidade e informações sobre poços tubulares profundos no Brasil) permitiu analisar a distribuição gráfica dos principais parâmetros hidrodinâmicos cadastrados para o SASG, a evolução desses parâmetros ao longo do tempo e sua correlação hidrogeológica, além disso, possibilitar construção de informações da distribuição estatística descritiva.

Figura 10 - Poços outorgados e selecionados para o trabalho no perímetro urbano de Londrina/PR



Ao analisar a variação e a distribuição temporal dos parâmetros hidrogeológicos no banco de dados compilado, foram definidas quatro classes de tempo, quais sejam: 1977-1985, 1986-1994, 1995-2003 e 2004-2013.

Foram analisados seguindo a data de construção dos poços os seguintes parâmetros hidrogeológicos: vazão (m^3/h), nível estático (m), nível dinâmico (m) e capacidade específica ($m^3/h/m$), sendo os três primeiros correspondentes ao banco de dados e a capacidade específica calculada por meio da razão entre a vazão e o rebaixamento do nível d'água do poço. O fator estatístico aplicado foi à mediana e, posteriormente, foram gerados gráficos das variações dos parâmetros ao longo dessas classes de tempo pré-definidas.

4.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.6.1 Informações Sobre Poços Tubulares Profundos

O gerenciamento adequado dos recursos hídricos subterrâneos se dá, primeiramente, por meio de um banco de dados consistente, confiável e bem organizado. Problemas com bancos de dados que não possuem todas as informações necessárias e corretas sobre os recursos hídricos subterrâneos explorados são um dos principais entraves para qualquer profissional que busque gerir de maneira adequada os aquíferos.

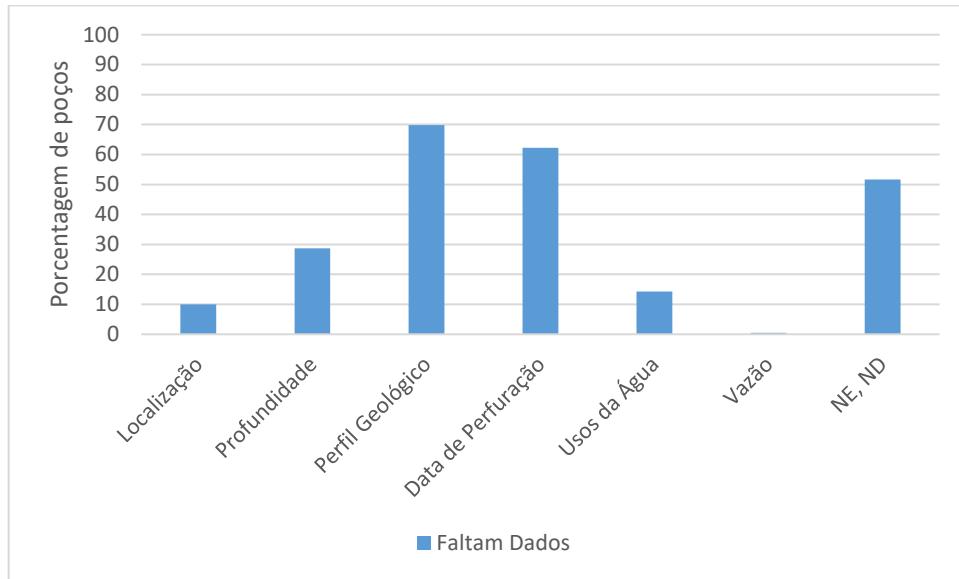
Contudo, apesar dos inúmeros problemas nos bancos de dados disponibilizados a população e também aos profissionais da área, esses são as fontes de dados principais que auxiliam na busca do conhecimento do aquífero em estudo, além de demonstrar a situação da exploração de água subterrânea no município.

Segundo o Instituto das Águas do Paraná (2019b), toda perfuração de poço deve ser precedida por um protocolo denominado de Anuênciam Prévias e sucedida por uma Outorga, que confere o direito de uso de uma determinada quantidade de água. A anuênciam prévia servirá como uma espécie de ponto de partida para que os pareceres técnicos estimem as vazões potenciais médias de diferentes aquíferos.

Após a obra ser executada e testes de bombeamento confirmem as vazões é que será determinado o regime de bombeamento que possibilite que se atenda a demanda requerida, evitando assim que ocorram rebaixamentos exagerados e ocasionando problemas quanto a interferência entre poços, porém é necessária fiscalização efetiva para que esses conflitos ou exageros não ocorram. A Legislação que dispõe sobre o regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos é o decreto estadual nº 9.957 de 2014.

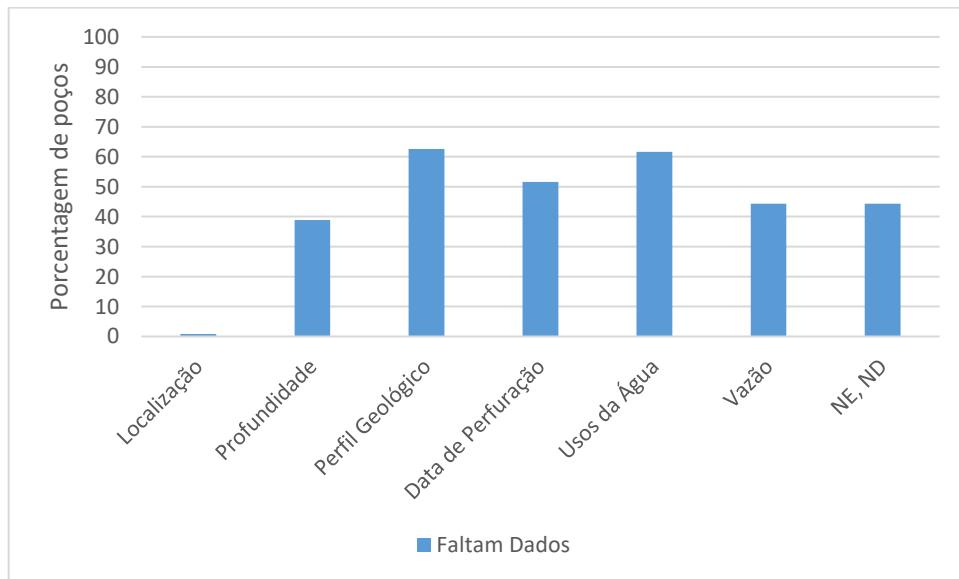
Os gráficos das Figuras 11 e 12 apresentam a porcentagem de dados faltantes dos dois bancos de dados analisados para os mais diversos parâmetros, sendo esses fundamentais para que o estudo hidrogeológico seja realizado de maneira satisfatória.

Figura 11 - Gráfico de dados faltantes do banco de dados do Águas Paraná



Por meio da Figura 11 é possível observar que a grande maioria dos poços do banco de dados do Águas Paraná não possuem dados do perfil geológico, data de perfuração e nem do Nível Estático (NE) e do Nível Dinâmico (ND).

Figura 12 - Gráfico de dados faltantes do banco de dados do SIAGAS



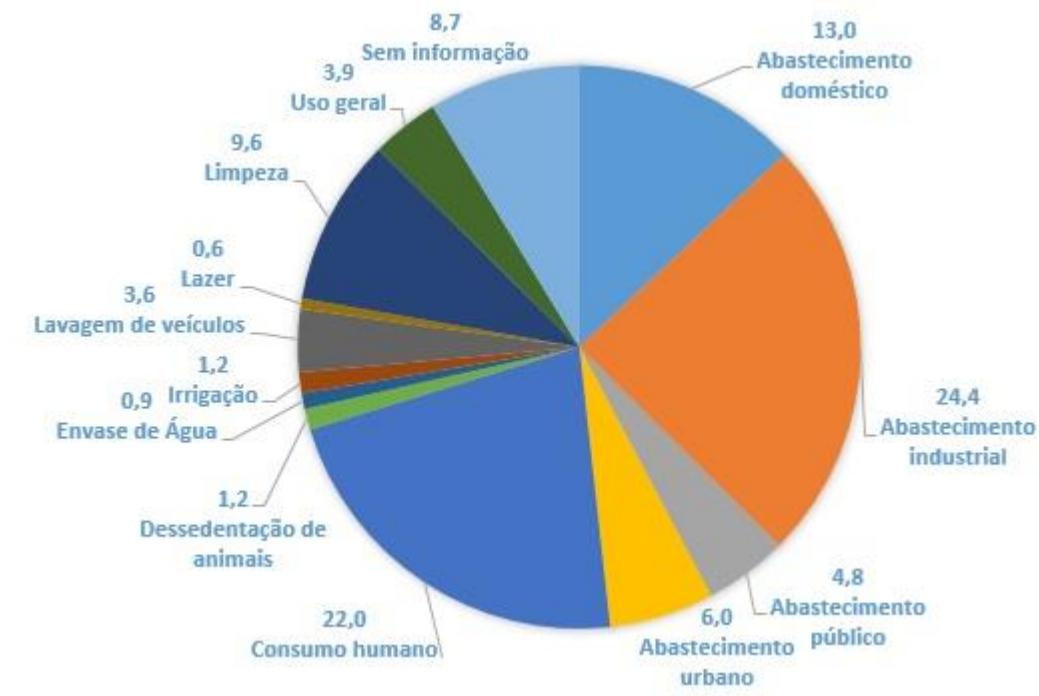
Já na Figura 12 é possível observar que o banco de dados do SIAGAS, uma fonte secundária de dados, possui grande parte dos seus poços sem inúmeras informações relevantes, sendo assim foi necessária à compilação dos

dados visando padroniza-los, bem como inserir as informações faltantes para que o maior número de poços pudesse ser utilizado no presente trabalho.

4.6.2 Uso da Água Subterrânea

Dos 332 poços cadastrados encontrados no banco de dados compilado no perímetro urbano, 91,3% possuem informações em relação ao uso da água subterrânea, como pode ser observado na Figura 13. A maior parte (24,4%) está condicionada ao abastecimento industrial, seguida de perto por aqueles que são utilizados para consumo humano (22%) e para abastecimento doméstico (13%), os demais poços são utilizados para limpeza (9,6%), abastecimento urbano (6%), abastecimento público (4,8%), dessedentação de animais (1,2%), irrigação (1,2%), lazer (0,6%), lavagem de veículos (3,6%), Uso geral (3,9%) e envase de água (0,9%).

Figura 13 - Porcentagem do uso da água dos poços cadastrados no banco de dados compilado



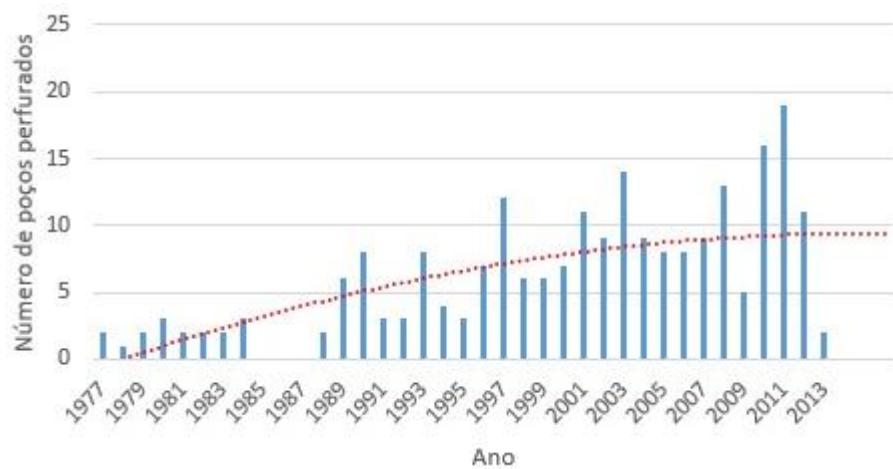
4.6.3 Evolução do Número de Poços ao Longo do Tempo

De acordo com os dados cadastrais, o poço mais antigo do banco de dados compilado é de 1977 e o mais novo de 2013, não é possível determinar o motivo do poço mais novo ser de sete anos atrás visto que o crescente número de perfurações permanece até hoje com inúmeros empreendimentos sendo construídos na cidade, bem como o aumento populacional sendo observado, ainda assim do total dos 332 poços, apenas 226 possuem a data de perfuração.

Entre 1977 e 1992 o número de poços perfurados se mantém estável, com poucas variações, contudo a partir de 1993 ocorre um aumento considerável na perfuração dos poços até o ano de 2008, em 2009 o número diminui um pouco, porém volta a crescer entre 2010 e 2012, e diminui drasticamente em 2013, sendo que a partir desse ano não há registros de novos poços.

Na Figura 14 é possível ainda observar uma linha de tendência associada número de poços em relação aos dados apresentados.

Figura 14 – Número de poços perfurados ao longo dos anos

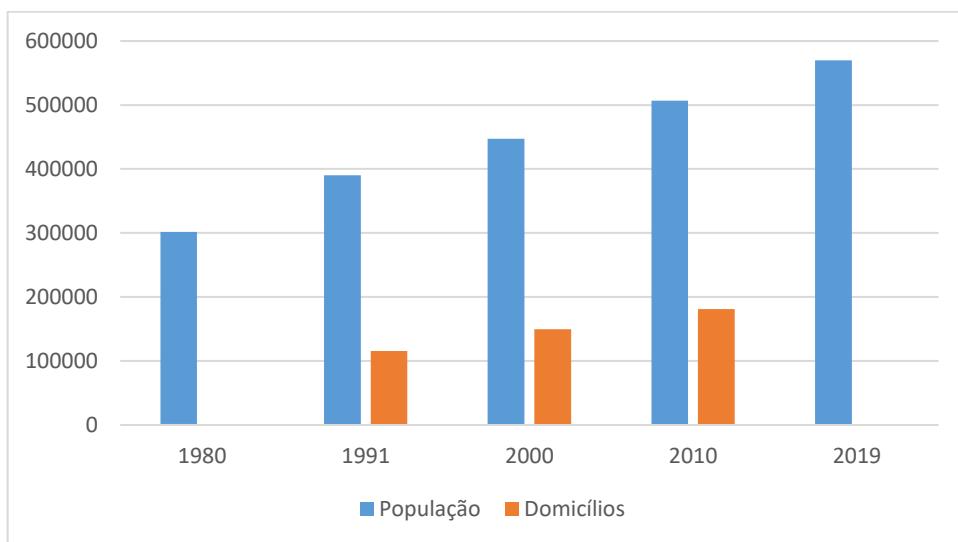


O aumento do número de poços no período estudado pode ser relacionado com duas variáveis, a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) e do Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES, 2019) foi possível observar conforme a Figura 15, o aumento do número populacional de Londrina, que de acordo com o Censo do IBGE passou de 301.711 em 1980 para 390.100 em 1991, 447.065 em 2000, 506.701 em 2010 e de acordo com dados de 2019, tem população estimada em 569.733, cerca

de 89% a mais que no censo de 1980.

Além do crescente número de domicílios que de acordo com o IPARDES era de 115.502 em 1991, passou a ser de 149.593 em 2000 e no último dado divulgado em 2010, possuía 181.167 domicílios, um aumento de cerca de 57% em relação a 1991.

Figura 15 – Aumento do número populacional e de domicílios em Londrina/PR



4.6.4 Parâmetros Analisados

Os parâmetros hidrodinâmicos foram então analisados seguindo classes estatísticas, sendo obtida a variação temporal dos níveis d'água e da produtividade dos poços, sendo essa análise possível de ser realizada apenas em poços que possuíam em seus dados a data de perfuração do mesmo, além disso, foram calculadas a média, mediana, moda e o desvio padrão de cada um dos parâmetros, conforme subitens a seguir, levando em consideração o banco de dados compilado.

4.6.4.1 Nível estático (NE)

O NE é definido como a altura do nível d'água de um poço quando esse não está sendo influenciado por bombeamento. Do total de 332 poços, 218

possuem tanto o valor do NE quanto a data de perfuração do poço. Desta forma, utilizando-se de alguns parâmetros estatísticos foi calculada a profundidade média do NE (45,40 m), a profundidade mediana do NE (34,18 m), a moda (22 m) e o desvio padrão (33,45 m), com valor mínimo de 0,7 metros e máximo de 177 metros, como mostram as Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Gráfico da profundidade do NE (m) de 218 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013

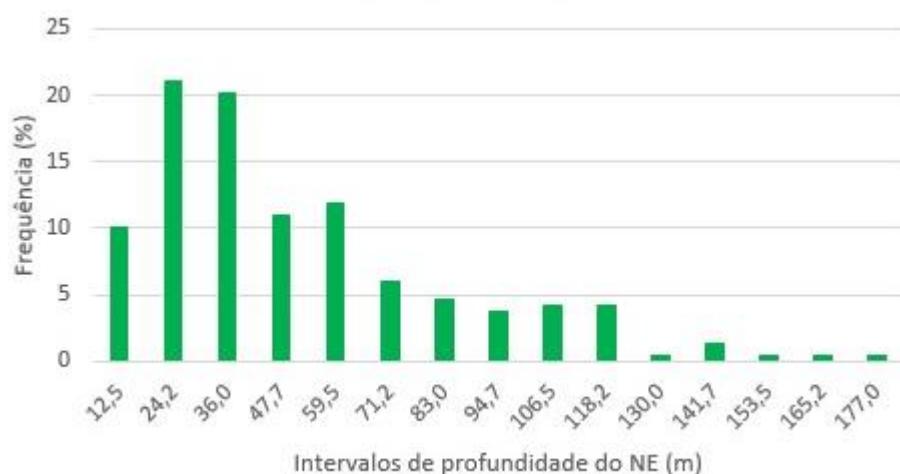
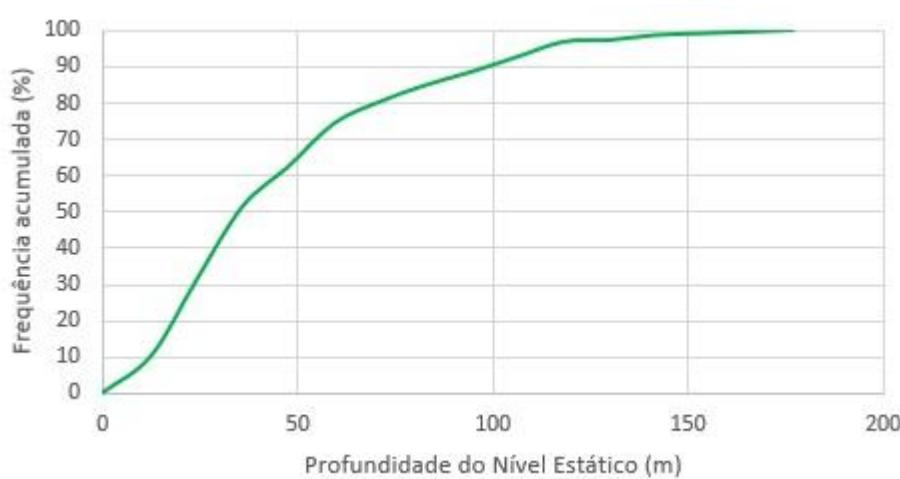


Figura 17 - Diagrama da frequência acumulada do NE (m)



As Figuras 16 e 17 apresentam os poços que possuem NE e data de construção e independem da idade dos mesmos. Já a Figura 18 apresenta a variação da mediana da profundidade do NE nos quatro intervalos de tempo que foram definidos anteriormente. É possível então, observar que no período de 1977-

1985 a mediana da profundidade é de 31 metros, no período de 1986-1994 esse valor diminui para 26,75 metros, no intervalo entre 1995-2003 ocorre o maior valor da profundidade do NE chegando a 40,7 metros e no último intervalo o valor cai um pouco para 34,05 metros.

Figura 18 - Variação da profundidade mediana do NE (m) ao longo dos intervalos de tempo



Os resultados da Figura 18 são em parte intrigantes, pois mesmo com continua alteração da ocupação físico territorial da cidade de Londrina, o crescimento populacional e habitacional, ocorreu a recuperação média do NE (m) para a segunda (1986-1994) e última classe de valores (2004-2013), especialmente para essa última, uma vez que o número total de poços tubulares em operação no SASG apenas cresce com o tempo, esperando com isso, considerando a ocorrência de precipitação média ao longo da série histórica estudada, que o maior número de bombeamentos conduzam ao rebaixamento médio do nível do aquífero, como apresentado para os artigos de Lourencetti et al (2012) para o Sistema Aquífero Bauru (SAB) na cidade de Bauru/SP e Tcacenco-Manzano (2019) para o SAG na cidade de Campo Grande/MS.

4.6.4.2 Nível dinâmico (ND)

O ND é a altura do nível d'água quando o poço tubular profundo esse está sendo bombeado ou em operação e sua medição ocorre durante o período de teste de vazão durante a sua instalação.

Ao observar o nível dinâmico, 215 poços possuem tanto o valor do ND quanto a sua data de perfuração, dentre os 332 poços totais. Foram novamente calculados alguns parâmetros estatísticos como a média do ND (73,70 m), a profundidade mediana do ND (63,15 m), a moda (18 m) e o desvio padrão (43,28 m), com valor mínimo de 14,2 metros e máximo de 264 metros, como evidenciam as Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Gráfico da profundidade do ND (m) de 215 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013

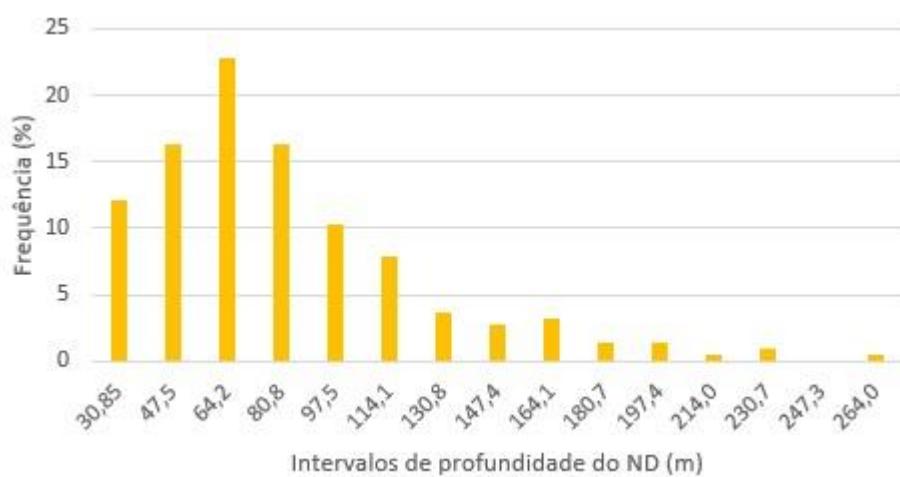
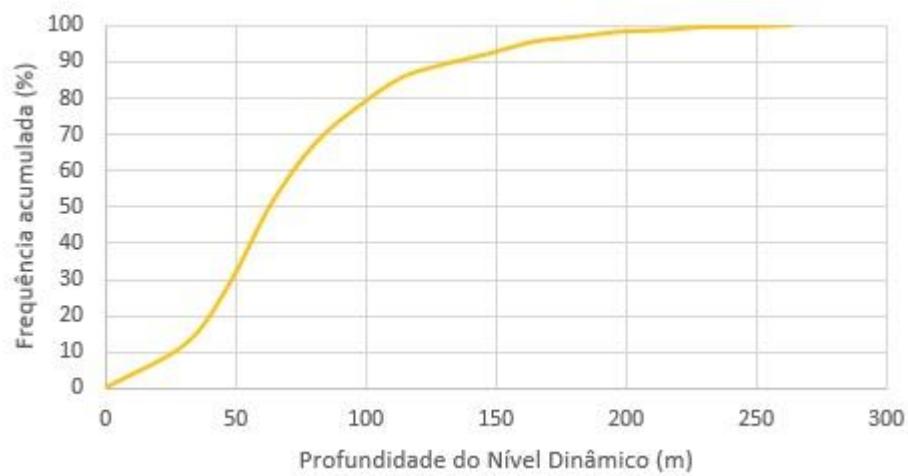


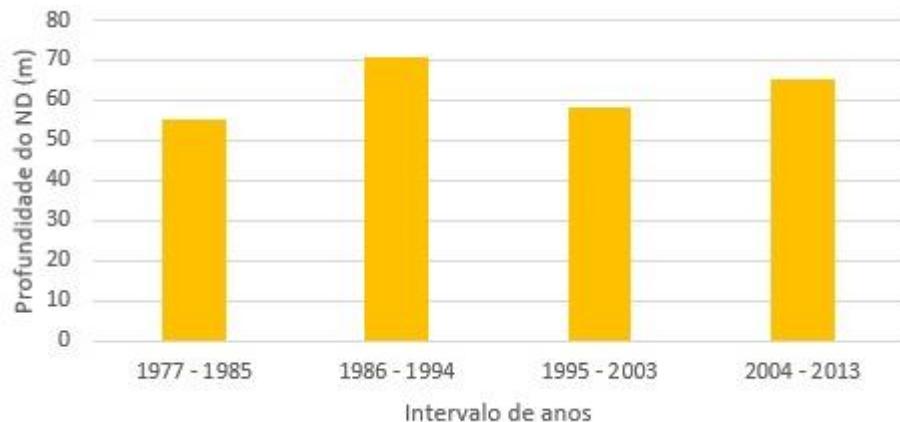
Figura 20 - Diagrama da frequência acumulada do ND (m)



Já no período de 1977-1985 a mediana da profundidade é de 55 metros, no período de 1986-1994 esse valor aumenta para 70,88 metros, no intervalo entre 1995-2003 o valor do ND diminui chegando a 58 metros e no último

intervalo o valor aumenta novamente e chega a marca de 65 metros, podendo ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Variação da profundidade mediana do ND (m) ao longo dos intervalos de tempo



4.6.4.3 Vazão (Q)

Foi possível analisar 226 poços dentre os 332, sendo que esses possuem tanto o valor de Q (m^3/h) quanto a data de perfuração do poço. Os parâmetros estatísticos calculados retornaram valores como a média de Q (11,22 m^3/h), a mediana de Q (5 m^3/h), a moda (3 m^3/h) e o desvio padrão (18,22 m^3/h), com valor mínimo de 0,5 m^3/h e máximo de 110 m^3/h .

O histograma pode ser observado e analisado na Figura 22 e o diagrama de frequência acumulada de Q na Figura 23 a seguir.

Figura 22 - Gráfico de Q (m^3/h) de 226 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013.

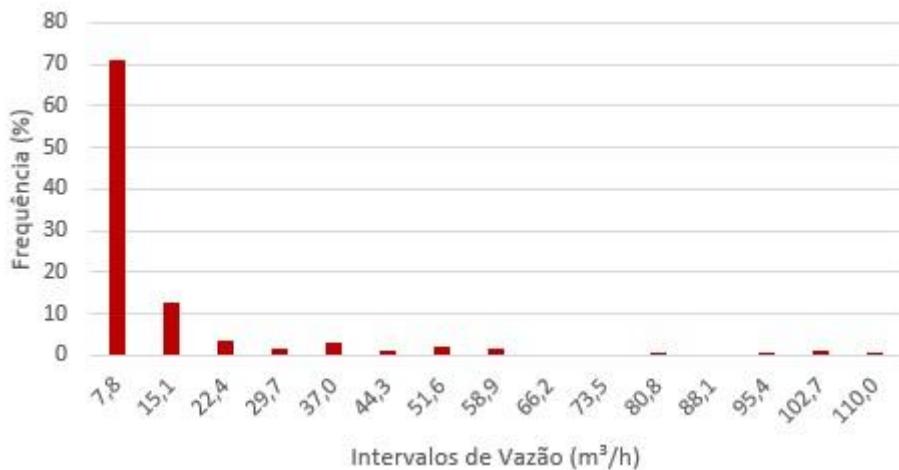
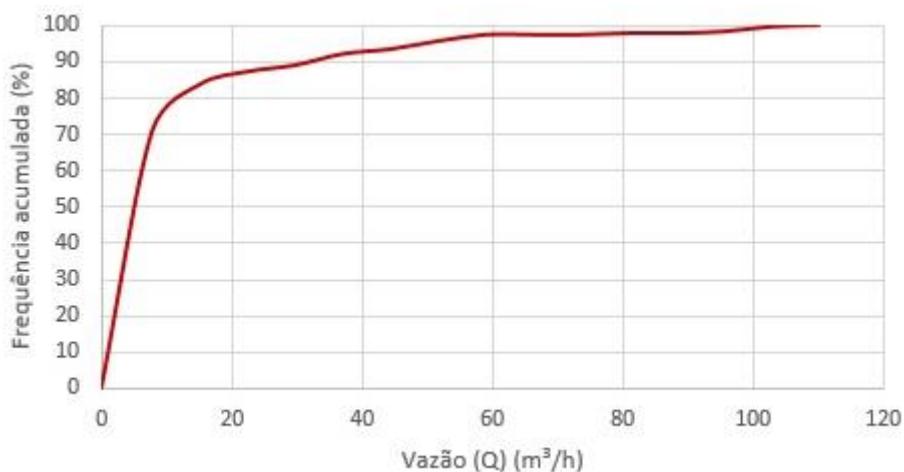


Figura 23 - Diagrama da frequência acumulada de Q (m^3/h)



A variação da mediana de Q foi calculada, de modo que no período de 1977-1985 a mediana de Q é de $14 \text{ m}^3/\text{h}$, no período de 1986-1994 esse valor diminui muito e chega à $5,34 \text{ m}^3/\text{h}$, no intervalo entre 1995-2003 ocorre nova diminuição no valor da mediana de Q, sendo esse $5 \text{ m}^3/\text{h}$, e no último intervalo o valor é o menor, chegando a $4 \text{ m}^3/\text{h}$, demonstrando que o aumento do número de poços faz com que a mediana de Q diminua consideravelmente, sendo esses analisados a partir da Figura 24.

Figura 24 - Variação da mediana de Q (m^3/h) ao longo dos intervalos de tempo



4.6.4.4 Capacidade específica (Q/s)

Dos 332 poços, 207 apresentam os parâmetros necessários para que Q/s ($m^3/h/m$) seja calculada, ou seja, valores de Q (m/h), NE (m), e ND (m), além da data de perfuração para que possam ser analisados em relação aos intervalos de tempo. Com isso o cálculo de Q/s foi realizado, tal que o parâmetro é dado pela razão entre Q e a diferença entre ND e NE de acordo com Celligoi (1993), a Q/s é o melhor parâmetro representativo da produtividade aquífera.

Após isso foram novamente aplicados os parâmetros estatísticos e foi possível chegar ao resultado da média de Q/s ($0,90\ m^3/h/m$), a mediana de Q/s ($0,25\ m^3/h/m$), a moda ($0,33\ m^3/h/m$) e o desvio padrão ($1,57\ m^3/h/m$), com valor mínimo de $0,019\ m^3/h/m$ e máximo de $8,88\ m^3/h/m$.

A Figura 25 apresenta mais uma vez o gráfico dos dados de Q/s e a Figura 26 o diagrama da frequência acumulada.

Figura 25 - Gráfico de Q/s ($\text{m}^3/\text{h/m}$) de 207 poços analisados entre os anos de 1977 a 2013

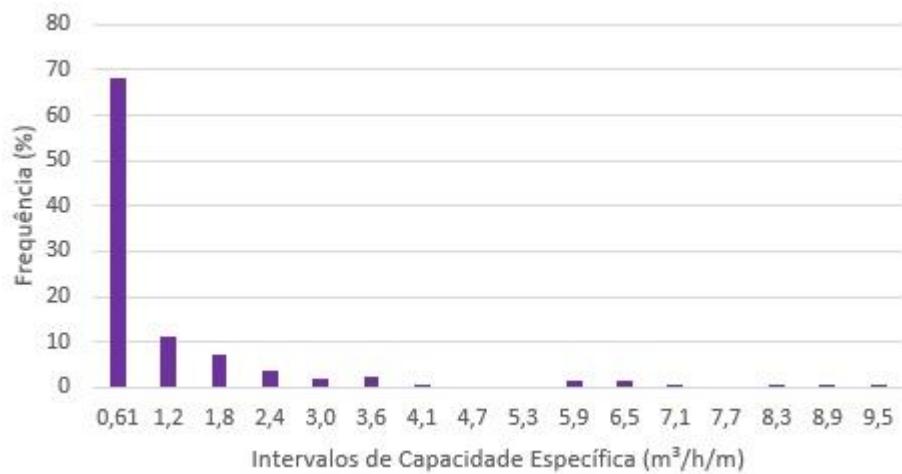
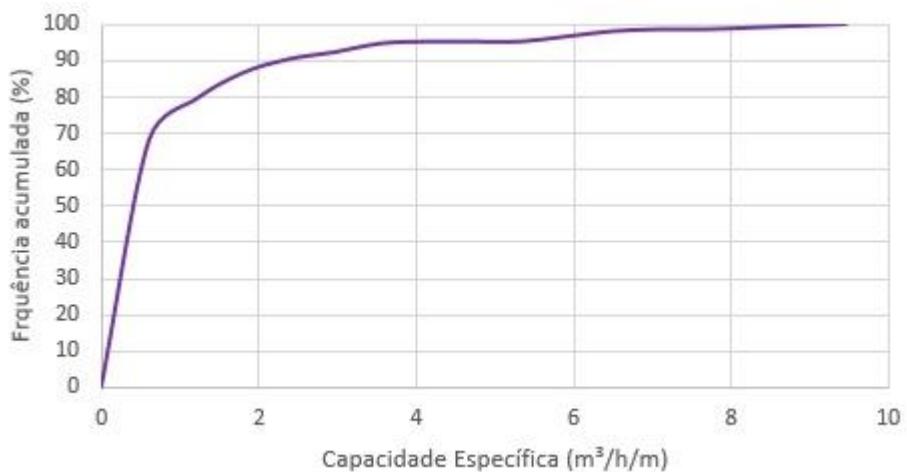
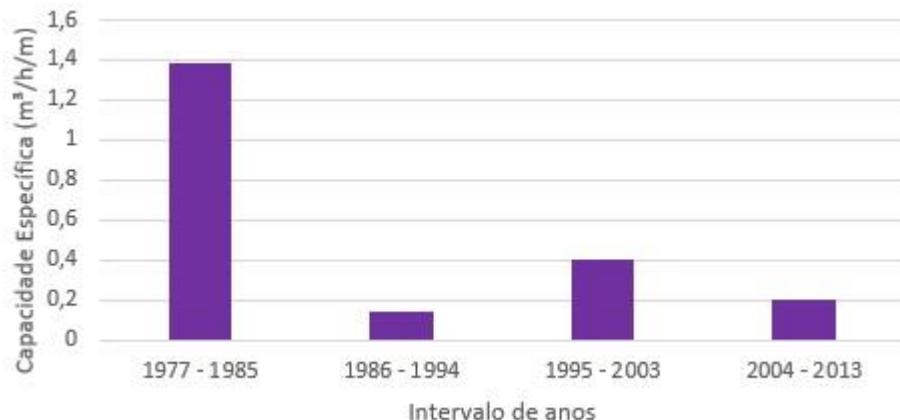


Figura 26 - Diagrama da frequência acumulada de Q/s ($\text{m}^3/\text{h/m}$)



A Figura 27 apresenta a variação da mediana da Q/s em relação aos quatro períodos de tempo definidos. No período de 1977-1985 a mediana da Q/s foi de $1,38 \text{ m}^3/\text{h/m}$, no período de 1986-1994 esse valor diminui consideravelmente chegando ao menor valor analisado sendo esse de $0,15 \text{ m}^3/\text{h/m}$, no intervalo entre 1995-2003 o valor da mediana da Q/s é de $0,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$, e no último intervalo o valor volta a diminuir e chega a $0,2 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

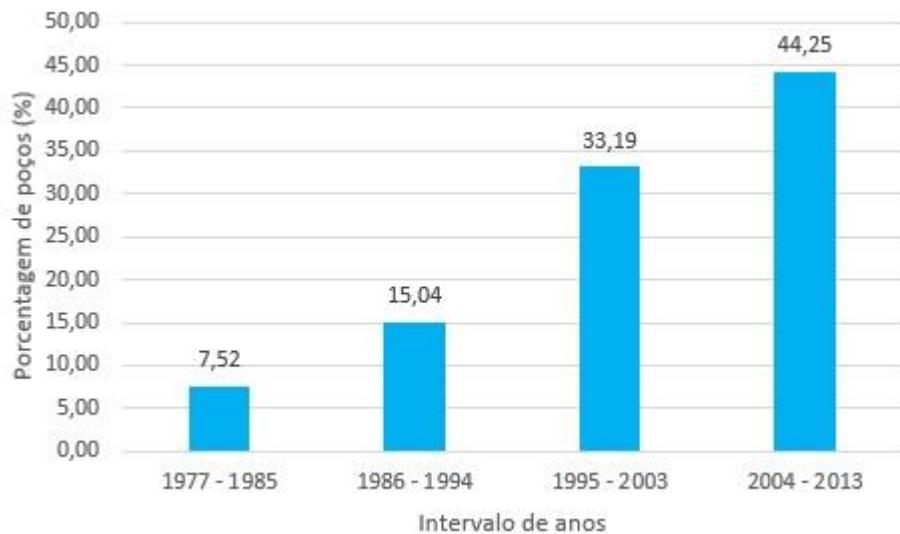
Figura 27 - Variação da mediana de Q/s ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) ao longo dos intervalos de tempo



4.6.4.5 Total de poços ao longo das classes temporais definidas

De acordo com resultados anteriores é possível observar que o NE tem uma leve recuperação em comparação entre o último e o penúltimo intervalo de classe de tempo analisado, o que não ocorre nos demais parâmetros, sendo possível ainda apontar que o intervalo de anos mais recente é o mais afetado, havendo piora nos parâmetros observados nos gráficos anteriores, de modo que ao observar os valores de Q/s, a última classe tem uma queda significativa quando comparada a primeira classe, passando de cerca de 1,4 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ para apenas 0,2 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$. Já ao analisar o ND é possível observar uma piora nos valores em comparação entre as duas últimas classes e analisando os dados mais recentes de Q é possível verificar que esses são os menores em todo o período analisado, demonstrando que a grande concentração de poços perfurados no intervalo de 2004-2013 está afetando negativamente os parâmetros analisados, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Porcentagem de poços ao longo das classes temporais



É possível observar após os gráficos (Figuras de 16 a 28) apresentados um aumento do número de perfurações ao longo dos anos, que tem como consequência um aprofundamento dos níveis do NE (embora ocorra recuperação média de nível alternado para duas classes essa nunca retornou ao nível médio original e ao nível da primeira classe, com o menor número de poços) e ND, além dos dados de produtividade do aquífero, no caso Q e Q/s em comparação entre o último e o primeiro intervalo de classes, demonstrando assim a criticidade da alteração dos valores dos parâmetros analisados com relação a evolução do número de poços.

4.7 CONCLUSÕES

Mesmo com os consideráveis problemas existentes no banco de dados, visto a falta de dados de diversos poços, a amostragem foi considerada satisfatória, pois sugerem dados confiáveis e que representam bem a realidade evolutiva histórica, sendo possível observar de maneira satisfatória a evolução da exploração de água subterrânea no SASG no município de Londrina/PR.

Somado a isso a grande expansão de condomínios (tanto verticais como horizontais) nas últimas décadas na cidade, como mostrou o trabalho de Casaril (2009), confirmando assim que o desenvolvimento econômico e populacional urbano intensifica a demanda por água de boa qualidade, como é caracterizado as águas subterrâneas.

Dessa forma, foi possível demonstrar com esses números a influência, diretamente proporcional, do aumento do número populacional, bem como do número de domicílios e o crescimento na mesma proporção do número de poços tubulares profundos instalados no SASG, que passou de 17 na classe 1 para 226 na quarta classe, um aumento de cerca de 1230%.

O crescimento do número de poços perfurados ao longo das classes temporais na área de estudo afeta de maneira significativa a evolução dos parâmetros hidrodinâmicos analisados, se destaca em primeiro lugar a piora do índice de NE (m) que possuía mediana de 31 metros na classe 1 e na classe 4 foi de 34,05 metros de mediana, ND (m) que também piorou, passando de 55 metros de mediana na primeira classe para 65 metros de mediana para a classe 4, Q (m^3/h) que tinha mediana de 14 m^3/h e na última classe tem apenas 4 m^3/h de mediana e Q/s ($m^3/h/m$) que sofreu grandes modificações desde a primeira classe que tinha mediana de 1,34 $m^3/h/m$ e na última classe analisada passou a ter 0,2 $m^3/h/m$, demonstrando assim que os parâmetros analisados foram sofrendo grandes impactos.

Sendo assim, o gerenciamento adequado das águas subterrâneas é ação obrigatória para restauração desse recurso renovável, caso isso não ocorra os futuros poços podem sofrer ainda mais com a diminuição da oferta de água, prejudicando diretamente a população envolvida, demonstrando a partir dos resultados encontrados que a tendência decrescente do nível da água é muito preocupante, visto que o aumento do número de poços e a exploração sem critério está levando a um rebaixamento do nível do SASG e associada a queda da disponibilidade hídrica superficial pode criar uma crise hídrica em longo prazo para o município de Londrina/PR.

Neves (2004) alerta que ao se analisar a variação temporal dos níveis d'água e da produtividade dos poços ao longo de um intervalo de tempo, aliada a falta de fiscalização dos órgãos públicos e ineficaz gerenciamento dos recursos hídricos por parte dos gestores tornam os dados ainda mais preocupantes. Consequentemente, é possível observar nesse trabalho que o ND e NE dos poços têm sofrido certas variações, indicando ser cada vez mais profundo o nível d'água necessário para a vazão de estabilização dos poços ao ser bombeado, visto que houve um aumento acentuado nos valores de profundidade dos mesmos.

Outro parâmetro analisado foi Q, que teve importante queda comparada aos níveis iniciais do intervalo de tempo entre 1977 e 1985, tal que a variação da mediana diminuiu em torno de 71,5%. Outro dado que chama ainda mais a atenção é o de Q/s, outro parâmetro analisado, e que serve para medir a produtividade dos poços, nesse caso a variação foi incrivelmente 85,6% menor, entre os dados mais recentes em comparação com os do intervalo entre 1977 e 1985.

Embora ocorram momentos de variações na oscilação de alguns dados hidrodinâmicos, até mesmo evidenciando certa recuperação, como ocorre com o NE, os resultados médios encontrados são preocupantes, visto que esse ainda é um cenário parcial, em virtude da provável existência de um grande número de poços clandestinos, outros mais foram descartados da análise por não ter dados corretos ou completos e ainda há o problema de que após 2013 não há outorga de mais nenhum poço nos dados disponibilizados para a população.

A obrigatoriedade do cadastramento dos poços perfurados é um ponto que deve ser discutido e principalmente melhorado, visto que o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos se baseia em bancos de dados muitas vezes incompletos, contudo, segundo Neves (2004) a legislação brasileira é clara e toda e qualquer perfuração deve conter uma licença de perfuração e também uma outorga de uso da água subterrânea, com isso deveria ser disponibilizado de forma completa nos bancos de dados, contendo as informações necessárias para a correta gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

O banco de dados do Instituto das Águas do Paraná se tornou mais completo do que em comparação com o SIAGAS, visto que foi o banco de dados que apresentou poços com informações mais completas, como data de perfuração, vazão explotável, localização, dentre outros, porém isso pode ser explicado visto que o Águas Paraná é um banco de dados primário, ou seja, as informações são recebidas primeiramente pelo órgão, para posteriormente ser repassado ao banco de dados do SIAGAS, que é secundário, ou seja, as informações são coletadas do banco de dados primário, resultando em um maior número de dados conflitantes, talvez por erros de digitação, ou faltantes, simplesmente por informações perdidas.

Silva (2009) salienta que estudos hidrogeológicos são imprescindíveis, além do correto gerenciamento de explorações de água

subterrânea, visando o desenvolvimento sustentável. É importante salientar também que para a realização dos diagnósticos da situação do aquífero e demais pesquisas é necessário um banco de dados atualizado e completo, só assim será possível realizar diagnósticos para solucionar problemas, planejar e gerir adequadamente as águas subterrâneas, visto que essas são uma reserva estratégica e excelente alternativa de abastecimento, contudo, ao comparar os dados das classes iniciais com o da última classe foi possível observar o quanto o aquífero está sendo prejudicado com o crescente número de poços.

5 ARTIGO B: MAPEAMENTO E EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA POTENCIOMETRIA E RESERVA REGULADORA DO SASG NA ÁREA URBANA DE LONDRINA/PR.

5.1 RESUMO

Com o passar dos anos a preocupação com a preservação ambiental, em especial aos recursos hídricos subterrâneos, passou a ser uma necessidade, visto que a qualidade e quantidade, em alguns locais e épocas do ano, dos recursos hídricos superficiais têm diminuído, sendo as reservas subterrâneas importante estratégia para a resolução do problema da crescente demanda por água. Dessa maneira, estudos que envolvam os parâmetros hidrológicos são cada vez mais necessários, como exemplo, o conhecimento das vazões de uma bacia ao longo de uma série histórica, permite entre outras condicionantes, o entendimento do regime de fluxo de base e do armazenamento subterrâneo. A partir disso, o objetivo principal deste estudo foi realizar uma análise geoestatística espacial-temporal da evolução potenciométrica do SASG na área central de Londrina/PR, visto que é nessa zona que se concentra a maior parte dos poços tubulares profundos do perímetro urbano da cidade. Para essa avaliação, com auxílio de sistema de informação geográfica foi proposta a divisão metodológica dos dados de nível estático distribuído em 4 classes temporais: classe 1 de 1977 a 1985; classe 2 de 1986 a 1994; classe 3 de 1995 a 2003 e classe 4 de 2004 a 2013. Com os resultados foi possível observar alterações da inclinação angular da direção geral de fluxo ao longo das classes temporais, passando de WSW (268°) para ENE (88°) na primeira classe e indo de NW (280°) para SE (100°) na última classe. Verificou-se um rebaixamento de 40 metros na classe 2, 100 metros na classe 3 e 60 metros na classe 4, sempre tendo como base o nível potenciométrico mínimo de 560 metros da classe 1 dentro do Hotspot identificado. A melhora dos índices para a classe 4 é explicada pelo aumento da reserva reguladora que praticamente quadruplicou, passando de pouco mais de 10^8 m³/ano para quase 4×10^8 m³/ano no período entre 2003 e 2013, foi verificado então que o SASG possui rápida resposta ao regime de chuvas e os níveis estão diretamente associados a recarga do aquífero justificando a recuperação dos parâmetros analisados para a classe 4. Foi possível observar também uma crescente anomalia das linhas potenciométricas ao longo das classes temporais, além de verificar um aumento das variações da direção de fluxo e dos cones de depressão entre as três primeiras classes, sendo que na última classe houve a recuperação e melhora desse parâmetro, com linhas mais suaves e cada vez menos inversões de fluxo. Dessa forma, ao associar a recuperação do aquífero com o regime de chuvas e valor da reserva reguladora, a classe 3 mostra um cenário preocupante, visto que períodos de estiagem, ou regime de chuvas não-uniformes podem fazer com que a criticidade encontrada na classe 3 se repita futuramente. Ainda assim, mesmo com a melhora na última classe é possível observar que o rebaixamento de 60 metros em comparação com a primeira classe reforça a ideia de que o aumento desordenado do número de poços afeta negativamente a região em que eles estão alocados, causando o rebaixamento do nível potenciométrico.

Palavras-chave: Potenciometria; Reservas subterrâneas; Aquífero; Poços tubulares profundos; Análise Geoestatística.

5.2 ABSTRACT

Over the years, the concern with environmental preservation, especially for underground water resources, has become a necessity, since the quality and quantity, in some places and times of the year, of surface water resources have decreased, with reserves important strategy for solving the problem of the growing demand for water. Thus, studies involving hydrological parameters are increasingly necessary, as an example, the knowledge of the flows of a basin over a historical series, allows, among other conditions, the understanding of the base flow regime and underground storage. From this, the main objective of this study was to carry out a spatio-temporal geostatistical analysis of the SASG potentiometric evolution in the central area of Londrina/PR, since it is in this area that most of the deep tubular wells of the urban perimeter of the city are concentrated. For this evaluation, with the aid of a geographic information system, a methodological division of data of static level was proposed, divided into 4 temporal classes: class 1 from 1977 to 1985; class 2 from 1986 to 1994; class 3 from 1995 to 2003 and class 4 from 2004 to 2013. With the results it was possible to observe changes in the angular inclination of the general direction of flow along the temporal classes, going from WSW (268°) to ENE (88°) in the first class and going from NW (280°) to SE (100°) in the last class. There was a drop of 40 meters in class 2, 100 meters in class 3 and 60 meters in class 4, always based on the minimum potentiometric level of 560 meters in class 1 within the identified Hotspot. The improvement in the indexes for class 4 is explained by the increase in the regulatory reserve, which practically quadrupled, going from just over $10^8 \text{ m}^3/\text{year}$ to almost $4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{year}$ in the period between 2003 and 2013, it was verified that the SASG has a fast response the rainfall regime and the levels are directly associated with aquifer recharge justifying the recovery of the parameters analyzed for class 4. It was also possible to observe an increasing anomaly of the potentiometric lines along the temporal classes, in addition to an increase in the variations of the direction of flow and of the cones of depression between the first three classes, and in the last class there was the recovery and improvement of this parameter, with smoother lines and less and less flow inversions. Thus, when associating the recovery of the aquifer with the rainfall regime and the value of the regulatory reserve, class 3 shows a worrying scenario, since periods of drought, or non-uniform rainfall regime can cause the criticality found in the class 3 repeat in the future. Even so, even with the improvement in the last class, it is possible to observe that the 60-meter lowering compared to the first class reinforces the idea that the disordered increase in the number of wells negatively affects the region in which they are allocated, causing the lowering the potentiometric level.

Key words: Potentiometry; Underground reserves; Aquifer; Deep tubular wells; Geostatistical analysis.

5.3 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos a preocupação com a preservação ambiental, em especial aos recursos hídricos subterrâneos, passou a ser uma necessidade, visto que a qualidade e quantidade, em alguns locais e épocas do ano, dos recursos hídricos superficiais têm diminuído, sendo as reservas subterrâneas importante estratégia para a resolução do problema da crescente demanda por água (ISLAM et al, 2017).

O regime de recarga e a descarga da água subterrânea estão intrinsecamente ligados aos outros componentes do fluxo hidrológico que interfere diretamente na disponibilidade e ocorrência dos corpos d'água. Dessa forma, a necessidade de estudos que envolvem os parâmetros hidrológicos é cada vez mais necessária, como exemplo, o conhecimento das vazões de uma bacia ao longo de uma série histórica, permite entre outras condicionantes, o entendimento do regime de fluxo de base e do armazenamento subterrâneo, além de ser possível obter dados importantes para avaliação de reservas hídricas para os mais diversos tipos de aquíferos (DEWANDEL et al., 2002).

O uso de Sistema Informação Geográfica (SIG) proporciona uma melhor visualização, integração e compreensão para os planejadores sobre quais são as reais necessidades de ação ou correção em determinada área, direcionando de maneira mais eficaz os investimentos necessários, sem desperdício de recursos.

Além disso, consoante a Assunção (2001), a análise estatística espacial tem sido cada vez mais empregada, impulsionada pelo enorme desenvolvimento computacional recente, resultando em análises cada vez mais rápidas e eficientes e menos custosas. Com isso, mapear e principalmente analisar possíveis áreas de risco tem o poder de contribuir com o poder público na elaboração de medidas preventivas ou até mesmo emergenciais que visam a contenção e/ou amenização de possíveis prejuízos sejam eles econômicos, sociais e principalmente ambientais, dessa forma os SIG vem despertando o interesse de inúmeros setores da sociedade, principalmente das administrações públicas, de modo a se tornarem cada vez mais utilizados (BORGES, 2000).

A análise estatística espacial teve grande crescimento científico nos últimos anos, sendo aplicada em diversos estudos em inúmeros ramos da ciência

que se preocupam com fenômenos ocorridos no espaço e no tempo. A geoestatística auxilia na compreensão dos fenômenos ocorridos em uma determinada região, mesmo que não existam dados em todos os locais, visto que ela trabalha com uma relação espacial entre os valores, gerando então uma estimativa acerca dos valores preexistentes, estimando dados e também o erro associado ao ponto ou bloco em certa região. (MELLO, 2004)

Para isso, é necessário anteriormente gerar um semivariograma com os dados existentes, visto que é essa análise que fornecerá, juntamente com a covariância, informações relevantes acerca da validade do método, como a distância mínima entre dois pontos, fator essencial na validação do resultado encontrado, ou seja, para que a estimativa seja realmente considerada (SAMPAIO e BRANDALIZE, 2018).

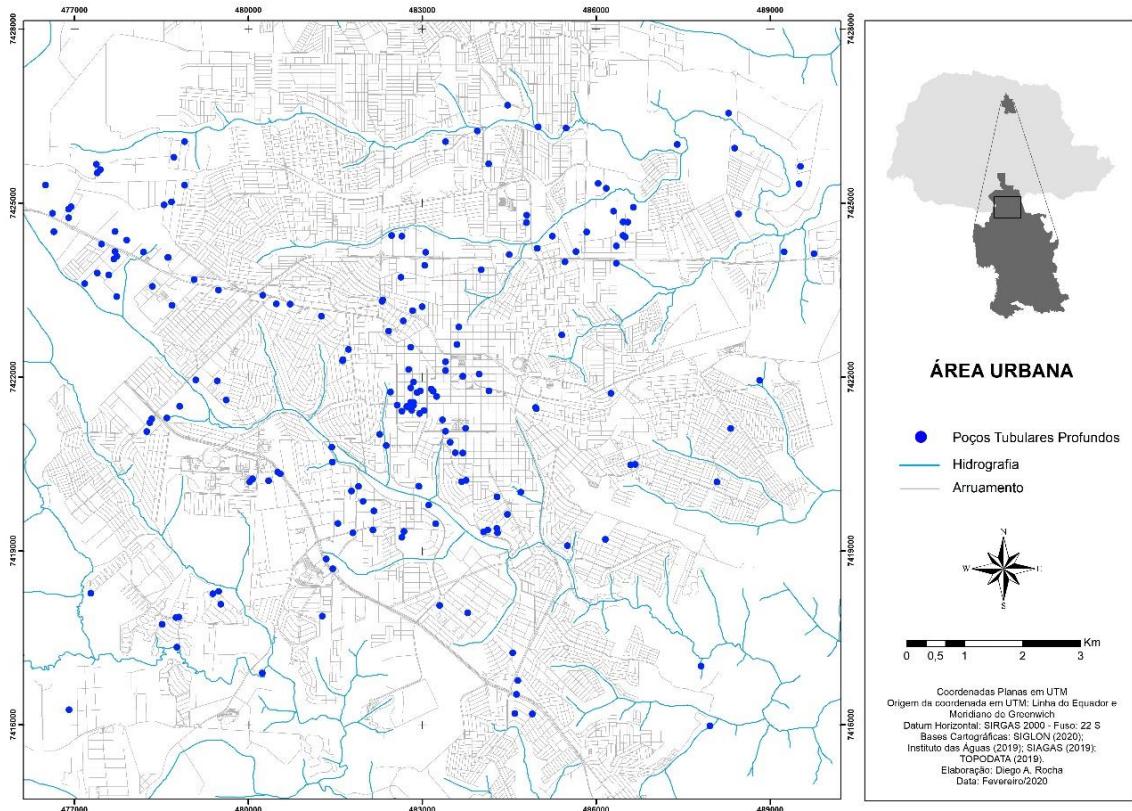
O objetivo deste estudo é realizar uma análise geoestatística espaço-temporal com o auxílio de SIG, na área central de Londrina/PR, monitorando o comportamento dos níveis d'água do aquífero, decorrente do aumento do número de poços tubulares profundos ao longo de uma série histórica dividida em classes temporais.

Por trazer uma avaliação a respeito da evolução histórica da potociometria e reserva reguladora do SASG na área urbana de Londrina/PR, bem como possíveis áreas de maior atenção quanto a exploração de suas reservas hídricas, o presente artigo se mostra uma importante ferramenta na gestão do SASG.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo do artigo B é a zona urbana de Londrina/PR, em especial atenção à região central do município, pois é onde é possível notar grande concentração de poços, 188 poços tubulares profundos outorgados, dos 226 distribuídos por todo o perímetro urbano de Londrina, conforme visualizado na Figura 29.

Figura 29 – Localização dos poços na área urbana central de Londrina/PR



Segundo Celligoi (1993) área de estudo está situada no terceiro planalto paranaense, localizada na porção sudeste da Bacia Sedimentar do Paraná, onde existe a ocorrência de afloramentos de rochas basálticas pertencentes à Formação Serra Geral. O clima de Londrina é considerado do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen, sendo assim tido como de clima subtropical úmido, com a ocorrência de chuvas em todas as estações, porém podendo ocorrer diminuição da quantidade de chuvas no período de inverno. A temperatura média do mês mais quente é, habitualmente, superior a 25,5 °C e a do mês mais frio, inferior a 16,4 °C, tendo umidade relativa do ar média, em torno de 69%. Além disto, é possível observar o mapa de precipitação do estado do Paraná, que de acordo com dados do IAPAR (2019) demonstra que a precipitação anual para o município de Londrina tem valores que variam de 1600 – 1800 mm ao ano.

De acordo com Barros (2008) o município de Londrina está localizado na bacia hidrográfica do Rio Tibagi, considerado esse um dos afluentes mais importantes do Rio Paranapanema, que desemboca na bacia do rio Paraná.

O autor salienta ainda que as bacias hidrográficas do Jacutinga,

Cambé, Lindóia, Limoeiro, Três Bocas e Cafetal são as principais bacias da área urbana de Londrina.

A hidrografia de Londrina, segundo Juliano Silva (2011) é caracterizada por uma drenagem natural em que suas formações são em vales e os córregos possuem água fluindo em todas as épocas do ano, ou seja, são de caráter perene. A rede de drenagem possui um regime hidrográfico fluvial caracterizado por uma grande quantidade de afluentes e subafluentes, sendo assim considerada numerosa e bem distribuída.

A área de estudo é composta principalmente por rochas ígneas, resultado de diversos derrames basálticos de idade jurássico-cretácea pertencente ao Grupo São Bento que é representado pela Formação Serra Geral (MINEROPAR, 2003).

Essa formação possui diversos lineamentos estruturais que permitem o armazenamento e a circulação de água subterrânea, constituindo então uma importante unidade hidro geológica, o SASG.

Este aquífero abrange os estados de Santa Catarina, Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo e Mato Grosso, engloba ainda parte da Argentina, Paraguai e Uruguai. No Estado do Paraná está restrito ao 3º Planalto Paranaense possuindo uma área com cerca de 110.000 Km², com espessura máxima de 1.400 metros. (SOUZA, 2004)

5.5 METODOLOGIA

O artigo B possui como base o cadastro de dados de poços outorgados em Londrina/PR e partiu da análise acerca das informações sobre os poços tubulares profundos em Londrina/PR, sendo assim, foi realizado um mapeamento espacial e também uma análise geoestatística.

Para realização da análise temporal foram determinadas 4 classes de estudo, 1977-1985, 1986-1994, 1995-2003 e 2004-2013, sendo essa de extrema importância, visto que o objetivo principal é o de observar a interferência dos poços na disponibilidade hídrica do aquífero ao longo do tempo.

A análise espacial foi realizada com o auxílio de SIG, esse sistema de informação tem a tarefa de analisar, armazenar e integrar dados hidrogeológicos

de modo a ser capaz de apresentar, avaliar e projetar cenários, sejam esses presentes ou futuros, auxiliando no gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis, com a vantagem de ter uma interface amigável, proporcionando ao usuário interagir com o banco de dados digital, tornando-se uma ferramenta poderosa na manipulação e visualização de dados.

Decidiu-se por restringir o recorte espacial da área de estudo, reduzindo então para a área urbana do município de Londrina/PR, em especial a sua região central, conforme foi apresentado na Figura 29, visto que é nessa zona que se concentra a maior parte dos poços do perímetro urbano, além disso, é a área de maior concentração domiciliar e de muitas atividades econômicas que influencia na demanda de água.

A partir das classes definidas, os níveis temporais do SASG foram plotados e georreferenciados, que permitiu então, a aplicação de um método geoestatístico de interpolação. Segundo Burrough (1986) a interpolação pode ser definida como o procedimento em que se estimam os valores de propriedades de locais que não são amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos. Ou seja, em média, os valores dos atributos que estão mais próximos um do outro tendem a ser similares, com esse conceito é possível correlacionar atributos pontuais e transformá-los em atributos contínuos.

Ribeiro da Silva et al. (2007) destaca que um fator que deve ser levado em consideração é a necessidade de definir qual o método de interpolação será o mais adequado para atingir o objetivo proposto, pois essa escolha pode variar de acordo com diversos fatores como: o número de amostras; a distância entre as amostras; se os dados são contínuos ou discretos; acurácia e precisão da estimativa; dentre outros.

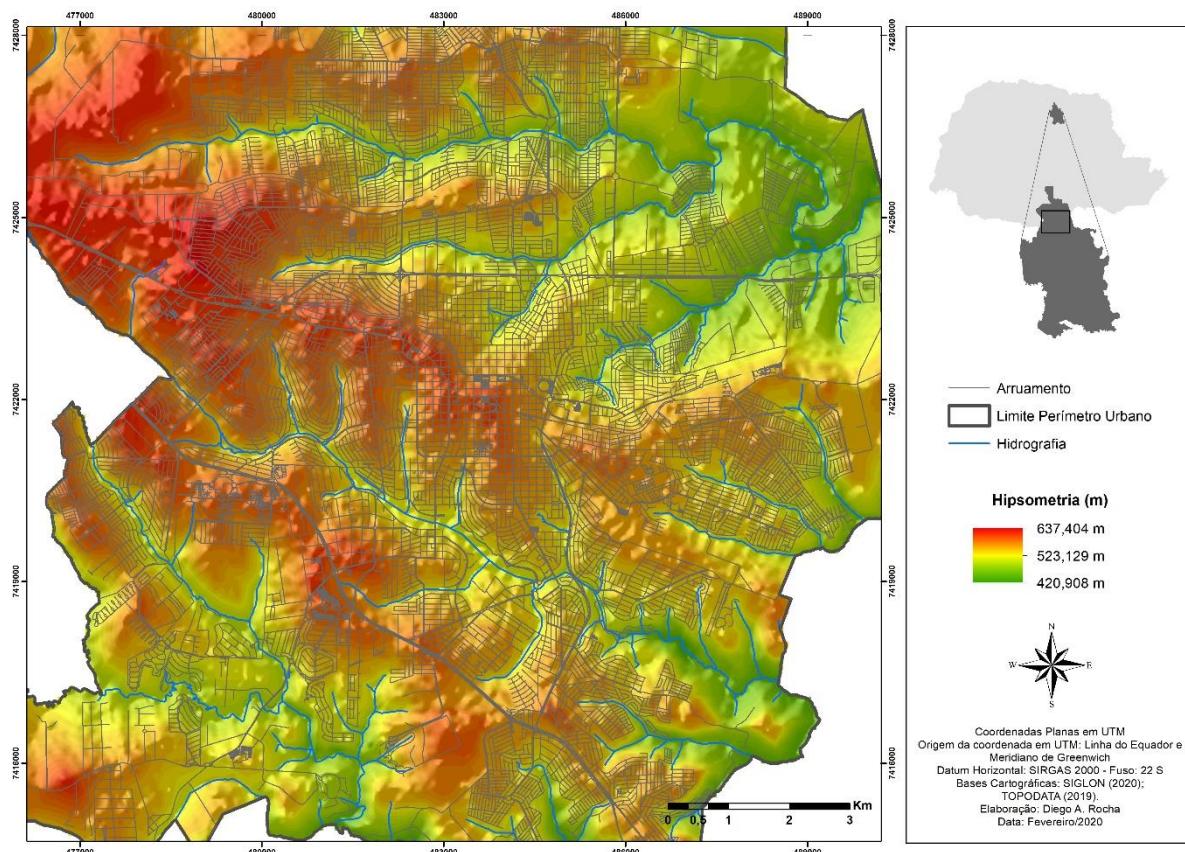
Consoante a isso, foi escolhido o método de interpolação conhecido como *Krigagem*, que trata de um procedimento que é exato, levando em consideração todos os valores observados, obtendo-se então um valor pontual para uma variável regionalizada.

Foi empregada a análise estatística clássica descritiva, que contou com a organização dos dados dos poços divididos em classes, como anteriormente descrito, e que partiu dos resultados do artigo A, que traz os valores de média, moda, desvio padrão e mediana e que foi feita uma correlação entre duas variáveis,

o rebaixamento dos níveis d'água x tempo, com isso foi possível estabelecer uma inter-relação entre o mapeamento crítico e a análise estatística demonstrando então a variação entre classes das linhas potenciométricas em uma região específica, demonstrando a criticidade dos dados encontrados gerando um instrumento capaz de auxiliar os planejadores nas atividades de planejamento, gestão e gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos.

Para auxiliar na análise dos fenômenos ocorridos entre as classes foi gerado um mapa da hipsometria da região de estudo, conforme Figura 30, de modo que através de software utilizou-se as curvas de nível para criar um Modelo Numérico de Terreno (MNT), com isso foram atribuídos aos poços o valor altimétrico do pixel correspondente ao MNT, após isso utilizando a calculadora de raster presente no software, foram encontrados valores potenciométricos para cada ponto, permitindo a aplicação de interpolação pelo método de *krigagem* e como produtos finais os mapas de superfície potenciométrica apresentando também as linhas de fluxo de água subterrânea para cada uma das classes selecionadas.

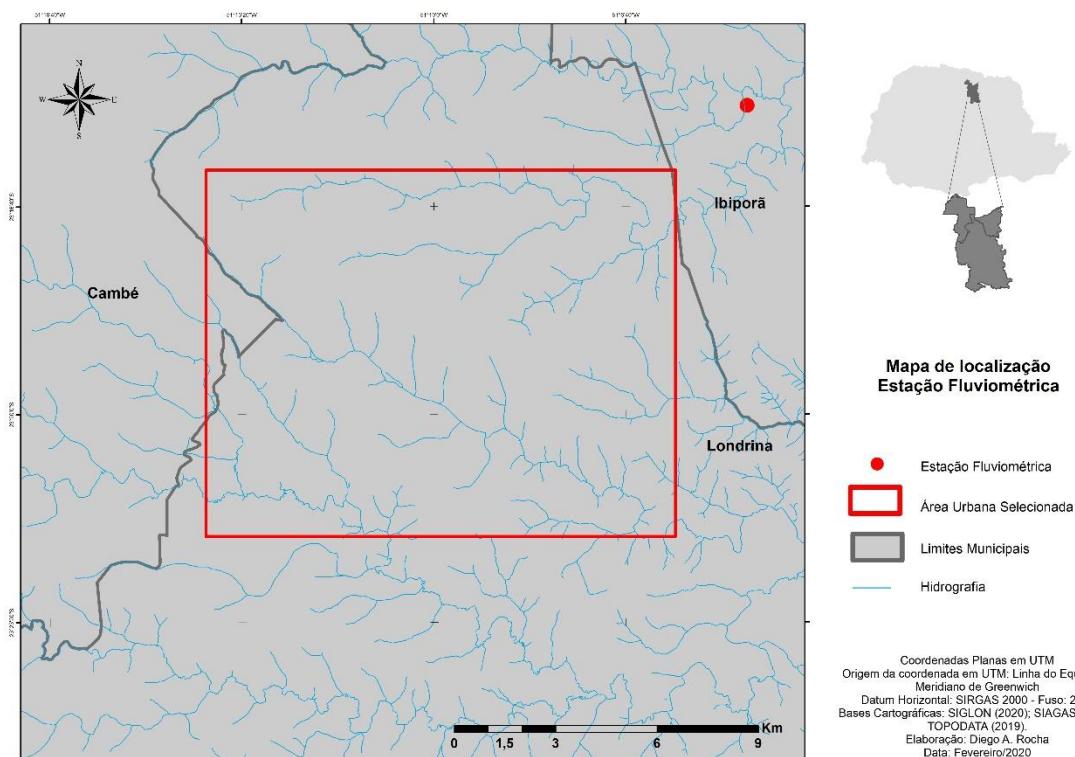
Figura 30 - Mapa hipsométrico da região de estudo



Por fim, para uma melhor integração dos resultados foram selecionados dados de fluviometria e pluviometria para o município de Londrina/PR, especificamente encontrados para a bacia do Ribeirão Cafetal, tendo como fonte o Banco de Dados Metereológicos para Ensino Superior e Pesquisa (BDMEP) pertencente ao INMET (2019) e o intervalo de tempo analisado foi entre os anos de 1989 e 2013, contudo foram apresentados apenas os resultados das duas classes mais recentes, entre 1995-2003 e 2004-2013 e o de anos posteriores entre 2014 e 2018, porém esses apenas para visualização do comportamento da reserva reguladora, sendo organizados ano a ano o que permitiu a aplicação da metodologia do cálculo da curva de recessão para toda a série histórica amostrada, que viabilizou a estimativa das reservas reguladoras do aquífero.

A estação fluviométrica utilizada para o cálculo das reservas reguladoras está localizada na latitude de $23^{\circ} 15' 03''$ e longitude $51^{\circ} 04' 33''$, conforme Figura 31.

Figura 31 - Mapa de localização da estação fluviométrica



O primeiro passo matemático na metodologia do cálculo da curva de

recessão é feita através da seguinte equação, utilizada por Rosa Filho (1993) e Celligoi (2000):

$$Q = Q_0 * e^{-kt} \quad (5)$$

Onde:

Q_0 = representa a descarga do rio no início da recessão (m^3/s);

Q = representa a descarga do rio (m^3/s) após um período de dias (t);

k = representa a constante de recessão;

A partir disso a primeira equação foi rearranjada e aplicada o logaritmo, para que a constante de recessão fosse calculada.

$$k = - \frac{\ln(Q) - \ln(Q_0)}{\Delta T} \quad (6)$$

Onde:

ΔT = Intervalo de tempo do início ao fim da recessão (em dia).

Para que se pudesse calcular o volume de água contribuinte para a bacia no ano selecionado (V) em m^3/ano foi utilizada a seguinte equação:

$$V = \frac{Q_0 \cdot 86400}{K} \quad (7)$$

A importância do cálculo do volume se dá, a partir do momento em que esse valor será utilizado para que o cálculo da restituição do aquífero seja realizada, ou seja, a restituição nada mais é do que o quanto da pluviosidade que cai é devolvido para o aquífero, sendo que essa já se inclui a água perdida por infiltração e escoamento superficial.

Desta forma, a restituição (h) em mm é calculada na equação:

$$h = \frac{V}{A} \quad (8)$$

Onde A = área da bacia (m^2).

Após encontrar a restituição do aquífero na bacia selecionada, foi obtida a restituição relativa, essa dada em porcentagem, essa restituição é o quanto de chuva em determinado ano voltou para o aquífero como fluxo de base, o cálculo é realizado através da seguinte equação:

$$H_{relativa} = \frac{(h)}{(precipitação\ até\ Q)} * 100 \quad (9)$$

Onde:

$H_{relativa}$ = restituição relativa (%);

h = restituição do aquífero (mm);

precipitação até Q = soma da precipitação até Q (mm/ano).

A partir dos dados de recessão foi possível calcular a reserva reguladora do aquífero, essa foi calculada através de:

$$R_r = A_c \times h_m \quad (10)$$

Onde:

R_r = Reserva da área de afloramento em cada ano selecionado (m^3);

A_c = Área de afloramento do aquífero (m^2);

h_m = restituição da bacia para o ano selecionado (m).

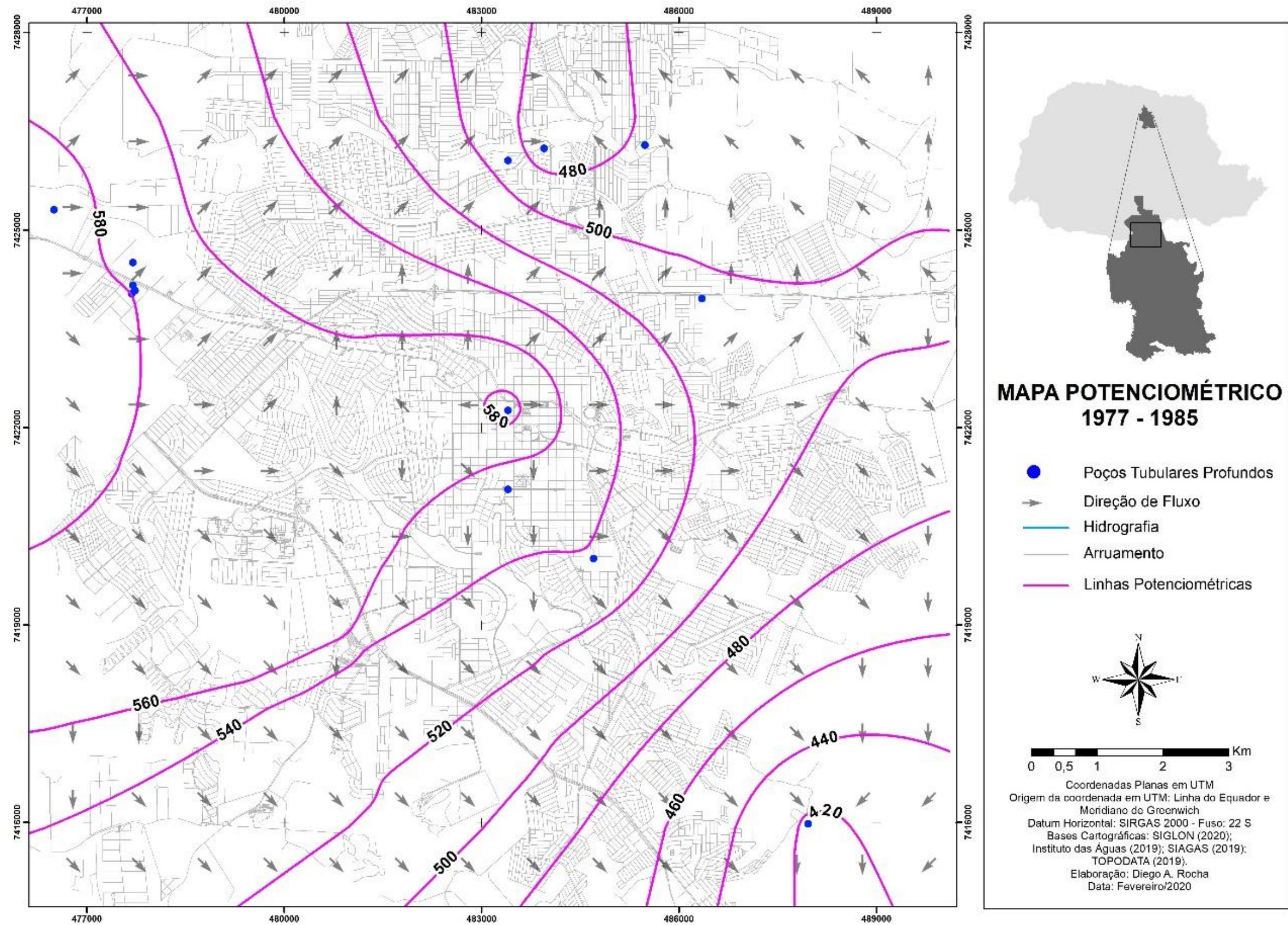
Os parâmetros calculados e analisados permitiram encontrar a reserva reguladora do aquífero para os anos selecionados, foi então realizado o cálculo da mediana, gerando o gráfico da reserva reguladora e também da precipitação (mm) ao longo das duas últimas classes de tempo definidas, visto que o comportamento nessas duas classes se mostra diferente do que os resultados encontrados no primeiro artigo.

5.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a construção de evolução histórica das superfícies potenciométrica da área de estudo foram utilizados para as classes 1, 2, 3 e 4, dados de 13, 32, 63 e 80 poços, respectivamente.

Foram então geradas linhas de contorno que posteriormente auxiliaram na elaboração do mapa potenciométrico das quatro classes de dados, com o mapa da primeira classe apresentado na Figura 32 a seguir.

Figura 32 - Mapa potenciométrico da Classe 1



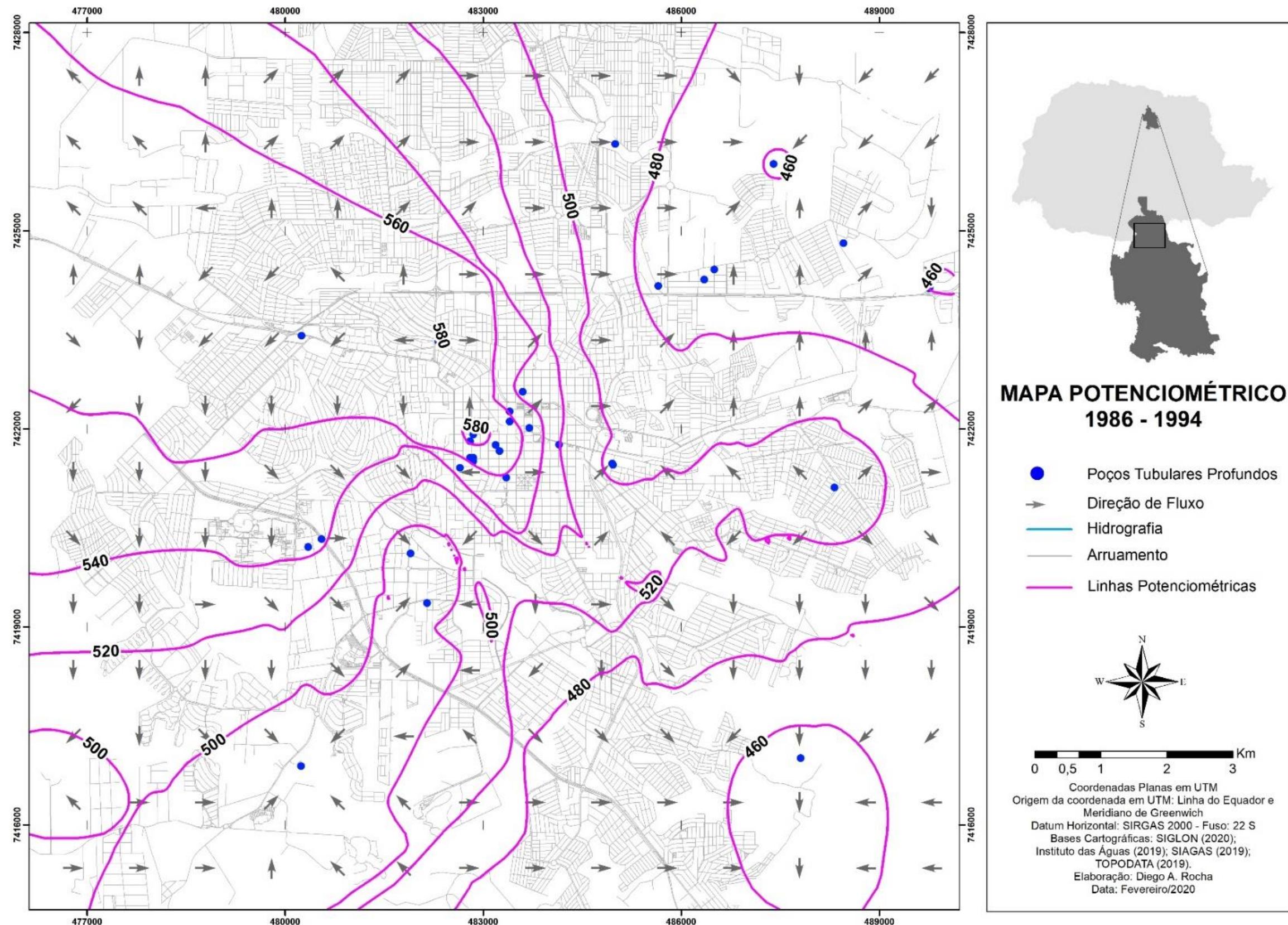
A Figura 32 apresenta linhas potenciométricas com característica mais uniforme e com contornos suaves, indicando fluxo preferencial no sentido NW para SE. Considerando o SASG como um aquífero predominantemente livre e fissural, tal sentido preferencial de fluxo era esperado, uma vez a inclinação do terreno (Figura 30) se verifica na mesma direção, controlado, principalmente pelos cursos d'água que estão dispostos no município no sentido SW, em direção à bacia hidrográfica do Rio Tibagi, do qual são afluentes.

Ainda para a Classe 1, nota-se baixa interferência de cones de depleção aquífera, com divisor de águas subterrânea, ou zona de maior potencial hidráulico, localizado na região central do mapa (Figura 30). Esse apontamento é importante, pois será utilizado como referência espacial e comparativa entre as diferentes classes potenciométricas a serem geradas no presente artigo, além disso, essa zona é a que apresenta maior concentração das atividades urbanas e de poços tubulares, previamente verificados na Figura 29.

A partir do divisor de águas subterrâneas é possível verificar ainda o sentido de fluxo preferencial NE, em direção à bacia hidrográfica do Ribeirão Jacutinga.

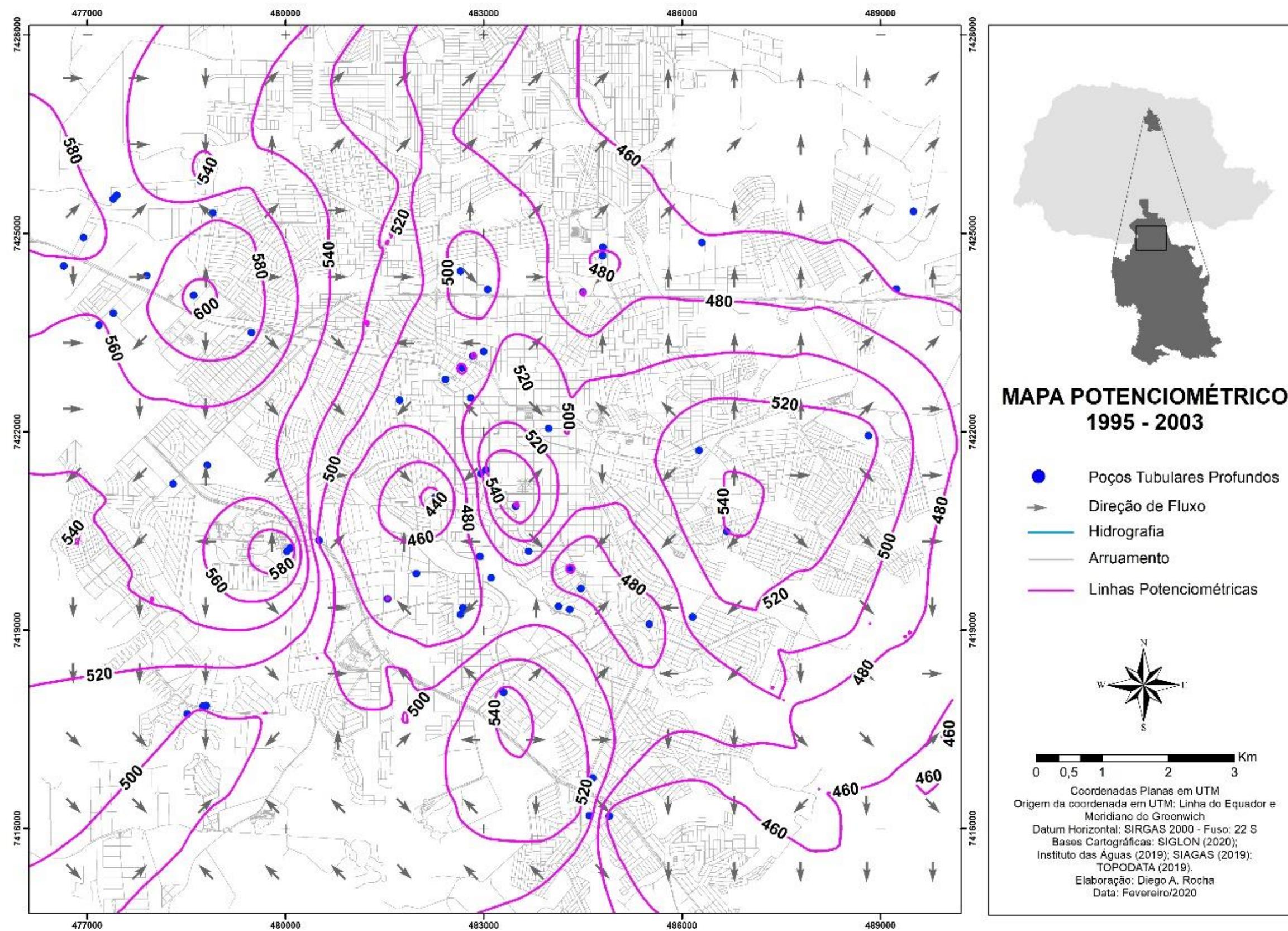
Já no mapa potenciométrico da segunda classe, apresentado na Figura 33, houve um aumento no número de poços perfurados, que saltou de 13 para 32 poços, promovendo assim interferência entre os mesmos, deixando as linhas potenciométricas anômalas (com curvas de distorção) e com aparecimento dos primeiros sinais de cones de depleção, reforçado pelas representações das direções de fluxo (setas de fluxos). A linha potenciométrica do divisor de águas se desloca para o sentido sudeste do mapa, com as direções de fluxo se apresentando um pouco mais confusas e não apenas no sentido do fluxo normal do divisor de águas, conforme pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 - Mapa potenciométrico da Classe 2



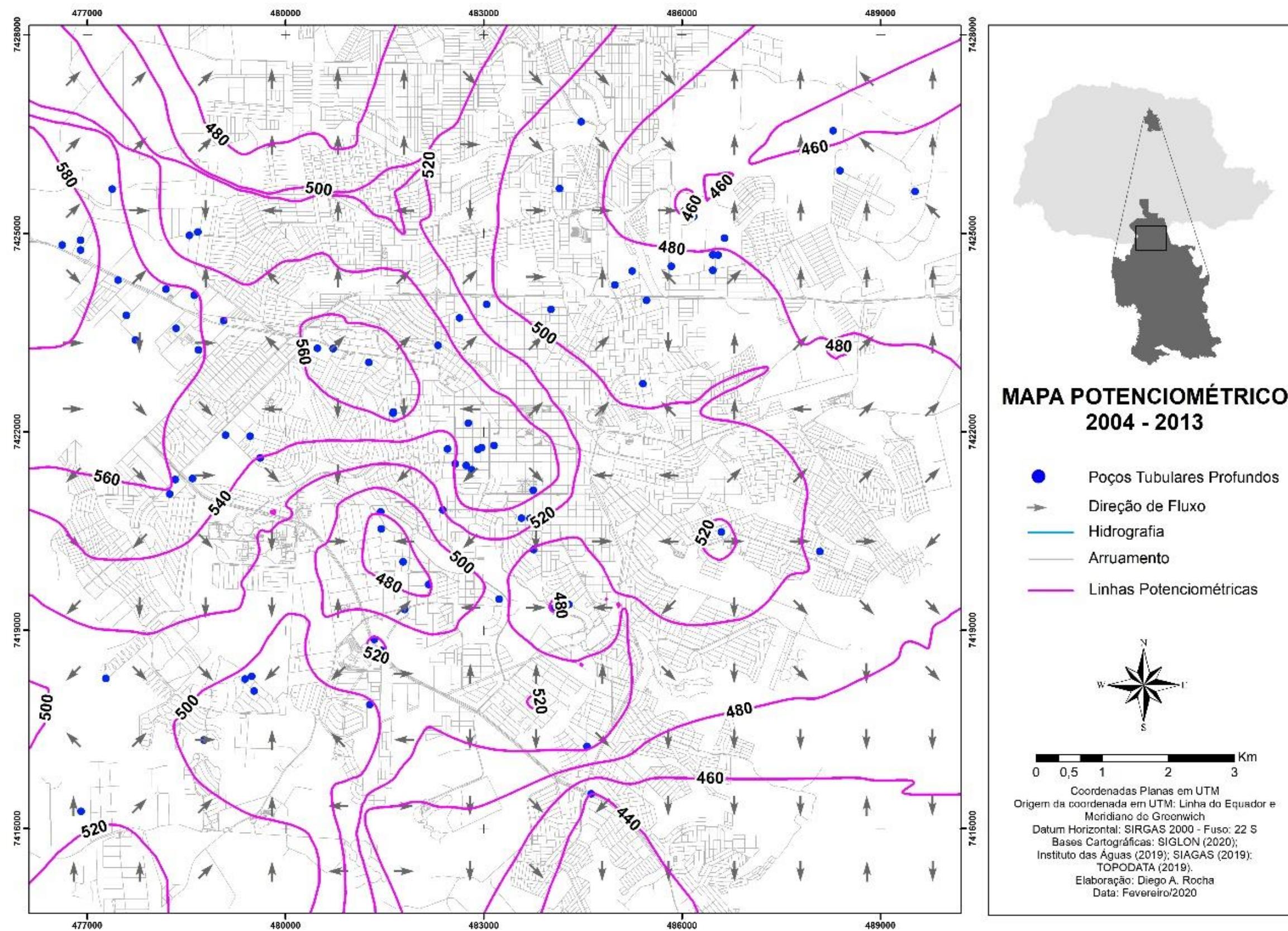
O mesmo acontece no mapa potenciométrico da classe 3, apresentado na Figura 34, visto que mais uma vez o número de poços dobra em relação a classe anterior, observando que a região central é o local, uma vez mais, com o maior número de poços com aumento considerável do número de cones de depressão, fazendo com que as inversões de fluxo sejam visíveis no mapa. Dessa forma, a classe 3, até o momento, é a que representa ser a mais preocupante dentre as classes, de modo que o padrão normal da direção do fluxo fique muito mais anômalo em relação ao divisor de águas e as linhas potenciométricas se mostram cada vez menos suaves, sendo possível observar na Figura 34.

Figura 34 - Mapa potenciométrico da Classe



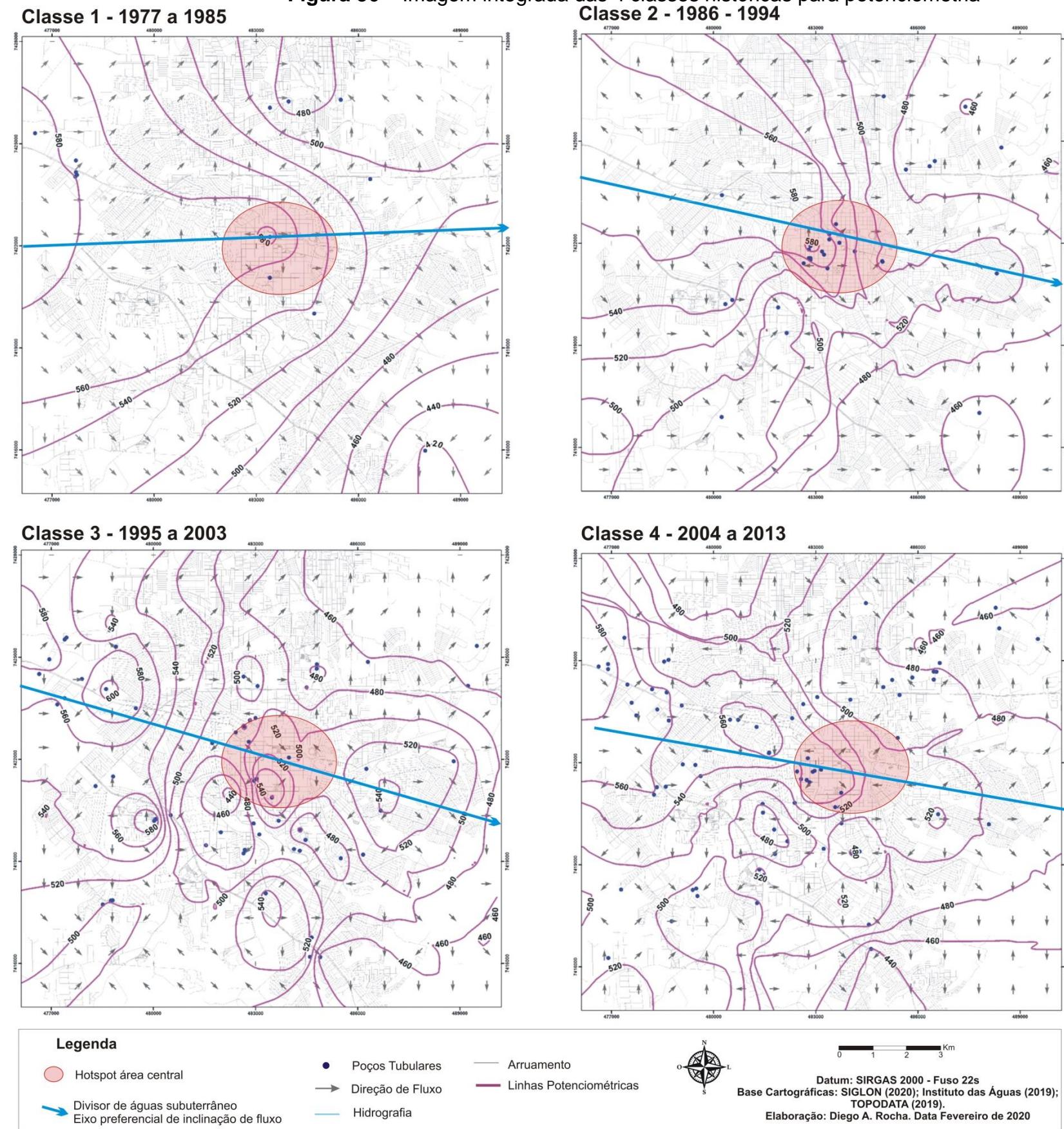
Contudo ao observar a Figura 35 é possível constatar na classe 4 que mesmo quando o número de poços aumenta mais uma vez e chega a 80 perfurações, há uma recuperação da potenciometria, visto que mesmo sendo possível observar alguns cones de depressão, esses diminuem em relação a classe 3, além disso as linhas potenciométricas se tornam mais suaves que na classe anterior e as direções do fluxo se encontram mais padronizadas em relação ao fluxo do divisor de águas, porém ainda apresentam inversões de fluxo.

Figura 35 - Mapa potenciométrico da Classe 4



A avaliação das Figuras 32 a 35 permitiu formular a Figura 36 que agrega todas as classes evolutivas da potenciometria numa mesma imagem, possibilitando novos apontamentos, como a indicação de uma zona de maior anomalia, denominada de Hotspot, visto que é nessa área que se encontra a maior concentração de poços, além de possibilitar a inserção de um eixo longitudinal que apresenta, concomitantemente, o divisor de águas subterrâneas e a direção preferencial da inclinação angular do fluxo ao longo das séries históricas.

Figura 36 – Imagem integrada das 4 classes históricas para potociometria
Classe 2 - 1986 - 1994



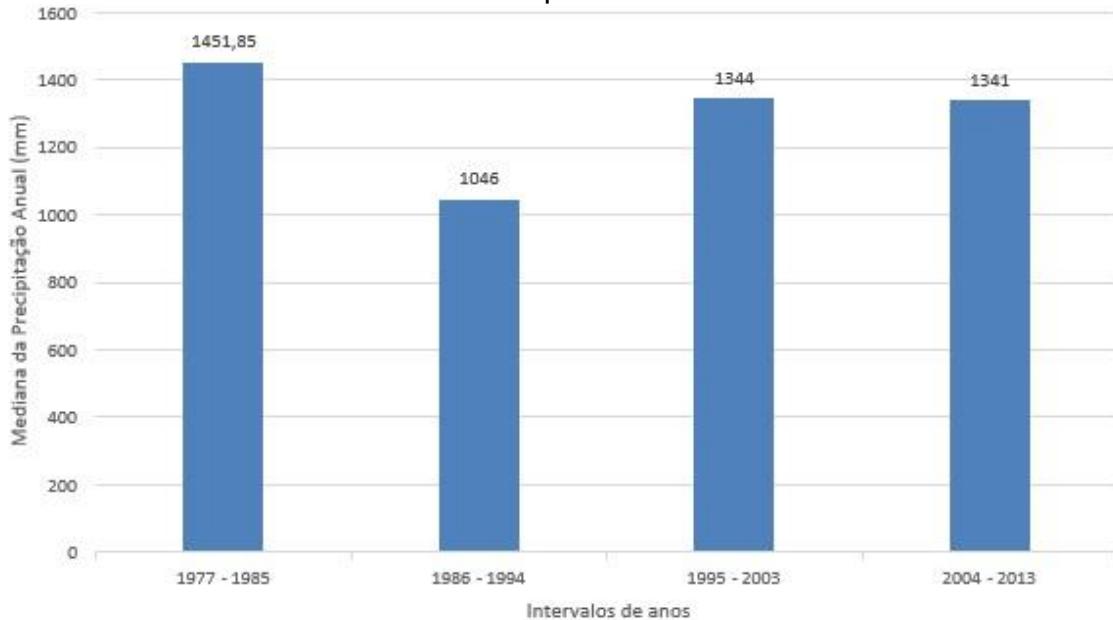
Ao analisar a Figura 36 é possível observar que a direção de fluxo da classe 1 sai de uma inclinação angular de WSW (268°) para ENE (88°) e o Hotspot tem nível potenciométrico mínimo de 560 metros, já na classe 2 há uma mudança na direção do divisor de águas, que é deslocado de NW (282°) para SE (102°), essa classe possui o nível potenciométrico mínimo do Hotspot em 520 metros, o que significa que a diferença entre níveis nas duas classes chega a 40 metros de rebaixamento, a classe 3 mantém a inclinação angular partindo de NW para SE, contudo o valor do azimute do vetor de fluxo passa de 286° para 108° , porém é possível observar que pela primeira vez na comparação entre classes há uma inversão da direção do fluxo de água dentro do Hotspot, tal que o menor nível potenciométrico encontrado é de 460 metros, ou seja, rebaixamento de 60 metros ao comparar com a segunda classe e de 100 metros quando se compara com a primeira classe, demonstrando que o aumento do número de poços afeta consideravelmente o aquífero.

Ao observar a classe 4, a direção de fluxo se mantém de NW para SE, porém, com azimute de vetor de fluxo partindo de 280° e chegando em 100° , ao analisar os níveis potenciométricos dentro do Hotspot é possível verificar que o nível mínimo se recupera sendo esse de 500 metros, ou seja 40 metros a menos de rebaixamento em relação a classe 3, porém ao compará-la com a primeira classe, verifica-se ainda a existência de um rebaixamento de 60 metros.

Esses resultados confirmam os resultados apresentados no primeiro artigo, visto que para a obtenção das linhas potenciométricas foram levados em consideração a cota do terreno subtraindo delas o valor do NE, tal que no primeiro artigo é possível observar uma melhora na mediana do NE na última classe.

Após os resultados, a recuperação da classe 4, observado na Figura 35, chamou a atenção, sendo calculados os valores da mediana da precipitação (mm), apresentada na Figura 37. Como a variação anômala dos dados ocorre entre a terceira e quarta classe temporal, essas foram os objetos de estudo sendo apresentado na Figura 38 as estimativas para as reservas reguladoras (m^3/ano) do SASG considerando a sua distribuição na área de estudo.

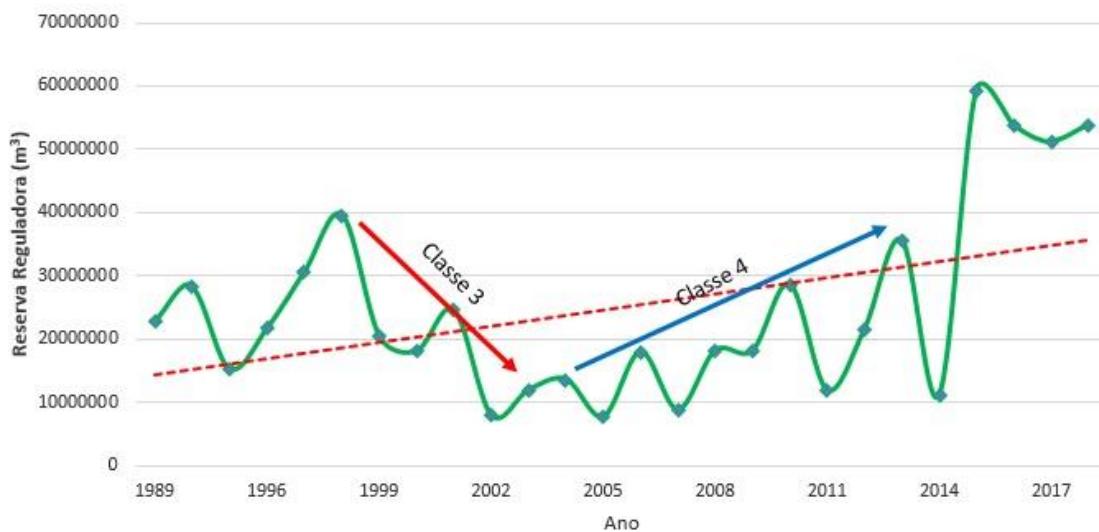
Figura 37 – Variação da mediana da precipitação (mm) ao longo das classes temporais



A Figura 37 deixa clara a diminuição da mediana da precipitação (mm) na segunda classe analisada, passando de 1451,85 mm para 1046 mm, porém na terceira e quarta classes os valores são extremamente parecidos, sendo 1344 mm e 1341 mm, respectivamente. Contudo ao analisar os dados e comparar as precipitações diárias e mensais, aliadas aos valores encontrados após o cálculo da reserva reguladora do aquífero e da respectiva porcentagem de contribuição dessas chuvas para o aquífero, foi possível observar a partir da Figura 37 que mesmo com o aumento das chuvas na classe 3, as mesmas não foram suficientes para contribuir com o aquífero, talvez por haver grande escoamento superficial ou se concentrando em algum ano.

Sendo assim, ao analisar a Figura 38, foi possível observar que ocorreu a visível diminuição da reserva reguladora na classe 3, observada na seta vermelha da Figura 38, que é o inverso do que ocorre na classe 4, onde é possível perceber que há um grande aumento nos valores da reserva reguladora do aquífero, demonstrando uma tendência de crescimento, que pode ser observada ainda nos anos posteriores a última classe, conforme a seta azul da Figura 38.

Figura 38 - Reserva reguladora do aquífero (m³/ano)



Após a análise das Figuras 37 e 38 é possível constatar que mesmo a mediana da precipitação sendo praticamente a mesma nas classes 3 e 4, houve uma grande diferença em como ela influenciou na recarga do aquífero, visto que houve uma grande tendência de queda na terceira classe e uma grande recuperação na quarta classe, com isso foi possível observar que mesmo havendo um aumento do número de poços na região de estudo, a recuperação do aquífero na classe 4 está diretamente relacionada com o aumento dos níveis da reserva reguladora que praticamente quadruplicou, passando de pouco mais de 10^8 m³/ano ao final de 2003 para quase 4×10^8 m³/ano ao final de 2013. Dessa forma, é possível apontar que o SASG possui rápida resposta ao regime de chuvas, sendo que o nível d'água da reserva reguladora auxiliou na melhora dos níveis potenciométricos da última classe sendo, assim os dados da reserva reguladora apresentados justificam a recuperação dos parâmetros analisados entre os anos de 2004 e 2013.

5.7 CONCLUSÕES

Posteriormente a apresentação e análise dos dados ficaram constatadas que o aumento do número de poços na região central de Londrina/PR traz consequências para a evolução potenciométrica para as 4 classes históricas, com isso foi possível constatar o rebaixamento dos valores dos níveis potenciométricos, iniciando com nível potenciométrico mínimo de 560 metros na

primeira classe, passando para 520 metros na segunda classe, ou seja, um rebaixamento de 40 metros, chegando a 460 metros de nível potenciométrico mínimo na terceira e mais preocupante classe, inclusive com inversões de fluxo dentro do Hotspot e melhorando na quarta e última classe quando o nível potenciométrico mínimo chega a 500 metros, que pode ser explicada pela importância de uma precipitação regular no SASG e consequente aumento do nível da reserva reguladora, que mostra uma reação extremamente rápida seja positiva ou negativamente as variações na quantidade ou tipo de chuva que cai na região mostrando então que os níveis estão diretamente associados a recarga do aquífero.

Contudo ao observar a grande anormalidade das linhas potenciométricas conforme os anos passam, as linhas de fluxo que vão deixando de ser uniformes, os visíveis cones de depleção causados pelo grande número de poços na área central de Londrina/PR e também a associação de recuperação do aquífero com o regime de chuvas, a classe 3 mostra um cenário preocupante, visto que períodos de estiagem, ou regime de chuvas não-uniformes podem fazer com que a criticidade encontrada na classe 3 se repita futuramente. Ainda assim, mesmo com a melhora na última classe é possível observar que o rebaixamento de 60 metros em comparação com a primeira classe reforça a ideia de que o aumento desordenado do número de poços afeta negativamente a região em que eles estão alocados, causando o rebaixamento do nível potenciométrico.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa auxiliou no entendimento do SASG em Londrina/PR, especialmente para a área urbana do município, trazendo um panorama histórico evolutivo acerca da exploração do aquífero, tornando-se um instrumento que pode ser verificado pelos gestores municipais na busca pela gestão correta dos recursos hídricos subterrâneos no município, bem como ajudou na resposta de diversas questões levantadas.

Os resultados apresentados demonstram que a produtividade hídrica do aquífero é alterada quando o número de poços tubulares profundos da área de estudo aumenta, o que é verificado com a diminuição de valores dos parâmetros analisados como Q (m^3/h) que tinha mediana de $14\ m^3/h$ e na última classe tem apenas $4\ m^3/h$ de mediana e Q/s ($m^3/h/m$) que sofreu grandes modificações desde a primeira classe que tinha mediana de $1,34\ m^3/h/m$ e na última classe analisada passou a ter $0,2\ m^3/h/m$, além do NE e ND que também foram impactados ao longo dos anos.

Além disso, foi possível observar que com o passar dos anos e com o aumento do número de poços na área central de Londrina/PR as linhas potenciométricas apresentaram anormalidades, como curvas de distorção e cones de depressão, além do fluxo do divisor de águas apresentar inversões de fluxo.

Além disso, o estudo apresentou um grande rebaixamento dos valores dos níveis potenciométricos do aquífero, permitindo o apontamento de um grande Hotspot circular na zona central da cidade de Londrina. A grande depleção do SASG nessa zona é representada por uma diferença de 60 metros entre a primeira e a quarta classe, com a classe 3 sendo a mais preocupante, possuindo rebaixamento de 100 metros quando comparado com a classe 1, inclusive com a presença visível de inversão de fluxo ao centro do Hotspot.

Os resultados obtidos do presente trabalho reforçam a importância da gestão dos recursos hídricos subterrâneos e do conhecimento de aquíferos fissurais (o que remete grandes desafios de pesquisa devido aos seus condicionantes de heterogeneidade e anisotrópico).

O mapeamento espacial com auxílio de SIG, a formulação de um banco de dados com informações confiantes em diversos aspectos metodológicos e

estatístico bem como a evolução temporal das áreas explotadas do SASG podem contribuir diretamente para com a gestão integrada dos recursos hídricos, especialmente os subterrâneos.

Foi possível constatar que o SASG possui rápida reação no que diz respeito a recarga aquífera, se recuperando rapidamente em épocas de precipitação constante, mas tendo prejuízos em períodos de seca, enfatizando ainda mais a importância da gestão correta dos recursos hídricos subterrâneos, ou seja, um estudo como o realizado dá o panorama geral do aquífero e como o mesmo é afetado por suas mais diversas variações temporais.

Com isso é de fundamental importância que os gestores municipais e até mesmo a população seja consciente da busca pela sustentabilidade do aquífero, que pode sim se tornar uma alternativa de abastecimento, mas sempre respeitando os seus limites de produção, visto que o gerenciamento adequado das águas subterrâneas é ação obrigatória para restauração desse recurso renovável, caso a gestão seja ineficaz ou incorreta a população futura poderá sofrer graves consequências, como a diminuição da oferta de água ou até mesmo, em casos mais extremos, a inutilização do aquífero.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. L. de; COSTA, G. M.; NASCIMENTO, Ricardo P.; LEITE, V. M.; LOBÃO, D. C.; GENESTRA, M.; OSÓRIO, T. L. G.; CARELLI, F. C. Geoprocessamento no Trato de Controle de Características Urbanas. **Cadernos UniFOA**. Mar. 2007. Disponível em: <http://web.unifoaa.edu.br/cadernos/edicao/03/21.pdf>. Acesso em: 5 de julho. 2019.
- ASSUNÇÃO, R. M. Estatística espacial com aplicações em epidemiologia, economia, sociologia. In: ESCOLA DE MODELOS DE REGRESSÃO, 7, 2001, São Carlos. **Anais** [...] São Carlos: ABE, 2001. p. 1-131.
- BARROS, M. V. F. (et al). **Atlas Ambiental da Cidade de Londrina**. 2008. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/atlasambiental>. Acesso em: 04 fev. 2020.
- BORGES, K.A. de V.. A Gestão Urbana e as Tecnologias de Informação e Comunicação. **Informática Pública**. v.2, n.2, p.17-24. 2000.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília: Câmara dos Deputados, 1997.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002**. Estabelece diretrizes para a inserção das águas subterrâneas no instrumento Plano de Recursos Hídricos. In: RECURSOS HÍDRICOS: conjunto de normas legais. 3. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004c. p.133-135.
- BUGS, G. **Tecnologias da Informação e Comunicação, Sistemas de Informação Geográfica e a Participação Pública no Planejamento Urbano**. Porto Alegre, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CASARIL, C. C.. A expansão físico-territorial da cidade de Londrina. **Geografia - Londrina**. 18, n. 1, jan./jun. 2009 P. 65-94.
- CARMELLO, V. **Vulnerabilidade Agrícola da Produção de Soja em Cinco Municípios da Região Metropolitana de Londrina – PR**. 2011. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Geografia – Universidade Estadual de Londrina - PR, Londrina, 2011.
- CELLIGOI, A. **Recursos hídricos subterrâneos da Formação Serra Geral em Londrina – PR**. 83 p. Dissertação de mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- CELLIGOI, André. Hidrogeologia da Formação Caiuá no Estado do Paraná. 2000. 95 f. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

- CELLIGOI, André; VIANNA, Thiago Rossi. Análise das reservas de água subterrânea do aquífero Serra Geral em Londrina: Recarga e Consumo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XII., 2002. Florianópolis. **Anais da Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, 2002. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22693>> Acesso em: 14 jun. 2019.
- CIRILO, A.; OLIVEIRA, B.; AZEVEDO, J.; ALVES, R. **Sistemas de Informações sobre Recursos Hídricos**: o estado da arte. In: RELATÓRIO OFICINA PROÁGUA Semi-árido. MMA/SRH, 2000.
- CONAMA, Conselho Nacional de Meio Ambiente. 2008. Resolução Conselho nº 396. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente. Brasil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562f>>. Acesso em: 01 jun. 2019.
- DEWANDEL, Benoit; LACHASSAGNE, Patrick; BAKALOWICZ, Michel; WENG, Philippe; AL-MALKI, A. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite had-rock aquifer. **Journal of Hydrology**, 274, p. 248-269, 2002.
- DOMINGUES, C.; FRANÇOSO, M.. SIG na Gestão Pública: Análises e Desafios de uma Implantação. In: 2º Congresso de Engenharia de Moçambique, 2008. **Anais**. [...] Moçambique: p.1-9.
- FEITOSA, Fernando. A. Carneiro.; MANOEL FILHO, João. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2ª ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.
- FILHO, Ernani F. R. et al. Sistema Aquífero Guarani – Considerações Preliminares sobre a Influência a do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das Águas Subterrâneas. **Revista Águas Subterrâneas**, n. 17, p. 91-112, Maio 2003.
- FILHO, J. M. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, Fernando A. C. ...[et al]... **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro. CPRM: LABHID, 2008. cap 2.1.
- GOIÁS. Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Goiânia, 2006. 232p. (Série Geologia e Mineração, 1).
- GONÇALVES, T. D.; ROIG, H. L.; CAMPOS, J. E. G. Sistema de informação geográfica como ferramenta de apoio à outorga dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 169-180. 2009.
- HONDA, S. C. A. L.; VIEIRA, M. C.; ALBANO, M. P.; MARIA, Y. R. Planejamento ambiental e ocupação do solo urbano em Presidente Prudente (SP). **ver. Bras. Gestão Urbana**. v.7, n.1, p. 62-73, 2015.

IAPAR, Instituto Agronômico do Paraná. **Atlas Climático do Paraná.** 2019. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=595>. Acesso em: 16 abr. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informações completas do município.** 2019. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=411370>>. Acesso em: 26 set. 2019.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. 2019. **Dados Históricos.** BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa . Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. **Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2019a. Disponível em: http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/DADOS%20ESPACIAIS/Instrucoes_Acesso_FTP_v2018.pdf. Acesso em: 09 set. 2019.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. **Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2019b. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=64>. Acesso em: 09 set. 2019.

IPARDES, Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. 2019. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/imp/index.php>. Acesso em: 12 set. 2019.

ISLAM, M.B., FIROZ, A.B.M., FOGLIA, L.; MARANDI, A.; KHAN, A. R; SCHUTH, C, RIBBE, L. 2017 A regional groundwater-flow model for sus-tainable groundwater-resource management in the south Asian megacity of Dhaka. **Bangladesh Hydrogeology Journal**, v. 25, p. 617-637, 2017.

JURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, Ch. J. (1978). Mining geostatistics. Academic Press, 600p.

JULIANO SILVA, Juliano. L. da, 2011. **Rios de Londrina: Um olhar Geográfico no (Per)correr das Águas pela Cidade.** Disponível em: <<https://www.webartigos.com/artigos/rios-de-londrina-um-olhar-geografico-no-per-correr-das-aguas-pela-cidade/77279/>>. Acesso em 01 fev. 2020.

KARMANN, I. Águas subterrâneas. In: TEIXEIRA, W.; MOTTA, T, M.C.; FAIRCHILD, T, R.; TAIOLI, F. (Ed). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de textos, 2001, p. 113-138.

KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v.52, p.119-139, 1951.

LAMICHHANE S. & SHAKYA N. M. (2019). Alteration of groundwater recharge areas due to land use/cover change in Kathmandu Valley, Nepal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**.

LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. São Paulo. Editora da UNESP, 1998.

LARINI, M. M. **Avaliação do uso das Águas Subterrâneas na região metropolitana de Londrina-PR e comparativo da utilização dos mananciais superficiais para o abastecimento público**. 2013. 126f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

LONDRINA, Prefeitura Municipal de. 2019. **Dados Geográficos**. Disponível: <<http://www.londrina.pr.gov.br/>>. Acesso em: 12 set. 2019.

LOURENCETTI J.; PRATES, M. M.; OLIVEIRA, J. N de. Rebaixamento do Aquífero Bauru em São José do Rio Preto, SP. In: XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. Bonito/MS. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, 2012.

MAACK, R.. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 3^a. Ed. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002. 400p. (Brasil diferente).

MANASSES, F.; FILHO, E. F. R.; BITTENCOURT, A. V. L. Estudo Hidrogeoquímico da Formação Serra Geral na Região Sudoeste do Estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**, v.21, n.02, p.49-58, 2007.

MARQUES, É. A. T.; CUNHA, M. C. C.; MELO, I. D. F. Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Gestão Pública**: Práticas e Desafios, Recife, v. 2, n.4, p. 24-37, jun. 2011.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**. V.58, p.1246-1266, 1963.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao Inventário Florestal**. Dissertação de Doutorado, Piracicaba (SP): USP, 2004.

MENDES E. A. A. et al; Mananciais Subterrâneos no Estado do Paraná. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XII., 2002, Florianópolis. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo; Revista Águas Subterrâneas. 2002.

MINEROPAR, Minerais do Paraná. **Descrição das unidades litoestratigráficas**: Folha de Londrina. 2003. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/2_Geral/Geologia/PDF_Mapas_Geo_250000/Londrina.PDF> Acesso em: 22 abr. 2019.

MINEROPAR - **Serviço Geológico do Paraná**. 2019. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=125>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

MINEROPAR - **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. 2006. Disponível em:<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/2_Geral/Geomorfologia/Atlas_Geo

[morforlogico_Parana_2006.pdf](#)>. Acesso em: 07 jan. 2020.

MOURÃO, Maria Antonieta A. Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. 2009. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 2011, Anais...* São Paulo, Brasil. 2011.

NEVES, M. A. et al. Análise das informações disponíveis sobre poços tubulares profundos e seu uso no diagnóstico da variação temporal do nível d'água e da produtividade dos aquíferos da bacia do Rio Jundiaí (SP). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XIII, 2004, Cuiabá. Anais.* São Paulo, Revista Águas Subterrâneas. 2004.

PARANÁ, Estado do. Sistema Estadual de Legislação. **Decreto 9.957, de 23 de janeiro de 2014**, que dispõe sobre o regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos e adota outras providências. Disponível em: <<https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=113097&indice=1&totalRegistros=1>> Acesso em: 17 nov. 2019.

PARANÁ, Estado do. **Lei nº 12.726, de 26 de novembro de 1999**. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e adota outras providências. Disponível em: <https://www.abas.org/arquivos/Lei-12.726-99_PR.pdf> Acesso em 14 nov. 2019.

PAULO SILVA. C. A. **Reserva hídrica: Aquífero Guarani e seu uso sustentável**. Monografia (especialização) - Curso em Legislativo e Políticas Públicas, Câmara dos Deputados, Centro de Formação, Treinamento e Aperfeiçoamento (Cefor), 2011.

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas, South America: classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, v. 55, p. 119-139, 1992.

PEREIRA, G. C., SILVA, B. C. N. Geoprocessamento e urbanismo. **Teoria, técnica, espaço e atividades: Temas de geografia contemporânea**. Rio Claro: Unesp, p 97-137, 2001.

PIMENTA, J.R.S. Método Geohistórico Cross-Seccion como Contribuição Epistemológica a Hidrogeografia: O Caso Do Bairro De Santa Cruz – Rio de Janeiro/RJ. **Anais do III Encontro Nacional de História do Pensamento Geográfico I Encontro Nacional de Geografia Histórica**. Rio de Janeiro, Nov. 2012.

RAMOS, C. **Hidrogeografia: Investigação em Dinâmica Litoral e Fluvial**. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos. Universidade de Lisboa, 2005.

REBOUÇAS, A. C. Águas Subterrâneas. *In: GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, U. G. Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos*. São Paulo: Signus Editora; 2006. cap.1.

RIBEIRO DA SILVA, K.; PAIVA, Y.G.; CECÍLIO, R.A.; PEZZOPANE, J.E.M. Avaliação de interpoladores para a espacialização de variáveis climáticas na bacia do rio Itapemirim - ES. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p.3.141-

3.146.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Ed. Autor, Juiz de Fora, 2000.

ROCHA, Diego Allysson. **Proposta de exploração do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e Sistema Aquífero Guarani (SAG) em Londrina/PR para o abastecimento público**. 2017. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

ROSA FILHO, Ernani F. Caracterização da depleção de um aquífero através do coeficiente de descarga, α , de Maillet. **Boletim Paranaense de Geociências**, 1993.

SALES, L. F. P. de, et al; Caracterização de Poços Tubulares Profundos em ambiente SIG com disponibilização via web. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XVIII., 2014. Belo Horizonte/MG. **Anais...** Revista Águas Subterrâneas. São Paulo, 2014.

SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B. **Geotecnologias: Teoria e Prática**. Curitiba: Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, 2018.

SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. 2018. Disponível em: <<http://site.sanepar.com.br/noticias/sanepar-investe-mais-r-225-milhoes-em-londrina>>. Acesso em: 10 out. 2019.

SANTANA, P.. **Por uma Cidade Saudável**. In: JANUS – Publicação conjunta do Jornal Público e Universidade Autónoma de Lisboa. 2009.

SANTOS, M. M. dos. **Gerenciamento de recursos hídricos Subterrâneos**: uso atual e potencial do sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (SP). 2009. 224 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2009.

SIAGAS, Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. **Pesquisa geral sobre poços**. 2017. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php>. Acesso em: 09 de set. 2019.

SILVA, E. **Introdução a Sistema de Informações Geográficas**. 2004. Disponível em:<http://www.sqlmagazine.com.br/Colunistas/EvaldoOliveira/03_IntrSistInfomGeogr.asp>. Acesso em: 2 abr. 2019.

SILVA, L. A. da. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande – MG**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, MG. 2009.

SOUZA, A. A. **Caracterização da Bacia do Rio Iguaçu, a Jusante do Município de Reserva do Iguaçu, como Área de descarga do Aquífero Guarani**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do

Paraná. 2004.

STRAHLER, A.N.; STRAHLER, A. **Introducing Physical Geography**. 4 ed. New York: J. Wiley&Sons, 2006.

TCACENCO-MANZANO, L. M.; ATHAYDE, C. V. M.; ZUQUI. A. R.; ROSA FILHO, E. F. da.; Análise temporal do nível estático dos poços de abastecimento público da área urbana de Campo Grande. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n.1, p. 1-11, 2019.

YAMAMOTO J.K.; LANDIM, P.M.B. (2013). **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo, Oficina de Textos. 215p.

ZANETTI, N.. **Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geociências) - – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2012.