

FATORES GEOLÓGICOS E PEDOLÓGICOS QUE INFLUENCIAM NA PRODUTIVIDADE HÍDRICA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG) NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ

Giselly Peterlini

Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Geociências, Londrina, PR, Brasil
gisellypeterlini@uel.br

José Paulo Peccinini Pinese

Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Geociências, Londrina, PR, Brasil
pinese@uel.br

André Celligoi

Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Geociências, Londrina, PR, Brasil
celligoi@uel.br

RESUMO

O aumento do uso das águas subterrâneas se contrasta com a deficiência no conhecimento do potencial dos aquíferos fraturados e dos fatores ambientais que contribuem para uma melhor produtividade hídrica. Considerados fatores influentes na produtividade, as Estruturas Intraderrames (E) – fraturas, vesículas e amígdalas – e a Espessura de Solo (S) foram analisadas com o objetivo de avaliar sua influência sobre a produtividade de poços que exploram o SASG no norte do Paraná. Foi calculada a quantidade de E presente nos perfis geológicos e observados os valores de S de 60 poços. Para avaliar a influência do tipo de E, foram criados três grupos de poços e comparados os dados de produtividade. Para avaliar a influência da quantidade de E e S na produtividade, aplicaram-se análises de correlação e de variância multivariada. O único grupo que apresentou correlação moderada com a vazão foi o grupo que apresentavam três tipos de estruturas no perfil. A S apresentou uma correlação muito baixa a baixa com a produtividade. As análises multivariadas confirmaram que a única variável influenciada por E e S é a vazão. Conclui-se que E e S exercem influência sobre a produtividade aquífera, sendo que E exerce maior influência que S.

Palavras-chave: Aquíferos Fraturados. Estruturas intraderrames. Espessura de Solo. Estatística Multivariada.

GEOLOGICAL AND PEDOLOGICAL FACTORS THAT INFLUENCE THE HYDRIC PRODUCTIVITY OF SERRA GERAL AQUIFER SYSTEM (SASG)

ABSTRACT

The increase of groundwater use contrasts with the lack of knowledge about fractured aquifers potential and environmental factors that contribute to better hydric productivity. Acknowledged as influence factors on productivity, Intra-flow Structures (E) – fractures, vesicles and amygdules – and Soil Thickness (S) were analyzed in order to evaluate their influence over productivity of wells that exploit the SASG, on the northern Paraná. The amount of E present in geological profiles was calculated and the S values were observed for 60 wells. In order to evaluate the influence of the E type, three well groups were created and productivity data were compared. In order to evaluate the influence of the amount of E and S on productivity, correlation and multivariate variance analyzes were applied. The only group which presented a medium correlation with the discharge was the group that had three types of structures on the profile. The S showed a very small to small correlation with productivity. Multivariate analyzes confirmed that the only variable that suffers influence of the amount of E and S is the discharge. It is concluded that E and S influence aquifer productivity as well as identify that E has a bigger influence than S.

Keywords: Fractured Aquifer. Intra-flow Structures. Soil Thickness. Multivariate Statistics

INTRODUÇÃO

O aumento populacional e a poluição das águas superficiais têm levado a um consequente aumento na demanda por recursos hídricos subterrâneos, isto porque, de acordo com Abreu; Conicelli; Peñaranda (2016), as águas subterrâneas são consideradas fontes seguras de água durante

períodos de estiagem, além de apresentarem menor vulnerabilidade à contaminação e possuírem excelente qualidade, muitas vezes sem necessidade de tratamentos.

Este aumento de demanda já ocorre na região de Londrina, Cambé e Ibiporã, municípios localizados no norte do estado do Paraná, que apresentam uma grande quantidade de poços tubulares profundos. A água subterrânea nestes municípios é amplamente utilizada para os mais diversos fins, principalmente no abastecimento da população e no desempenho das atividades industriais. Entretanto, apesar da sua importância para o desenvolvimento socioeconômico regional, o aumento do uso dos recursos hídricos subterrâneos se contrasta com a deficiência existente no conhecimento do potencial hídrico dos reservatórios (ZOBY, 2008; ROQUES et al., 2016; ABREU; CONICELLI; PEÑARANDA, 2016).

Os poços presentes na região, em sua maioria, exploram o SASG, o qual se constitui um aquífero do tipo fraturado, em que a porosidade e permeabilidade primária do embasamento rochoso é baixa, fazendo com que a circulação e armazenamento da água ocorra devido às descontinuidades físicas da rocha (falhas e/ou fraturas que se interconectam entre si e com estruturas vesiculares/amigdaloidais) dando origem a um sistema aquífero heterogêneo, anisotrópico e descontínuo, de difícil avaliação e exploração, onde as propriedades hidráulicas podem resultar em sistemas altamente variáveis e de baixa produtividade (REBOUÇAS, 1978; ROSA FILHO et al., 2006; ATHAYDE; ATHAYDE; ROSA FILHO, 2012; ROQUES et al., 2016).

Neste sentido, os temas de maior interesse na exploração dos aquíferos são a disponibilidade hídrica subterrânea e a produtividade de poços (ZOBY, 2008). Quando se trata de aquíferos fraturados, Holland e Witthüser (2011) bem como Abreu; Conicelli; Peñaranda (2016) apontam que estes apresentam diferenças importantes de outros tipos de aquíferos, exigindo que se tenham conhecimentos adequados e se empreguem técnicas específicas para um gerenciamento eficiente deste recurso hídrico, destacando ainda que um dos maiores desafios da hidrogeologia de meios fraturados é a compreensão e conhecimento dos fatores que controlam a ocorrência e a produtividade hídrica.

São muitos os autores que buscam identificar quais os fatores geológicos endógenos e exógenos que exercem maior influência sobre a produtividade hídrica em meios fraturados (COSTA, 1986; COSTA e SILVA, 2000; CORIOLANO; SÁ; SILVA, 2000; HOLLAND e WITTHÜSER, 2011; REGINATO et al., 2012). Os principais fatores citados compreendem fatores externos e internos à crosta, dentre eles o clima, topografia, tipo de rocha, presença de estruturas tectônicas (lineamentos estruturais) e estruturas intraderrames (fraturas de resfriamento e alívio de pressão, bem como vesículas e amígdalas), espessura de solo, vegetação e hidrografia.

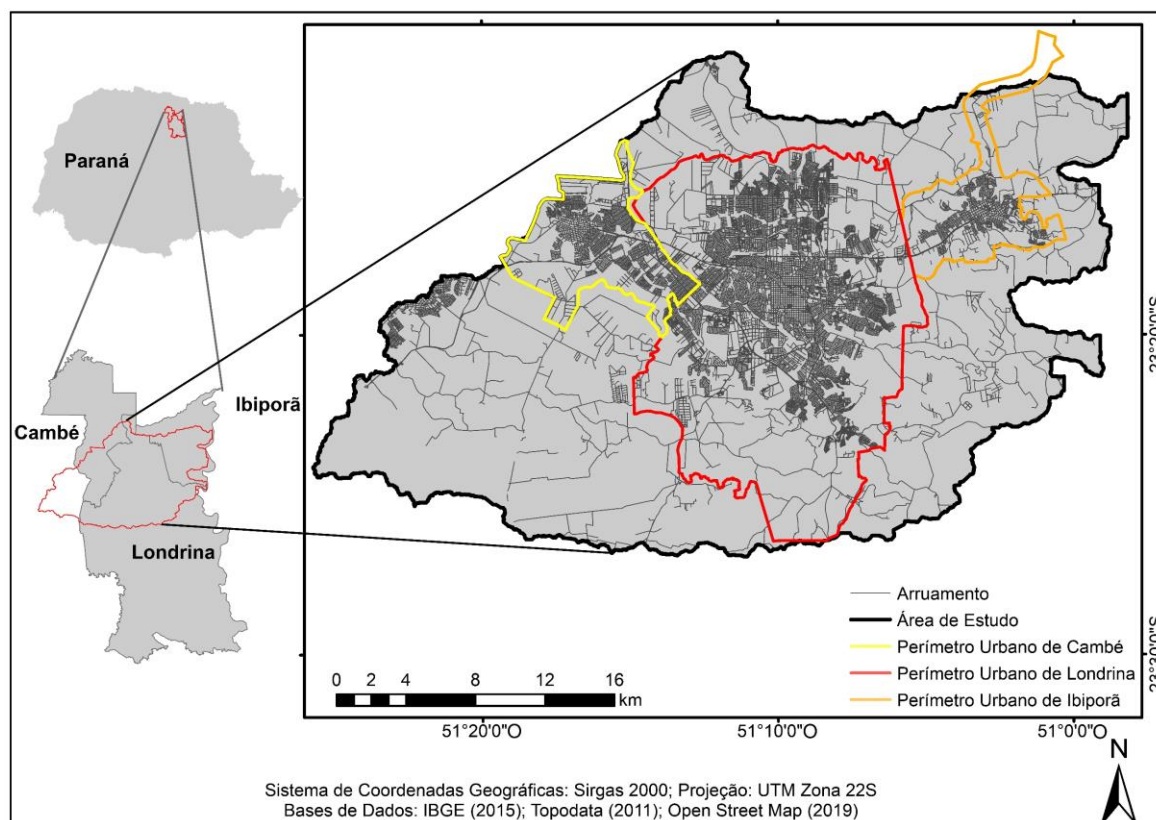
Além disto, trabalhos como o de Celligoi e Duarte (1997) e Peterlini (2017) demonstram a influência que alguns destes fatores exercem sobre a produtividade hídrica do SASG para a região de Londrina. Contudo, fatores importantes como a quantidade e tipo de estruturas intraderrames e espessura de solo, considerados por Costa e Silva (2000) como de elevada influência para a produtividade hídrica, ainda não foram avaliados.

Considerando estes fatos, o objetivo do presente trabalho é analisar a influência que as estruturas intraderrames e a espessura de solo exercem sobre a vazão e capacidade específica de poços tubulares que exploram o SASG nos municípios de Londrina, Cambé e Ibiporã, para melhor compreender a contribuição destes fatores para o aumento da produtividade hídrica do aquífero, a fim de que isto auxilie o desenvolvimento de métodos de predição de áreas de maior produtividade hídrica na região.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho compreende as bacias hidrográficas que estão, parte ou integralmente, inseridas nos perímetros urbanos dos municípios de Cambé, Londrina e Ibiporã, localizada entre as coordenadas 23°11'07" e 23°26'58" de latitude sul e 51°25'47" e 50°58'10" de longitude oeste, como pode ser observado na Figura 1. A área foi assim escolhida por apresentar uma grande quantidade de poços tubulares profundos, que são perfurados principalmente em áreas mais urbanizadas, onde se concentra maior quantidade populacional e grande número de indústrias.

Figura 1 - Londrina (PR): Localização da Área de Estudo, 2019.



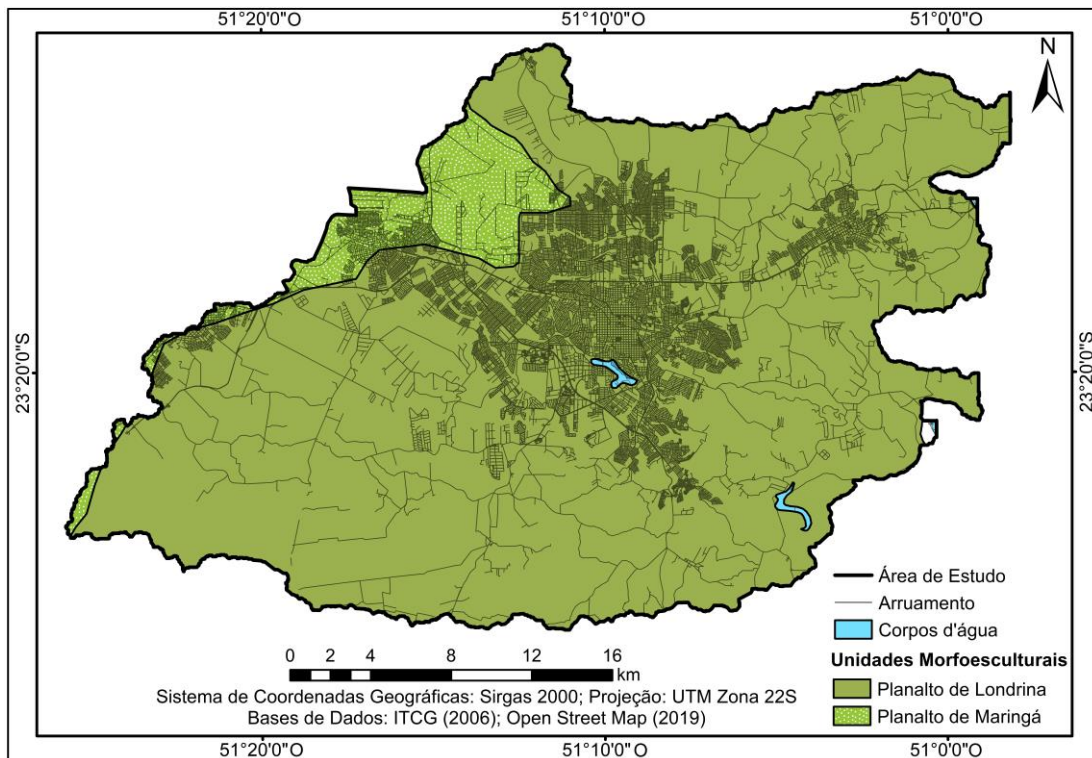
O clima na área é classificado, de acordo com a classificação de Köppen, como subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com “temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida” (IAP, 2003). Além disto, a precipitação anual para os municípios de Cambé e Ibiporã encontram-se na faixa de 1400 – 1600 mm, enquanto que para o município de Londrina, os valores variam de 1600 – 1800 mm ao ano (IAPAR, 2019a; IAPAR, 2019b).

A área de estudo localiza-se no compartimento Mesozoico da Bacia Sedimentar do Paraná e suas rochas pertencem ao Grupo São Bento, representado pela Formação Serra Geral, composta por rochas ígneas, provenientes de uma série de extensos derrames basálticos de idade jurássico-cretácea. São rochas efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços, vesiculares, amigdalóides, afaníticos, cinzentos a pretos (REBOUÇAS e FRAGA, 1988; MINEROPAR, 2003). Há também a presença de falhas e/ou fraturas, chamadas lineamentos estruturais, com sentidos predominantes NE-SW e NW-SE, além da existência de um grupo importante de lineamentos com orientação E-W (ZÁLAN et al., 1987; MINEROPAR, 2001; LONDRINA, 2010).

Estes lineamentos permitem o armazenamento e circulação da água subterrânea nas rochas desta região, constituindo uma importante unidade hidrogeológica do tipo fraturada, o SASG. Além disto, a estrutura dos derrames, conforme ocorrido o movimento, resfriamento e conteúdo dos gases de lava, originou camadas caracterizadas por uma zona basal, uma zona intermediária e uma zona de topo vesicular ou amigdaloidal (ROSA FILHO et al., 2006). Existem ainda, segundo dados do Instituto das Águas do Paraná (2017), cerca de 230 poços tubulares que exploram o SASG na área de estudo.

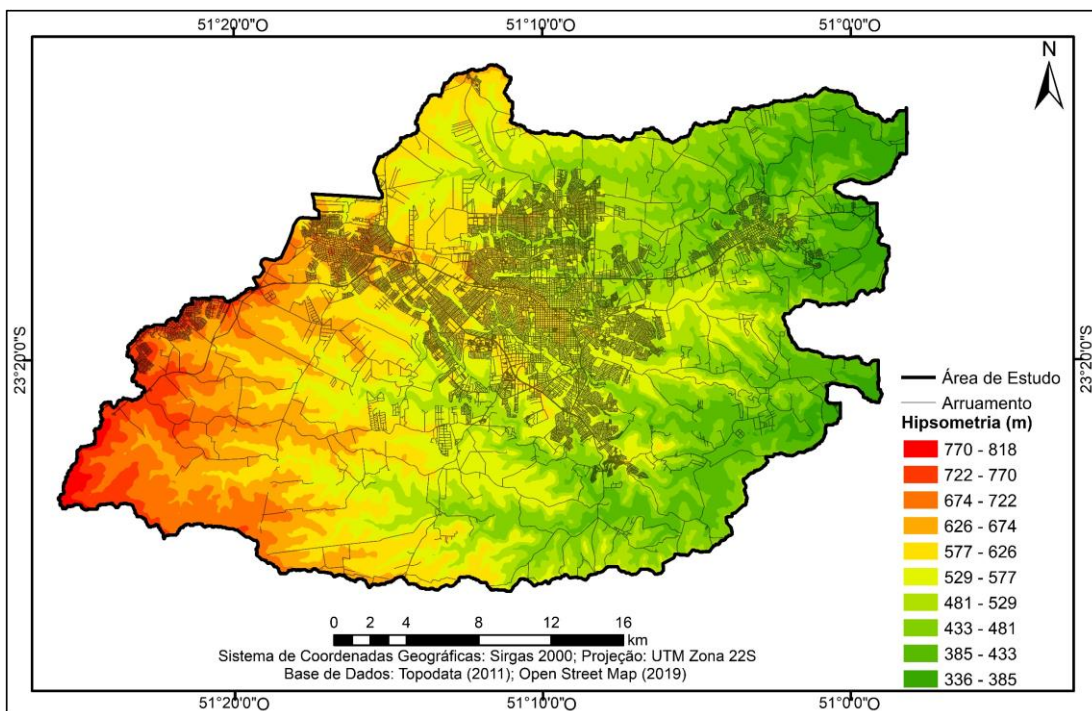
Quanto à geomorfologia, a unidade morfoestrutural é a Bacia Sedimentar do Paraná, enquanto que a unidade morfoescultural é a do Terceiro Planalto Paranaense. Os Planaltos de Londrina e Maringá são as subunidades morfoesculturais observadas (Figura 2), apresentando um relevo com dissecação de média (no Planalto de Londrina) a baixa (no Planalto de Maringá), com topos alongados e aplainados, vertentes convexas e vales em V (MINEROPAR, 2001; ARCHELA, FRANÇA; CELLIGOI, 2003; MINEROPAR, 2006).

Figura 2 - Londrina (PR): Mapa geomorfológico da área de estudo, 2020.



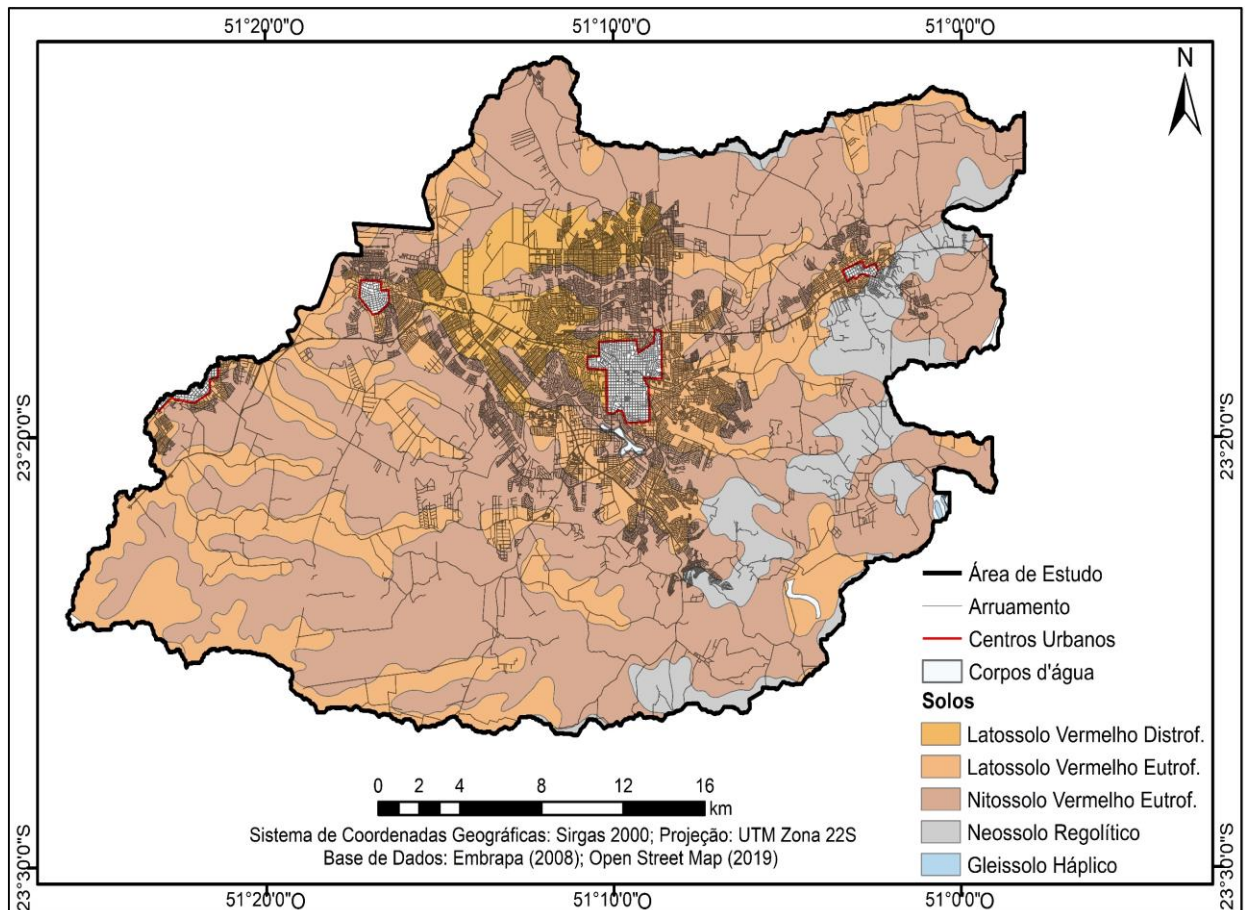
As altitudes variam de 336 a 818 metros, com áreas mais altas na porção oeste, que decrescem em direção à porção leste (Figura 3). Há predomínio de declividades $\leq 12\%$ no centro e em direção à oeste da área, característica de um relevo suavemente ondulado, e $>12\%$ em toda a direção leste e sul, onde há predomínio de relevos ondulados a fortemente ondulados.

Figura 3 - Londrina (PR): Mapa hipsométrico da área de estudo, 2019.



Nas áreas de relevo plano ou suave ondulado, se desenvolveram Latossolos Vermelhos que podem ser eutroféricos ou distroféricos (Figura 4). São solos argilosos, homogêneos, profundos, porosos ou muito porosos (IBGE, 2007; EMBRAPA, 2008). Já as regiões de relevo suave ondulado a ondulado apresentam Nitossolos Vermelhos Eutroféricos que são fortemente desenvolvidos, possuem textura argilosa, homogênea e pouca diferença de coloração entre os horizontes (IBGE, 2007); (IAC, 2014).

Figura 4 - Londrina (PR): Mapa pedológico da área de estudo, 2019.

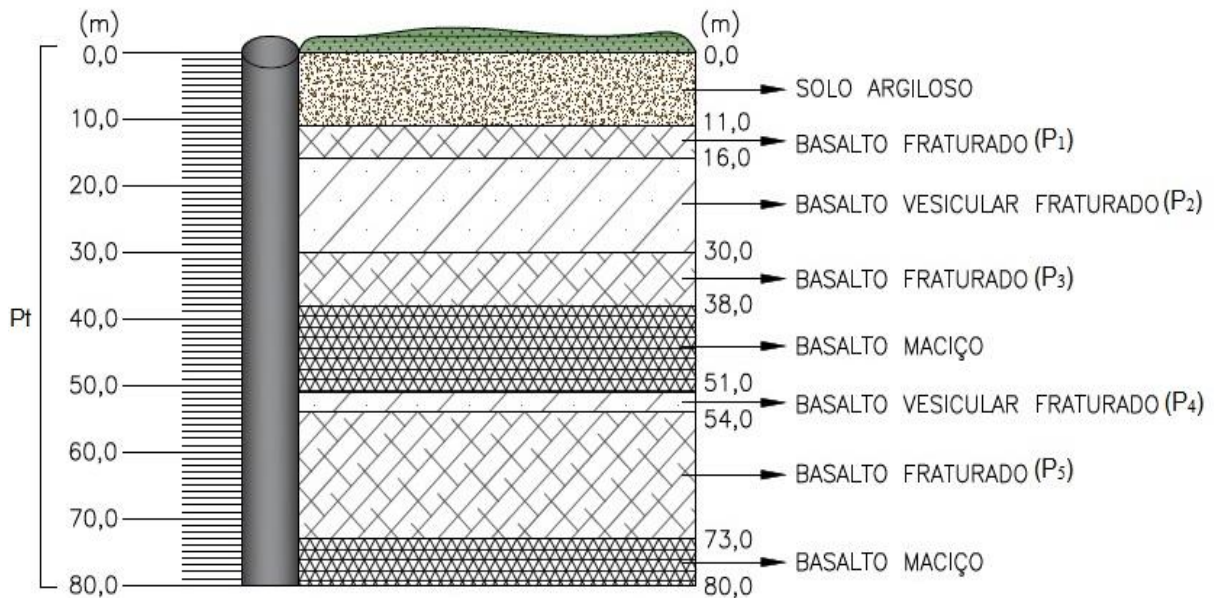


Nas áreas de relevos mais acidentados encontram-se os Neossolos Regolíticos Eutróficos, que apresentam uma textura argilosa, são rasos e pedregosos (EMBRAPA, 2008) e, junto à calha do rio Tibagi, áreas mais baixas e de planícies aluviais, desenvolveram-se os Gleissolos Hápticos, que de forma geral, são formados por sedimentos recentes, apresentam cores cinzentas a pretas no horizonte superficial, são rasos e com médios a altos teores de carbono orgânico (SANTOS e ZARONI, 2019).

OBTENÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Para avaliação da quantidade de estruturas do embasamento rochoso, bem como das espessuras de solo, foram obtidos junto ao Instituto das Águas do Paraná os dados de 60 poços tubulares presentes na área. Foram observados os perfis geológicos de cada poço, que indicam os intervalos de perfuração e características pedológicas e geológicas locais, como a espessura de solo e a presença de vesículas, amígdalas e fraturas no basalto. Na Figura 5 está representado um exemplo do perfil geológico de um poço tubular.

Figura 5 - Londrina (PR): Exemplo de um perfil geológico de poço tubular, 2019.



Neste sentido, para o estudo das estruturas, foi feita a somatória das espessuras de rocha que apresentavam vesículas, amígdalas e fraturas (P_i , onde $i = 1, 2, \dots, n$) e posteriormente, considerando a profundidade total do poço (P_t), foi calculada a porcentagem de estruturas (%e) presentes no perfil utilizando a Equação 1:

$$\%e = \frac{(\sum P_i) \cdot 100}{P_t} \quad \text{Equação 1}$$

Quanto à espessura de solo, na descrição do perfil geológico já consta esta exata informação, evitando a necessidade de cálculos.

Foram obtidos ainda dados de vazão (Q), nível estático (NE) e nível dinâmico (ND) dos poços, para posterior cálculo da capacidade específica. A capacidade específica pode ser considerada, segundo Neves (2005) e Celligoi (1993), como o parâmetro que melhor representa a produtividade de poços tubulares. De acordo com o CPRM (1998), para o cálculo da capacidade específica (c) inicialmente deve-se calcular os valores de rebaixamento (s) dos poços, definido como a diferença entre nível dinâmico e estático ($NE - ND$) e, posteriormente, calcula-se a razão entre a vazão (Q) e o rebaixamento (Equação 2).

$$c = \frac{Q}{s} \quad \text{Equação 2}$$

ANÁLISES DE CORRELAÇÃO

De posse dos dados de estruturas, espessura de solo, vazão e capacidade específica, foi realizada a estatística descritiva destes parâmetros e, posteriormente, realizadas análises de correlação. O grau de correlação linear simples existente entre duas variáveis pode ser obtido por meio do coeficiente linear de Pearson (r), que pode variar de -1 a 1. Quando os valores de r se aproximam destes valores máximos, isso indica que a correlação linear é forte, enquanto que quando se aproximam de zero, a correlação é fraca ou mesmo nula. Gouvêa e Wendland (2011) explicam que quando a correlação é positiva, os valores mais altos de uma das variáveis estão associados aos valores mais altos da outra variável e, quando a correlação é negativa, os valores mais altos de uma variável estão relacionados aos valores mais baixos da outra variável.

Para auxiliar na compreensão de como o tipo de estrutura influencia a produtividade aquífera, foram criados três grupos de poços em que, o primeiro grupo apresentava poços que possuíam apenas estruturas do tipo vesicular/amigdaloidal (EVA), o segundo grupo era formado por poços que

apresentavam apenas estruturas do tipo fraturas (EF) e o terceiro grupo era composto por todos os poços que apresentavam estruturas vesicular/amigdaloidal e fraturas em um mesmo perfil geológico (EVAF). Para cada poço foram obtidos os valores de vazão e capacidade específicas e calculadas a média, mediana e o coeficiente r . Quanto à espessura de solo, não foi necessária sua separação por grupos.

Para avaliar como a quantidade de estruturas intraderrames e a espessura de solo influenciam na vazão e capacidade específica dos poços – que é dependente da vazão, bem como dos níveis estático e dinâmico – foram aplicadas técnicas estatísticas de análise multivariada de dados, visto que, somente técnicas de estatística multivariada permitem que seja observado o comportamento conjunto das variáveis e que se determine a influência ou importância de cada uma, enquanto as demais estão presentes (CORRAR; PAULO; DIAS FILHO, 2012).

Desta forma, foi aplicada a Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e a Análise Discriminante Canônica (ADC). A MANOVA, segundo Hair et al. (2009) bem como Corrar; Paulo; Dias Filho (2012), é uma técnica de análise de dependência que mede as diferenças entre duas ou mais variáveis dependentes métricas, quando estas podem ser separadas por um conjunto de variáveis categóricas (grupos), sendo estas últimas consideradas como variáveis independentes. Segundo Hair et al. (2009), a MANOVA busca identificar diferenças existentes entre grupos em múltiplas variáveis simultaneamente, ou seja, cada grupo (variável independente) é observado em duas ou mais variáveis dependentes.

Além disto, a MANOVA pode ser uma técnica útil quando se manipula uma ou mais variáveis independentes para determinar o seu efeito sobre as variáveis dependentes, já que ela tem o objetivo de analisar a relação de dependência representada pelas diferenças do conjunto de medidas dependentes ao longo de uma série de grupos (HAIR et al., 2009). Neste sentido, a MANOVA foi aplicada para observar a relação de dependência existente entre a vazão e a capacidade específica dos poços (variáveis dependentes) com o aumento da quantidade de estruturas intraderrames e da espessura de solo (variáveis independentes).

Para observar qual a variável causou a maior diferença entre os grupos e que, conseqüentemente, apresenta dependência, foram observados os valores de:

Nível de significância (p): associado ao teste estatístico das diferenças entre dois ou mais grupos, em que são comumente adotados valores de $p < 0,05$, que levam à rejeição da hipótese nula e aceitação da hipótese alternativa de que as médias das populações não são iguais (HAIR et al., 2009)

Critério de máxima verossimilhança (*Lambda Wilks*): utilizado para testar a hipótese nula da MANOVA. Varia de 0 (a diferença entre os grupos é máxima) a 1 (a diferença entre os grupos é mínima ou mesmo nula);

Estatística F: é a razão entre a estimativa de variância entre grupos e a estimativa de variância dentro de grupos. Também é utilizada para rejeitar a hipótese nula de que as médias dos grupos são iguais. Portanto, grandes valores de F indicam que há diferenças entre os grupos (HAIR et al.; 2009)

Já a ADC, como explica Corrar; Paulo; Dias Filho (2012) é definida como uma técnica estatística multivariada que auxilia na identificação de quais variáveis conseguem diferenciar cada grupo que foi definido a *priori* e quantas destas variáveis analisadas são necessárias para que se obtenha uma melhor classificação dos dados, fazendo com que a ADC funcione como uma maneira de se confirmarem os achados da MANOVA. Portanto, segundo os autores, o principal objetivo da ADC é entender as diferenças existentes entre os grupos para prever a qual classe ou grupo um indivíduo ou objeto pertence.

Desta forma, utilizou-se da ADC para identificar como as variáveis indicadoras de produtividade hídrica influenciam na segregação dos grupos definidos, bem como observar como os dados se comportam de acordo com a classificação da quantidade de estruturas intraderrames e espessura de solo (grupos) estabelecidas a *priori*. Para tanto, foi plotado o gráfico de dispersão dos scores canônicos gerados pelas funções discriminantes e observada a separação dos grupos.

Os dados de estruturas foram então divididos em 5 grupos de acordo com a sua quantidade em porcentagem: 0% a 5%, 5% a 10%, 10% a 30%, 30% a 50% e >50%, a fim de que fosse testada a hipótese de que há diferenças significativas entre os grupos, indicando que quanto maior a quantidade de estruturas, maior a produtividade. Quanto a espessura de solo, esta também foi

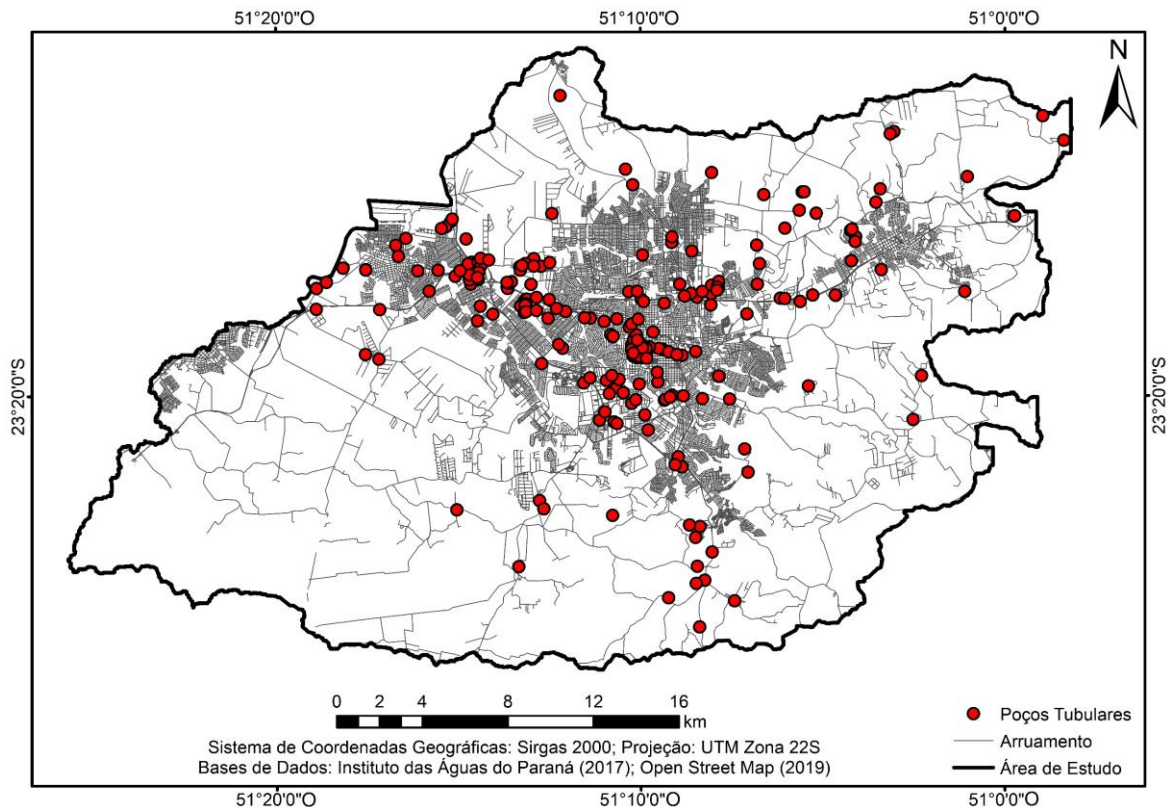
dividida em 5 grupos, sendo eles: 0 a 6 m, 6 a 12 m, 12 a 18 m, 18 a 24 m e >24 m para observar se a produtividade hídrica é diretamente proporcional ao aumento da espessura de solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estatística Descritiva dos Dados

De acordo com os dados obtidos junto ao Instituto das Águas do Paraná (2017), estão presentes na área de estudo cerca de 230 poços tubulares (Figura 6).

Figura 6 - Londrina (PR) - Localização dos poços tubulares profundos presentes na área de estudo, 2019.



Entretanto, apenas 60 poços puderam ser utilizados, visto que a grande maioria não possuía informações de litologia, vazão ou níveis estático e dinâmico, o que impossibilita o cálculo da capacidade específica, quantidade de estruturas e espessura de solo. Neste sentido, após a obtenção dos dados mencionados, foram obtidos os resultados da análise estatística descritiva, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Londrina (PR): Estatística Descritiva dos dados de poços utilizados, 2019.

	Estruturas (%)	Espessura de Solo (m)	Vazão (m ³ /h)	Capacidade Específica (m ³ /h.m)
Mínimo	1,8	0	2,0	0,027
Máximo	79,3	36,0	178,0	20,4
Média	31,8	11,4	22,6	1,9
Mediana	24,1	11,0	9,3	0,6
Desvio Padrão	22,4	7,5	31,9	3,2

Por meio dos resultados apresentados é possível observar que a porcentagem de estruturas varia de 1,8 a 79,3%, com valor médio em torno de 31,8%, mediana de 24,1% e desvio padrão de 22,4%. Estes valores indicam que a quantidade de estruturas para a área de estudo é média e pode colaborar de forma significativa com a produtividade hídrica.

Quando observados os valores de vazão, estes apresentam uma grande variação, visto que possuem um valor mínimo de 2,0 m³/h e máximo de 178,0 m³/h, com uma média de 22,6 m³/h e mediana de 9,3 m³/h. Esta grande diferença entre a média e a mediana, bem como o alto desvio padrão (31,9 m³/h), indicam que as vazões são, em sua maioria baixas, o que pode ser observado também pelos valores de média (1,9 m³/h.m) e mediana (0,6 m³/h.m) de capacidade específica.

Já a espessura de solo apresentou valores que variam de 0 m a 36 m de profundidade, com média de 11,5 m e mediana de 11,0 m, o que demonstra solos profundos, característica dos solos que são encontrados na região, que compreendem principalmente Latossolos e Nitossolos. Estes tipos de solos possuem grandes profundidades graças ao clima úmido, onde há predomínio do intemperismo químico. Foram observados os valores de diâmetro dos poços tubulares. Todos os poços que apresentavam esta informação (54 poços) possuem diâmetro de 6". O método utilizado para a perfuração dos poços na área de estudo foi observado junto aos dados do Instituto das Águas. A maioria dos poços (31 poços; 51,67%) não apresentam esta informação, enquanto que 21 poços (35%) foram perfurados utilizando o método rotopneumático e 8 poços (13,33%) foram perfurados utilizando o método de percussão. Os poços perfurados pelo método de percussão são poços mais antigos, enquanto poços mais recentes foram perfurados utilizando o método rotopneumático.

Influência das Estruturas Intraderrames na Produtividade Hídrica

Após separação dos grupos de estruturas e seus respectivos valores de vazão e capacidade específica, foi realizada a estatística descritiva para os três grupos e posteriormente calculado o coeficiente de correlação (*r*), apresentados na Tabela 2. Os gráficos de dispersão gerados para cada grupo de estruturas são apresentados na Figura 7.

Tabela 2 - Londrina (PR): Estatística descritiva e correlação existente entre o tipo de estrutura intraderrame e a produtividade hídrica, 2019.

	EVA		EF		EVAF	
	n = 19		n = 9		n = 32	
	Q	c	Q	c	Q	c
	(m ³ /h)	(m ³ /h.m)	(m ³ /h)	(m ³ /h.m)	(m ³ /h)	(m ³ /h.m)
Mínimo	2,0	0,027	2,4	0,056	3,0	0,054
Máximo	110,0	8,27	28,0	3,67	178,0	20,40
Média	15,18	1,24	9,86	0,83	30,7	2,58
Mediana	5,0	0,31	8,5	0,42	15,25	1,51
Variância	701,07	5,03	74,56	1,27	1370,74	15,09
Desvio Padrão	26,47	2,24	8,63	1,12	37,02	3,88
Coeficiente <i>r</i>	-0,12	-0,16	-0,15	-0,16	0,51	-0,14

n = número de poços pertencentes ao respectivo grupo.

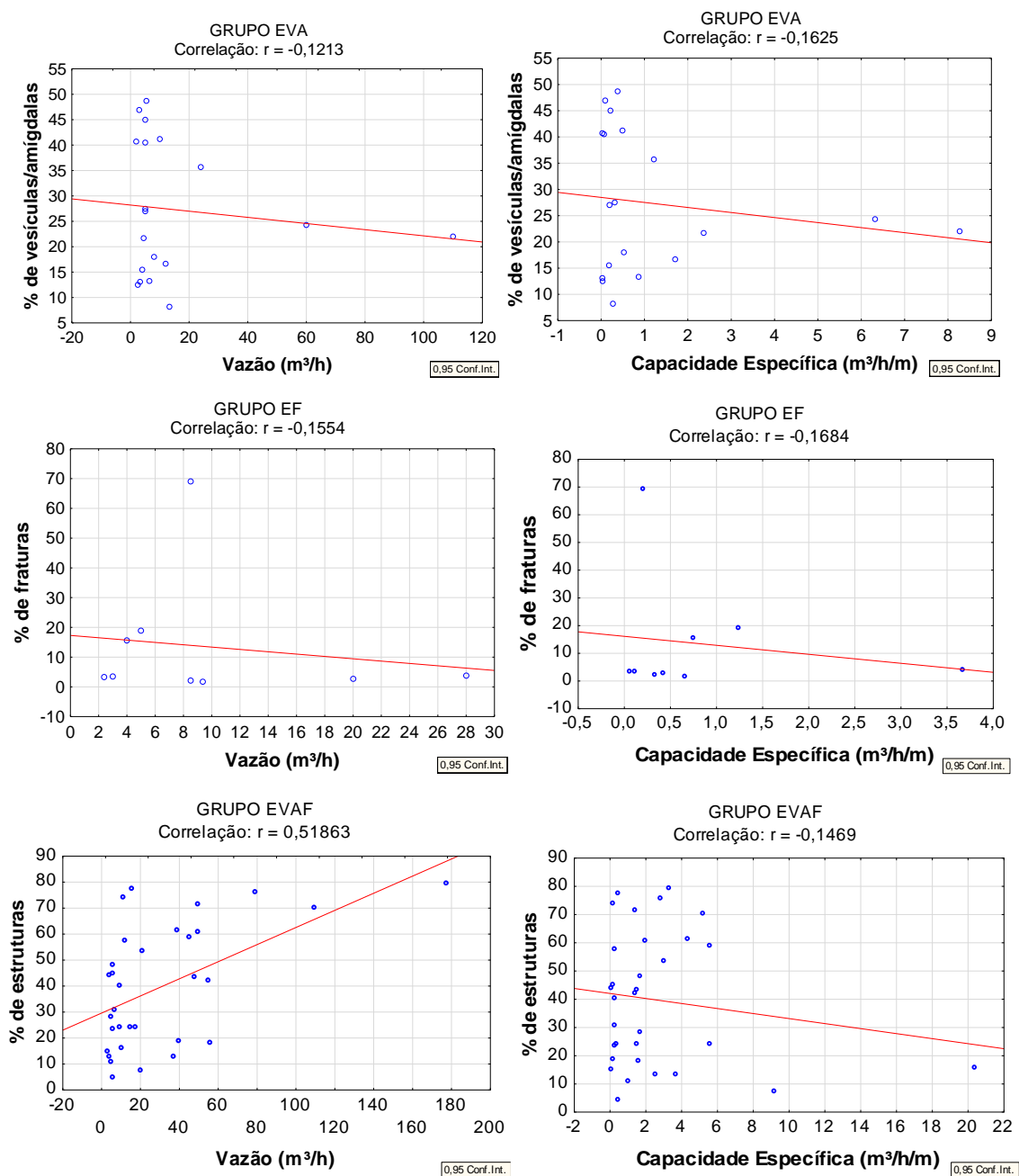
Como pode ser observado na Tabela 2, os valores mínimos de vazão foram semelhantes para todos os grupos, enquanto que os valores de máximo apresentaram maior diferença, com destaque para o valor máximo de vazão (178,0 m³/h) e capacidade específica (20,4 m³/h.m) do grupo EVAF. Este grupo também apresentou uma média de vazão (30,7 m³/h) e capacidade específica (2,58 m³/h.m) cerca de duas vezes maior que o grupo EVA (Q = 15,18 m³/h; c = 1,24 m³/h.m) e três vezes maior que o grupo EF (Q = 9,86 m³/h; c = 0,83 m³/h.m).

Quanto aos valores medianos de vazão, pode-se observar que, com exceção do grupo EF, este valor se mostrou cerca de três vezes inferior à média no grupo EVA (5,0 m³/h) e duas vezes inferior à

média no grupo EVAF (15,25 m³/h). Esta diferença, principalmente no grupo EVA, pode ter ocorrido devido à grande maioria dos poços pertencentes a este grupo apresentarem vazões e capacidades específicas baixas ($Q < 10$ m³/h; $c < 1$ m³/h.m), enquanto que poucos poços possuem vazões e capacidades específicas excepcionais, elevando o valor da média. Os altos valores de variância e desvio padrão para este grupo corroboram com este fato.

Já os valores do grupo EF, apesar de apresentarem médias menores que os demais grupos, apresentaram mediana de vazão (8,5 m³/h) e capacidade específica (0,42 m³/h/m) maiores que o grupo EVA, além de possuírem os valores mais baixos de variância e desvio padrão, o que indica que os poços deste grupo possuem valores de produtividade mais semelhantes entre si. Isto pode representar que as estruturas do tipo fraturas podem contribuir de forma mais significativa para a produtividade hídrica dos poços se comparado às estruturas do tipo vesicular/amigdaloidal.

Figura 7 - Londrina (PR): Gráficos de dispersão dos grupos de estruturas com os indicadores de produtividade hídrica, 2019.



Entretanto, ao observar os gráficos de dispersão gerados para cada grupo de estruturas e os valores de correlação linear, fica evidenciado que a correlação da quantidade de estruturas com a vazão e capacidade específica dos poços é praticamente desprezível para os grupos EVA ($r_Q = -0,12$; $r_c = -0,16$) e EF ($r_Q = -0,15$ e $r_c = -0,16$), ou seja, quando as estruturas são analisadas isoladamente, as mesmas não contribuem significativamente para o aumento da produtividade hídrica dos poços.

Além disto, os gráficos de dispersão e os valores de r para estes grupos demonstram que a correlação é negativa, ou seja, quanto maior a quantidade de vesículas/amígdalas ou fraturas no perfil geológico, menor é a vazão e capacidade específica do poço. Este fato pode ser explicado principalmente porque quando há apenas estruturas do tipo vesicular/amigdaloidal, a água não consegue circular pelo perfil geológico de forma efetiva e alcançar estas estruturas, visto que não há presença de fraturas verticais, responsáveis por fazer a interconexão com as estruturas vesiculares.

Portanto, a água que fica armazenada nestas estruturas, além de não possuir volume elevado, não circula, fazendo com que ocorram os chamados “bolsões de água”, ou seja, no momento em que são encontrados os bolsões na perfuração do poço, a vazão bombeada pode ser considerada suficiente, porém, com o passar dos dias, além de não apresentar estabilização, a mesma pode ter considerável redução ou até mesmo se esgotar, levando a prejuízos financeiros na exploração aquífera, visto que aquela não representava a vazão efetiva do poço.

A correlação muito baixa, observada também entre o grupo EF e a produtividade hídrica, pode ter apresentado estes resultados porque as fraturas consideradas na análise compreendem, em sua maioria, fraturas de cisalhamento ou até mesmo juntas de resfriamento, ou seja, fraturas que ocorreram devido à consolidação do magma na superfície e que, de acordo com Costa e Silva (2000) são praticamente soldadas, já que não apresentam aberturas consideráveis por não terem sido geradas por movimentos tracionais, representando assim estruturas desfavoráveis à infiltração, armazenamento e circulação da água subterrânea.

O único grupo que apresentou um valor de correlação significativo, ou seja, uma correlação moderada entre a quantidade de estruturas e a vazão, foi o grupo EVAF, com valor de $r = 0,51$. A correlação positiva indica que, ao analisar as estruturas de forma conjunta, ou seja, com a presença de estruturas vesiculares/amigdaloidais e fraturas, o aumento da quantidade destas estruturas contribui de forma significativa para o aumento da vazão dos poços. Contudo, o valor de correlação para a capacidade específica foi desprezível ($r = -0,14$), o que demonstra que a esta pode não ser influenciada pelo tipo de estrutura intraderrame.

Como a capacidade específica é calculada a partir da vazão, foi então realizada a MANOVA e ADC para observar se, quando analisadas conjuntamente, a vazão e a capacidade específica apresentavam alguma relação de dependência com a quantidade de estruturas intraderrames, independentemente do tipo de estrutura. Para tanto, foram incluídos na análise todos os 60 poços. Os resultados estão apresentados na Tabela 3. Considerando conjuntamente os dados de quantidade de estruturas, vazão e capacidade específica, a MANOVA detectou diferença significativa entre os grupos analisados ($F = 2,53$; $p < 0,0144$).

Tabela 3 - Londrina (PR): Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC) aplicada aos grupos de Estruturas Intraderrames, 2019.

Nº de variáveis no modelo: 2; Agrupamento: Estruturas (5 grupos)						
<i>Lambda Wilks'</i> : 0,70890; $F(8,108) = 2,5340$ $p < 0,0144$						
n = 60	<i>Lambda Wilks'</i>	<i>Lambda Parcial</i>	F	p	Eixo Canônico 1	Eixo Canônico 2
Vazão	0,90	0,78	3,62	0,011	-1,03	0,19
Capacidade Específica	0,78	0,90	1,46	0,22	0,13	-1,04

n = número de poços utilizados na análise.

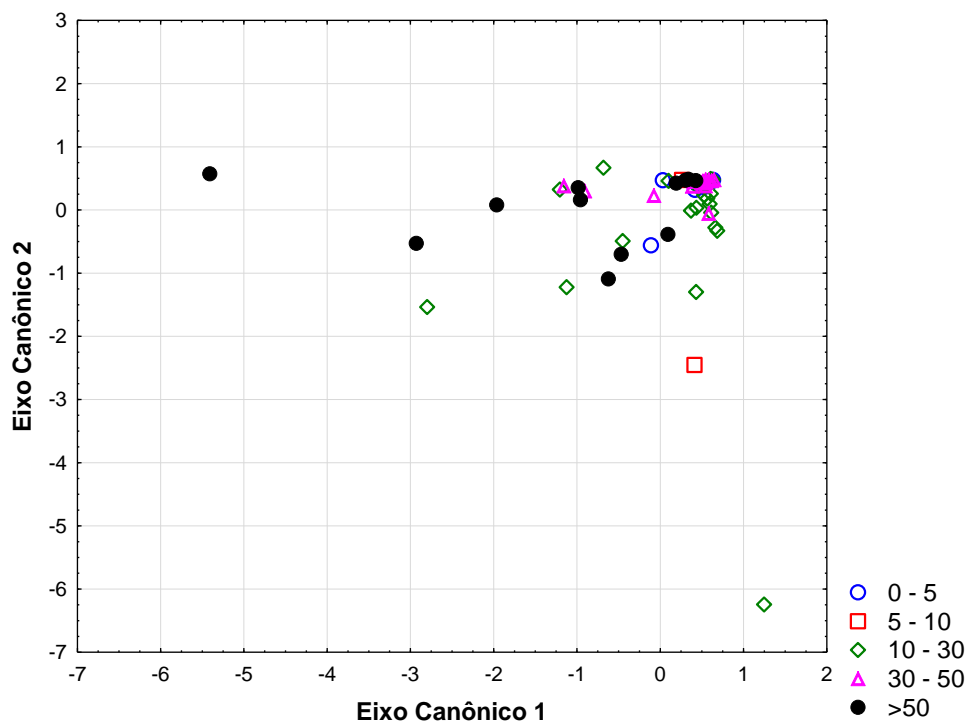
Com os dados da MANOVA foi possível confirmar a hipótese de que a quantidade de estruturas exerce uma influência sobre a produtividade hídrica pois, ainda que sutil (*Lambda Wilks* = 0,70; quanto mais próximo a 1, menor a diferença entre grupos), houve uma segregação nos grupos

definidos a priori. Entretanto, a única variável que se mostrou significativa para a segregação destes grupos foi a vazão, com um valor de $\Lambda Wilks = 0,90$, $F = 3,62$ e $p = 0,011$. A capacidade específica não contribuiu significativamente para a diferenciação entre os grupos, visto que o seu valor de p foi superior a 0,05, o que corrobora com os resultados encontrados nas análises de correlação.

A partir dos resultados da MANOVA foi possível aplicar a ADC para observar como a variável de produtividade analisada – mais precisamente a vazão – influenciou o distanciamento dos grupos de quantidade de estruturas estabelecidos. Os coeficientes das variáveis que mais explicam os eixos canônicos 1 e 2 originados da ADC estão apresentados na Tabela 3, enquanto que o gráfico de dispersão dos valores canônicos está apresentado na Figura 8.

Como pode ser observado na Tabela 3, a vazão (que tem score negativo no eixo canônico 1) explica o comportamento dos grupos no sentido negativo do eixo canônico 1 (E1). Por outro lado, a capacidade específica (com score positivo) explica o sentido positivo do E1. O fato de a vazão possuir o maior score no E1 demonstra que ela é a variável que é mais influenciada pelas estruturas intraderrames.

Figura 8 - Londrina (PR): Análise Discriminante Canônica entre os grupos de quantidade de estruturas intraderrames e as variáveis indicadoras de produtividade hídrica, 2019.



Ao observar o gráfico de dispersão (Figura 5), constata-se que o grupo com maior quantidade de estruturas (Grupo 5, > 50%) apresenta um maior distanciamento dos demais grupos, seguido pelo grupo 3 (10 a 30%), bem como do grupo 4 (30 a 50%), o que indica que quanto maior é a quantidade de estruturas intraderrames, maior é vazão que o poço pode apresentar. Os grupos 1 (0 a 5%) e 2 (5 a 10%) ainda que tenham menor quantidade de poços, se apresentaram pouco segregados pela ADC e mais concentrados do lado positivo do E1, o que corrobora com a afirmação de que vazão é diretamente proporcional à quantidade de estruturas intraderrames.

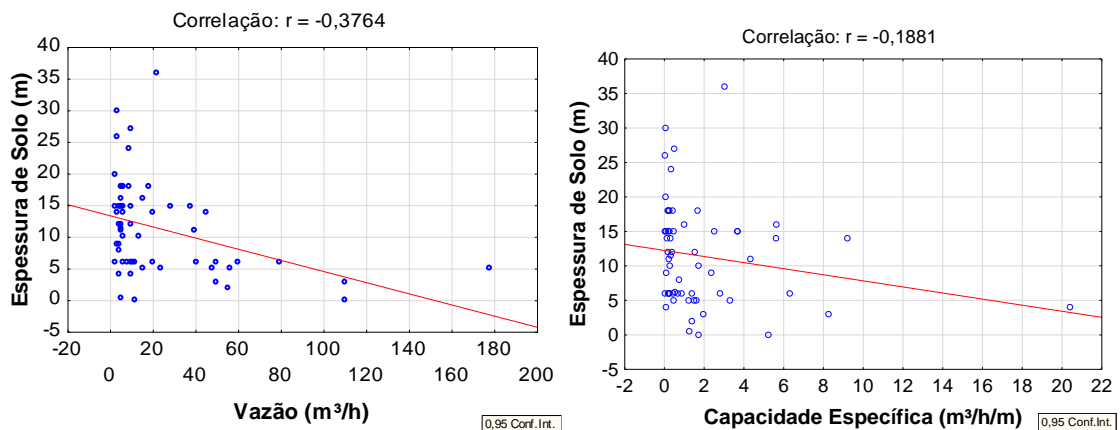
Quanto à capacidade específica, fica evidenciado pelo gráfico de dispersão que não houve segregação dos grupos no sentido positivo do E1, visto que os poços se apresentaram concentrados neste lado do eixo, resultado que já era esperado se considerado os valores encontrados pela MANOVA. Portanto, a capacidade específica não é influenciada pela quantidade de estruturas intraderrames.

O fato de apenas uma das variáveis indicadoras de produtividade hídrica (vazão) ter sido influenciada pela quantidade de estruturas, contrariando a hipótese de que a capacidade específica também seria influenciada, pode ser explicada pelo fato de que muitas vezes os testes de vazão realizados durante a perfuração do poço não medem a vazão máxima que pode ser explorada – que é obtida por meio de testes de aquífero – mas sim a vazão de operação do poço, que é obtida por testes de produção, o que pode subestimar os valores de vazão, influenciando a capacidade específica. Apesar disto, a vazão obtida por meios destes testes pode ser um bom indicativo das características do sistema aquífero.

Influência da Espessura de Solo na Produtividade Hídrica

Após estatística descritiva dos dados dos 60 poços presentes na área, foram determinados os coeficientes de correlação linear entre as variáveis indicadoras de produtividade e a espessura de solo e, posteriormente, gerados os gráficos de dispersão, apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Londrina (PR): Gráficos de dispersão dos dados de Espessura de Solo com os indicadores de produtividade hídrica, 2019.



Como pode-se observar nos gráficos de dispersão, os poços concentram-se, em sua maioria, nos baixos valores de vazão e capacidade específica e variam muito quanto à espessura de solo. Isto faz com que a linha de tendência assuma um ângulo de inclinação menor, com sentido negativo, indicando que quanto maior a espessura de solo, menor é a vazão e capacidade específica dos poços. Contudo, esta relação, de acordo com o coeficiente r calculado, é considerada baixa para a vazão (-0,37) e muito baixa para a capacidade específica (-0,18).

Holland e Witthüser (2011) também avaliaram a influência que a espessura do manto de intemperismo exerce sobre a produtividade hídrica, analisando mais precisamente a vazão, utilizando gráficos de dispersão e correlação linear e não encontraram correlação entre estas variáveis. Além disto, Douagui et al. (2019) buscaram avaliar a correlação entre a espessura de solo e a capacidade específica e não encontraram um valor de r significativo.

Estes resultados, são contrários ao que apontam Costa e Silva (2000), que afirmam que uma espessura considerável de solo exerce importante influência na produtividade hídrica, pois atua como uma fonte de captação da água precipitada, reduz perdas por escoamento superficial e minimiza o processo de evaporação, alimentando as rochas fraturadas subjacentes. Entretanto, em solos que apresentam uma grande espessura, o tempo no qual a água leva para percolar e atingir as fraturas das rochas também é maior, fazendo com que a recarga aquífera aconteça mais lentamente. Além disto, a água precipitada pode ficar retida nas camadas mais superficiais do solo, dificultando a recarga das fraturas.

Souza e Campos (2001), ao analisar o papel dos regolitos na recarga de aquíferos fissurais no Distrito Federal, apontam que apenas 14% da água precipitada consegue alcançar a zona saturada do solo naquela região, isso porque maior parte do volume precipitado inicialmente pode escoar como fluxo de base e abastecer os cursos d'água, para posteriormente infiltrar para a zona saturada do aquífero fraturado, fazendo com que apenas uma pequena porção dessa quantidade alcance as fraturas.

Assim como foi realizado para analisar a dependência entre a produtividade hídrica e as estruturas intraderrames, foi também aplicada a MANOVA e ADC para avaliar como a produtividade hídrica é influenciada pela espessura do solo, a fim de verificar se ambas as variáveis são significativas na segregação dos grupos definidos a priori ou se apenas a vazão apresenta significância estatística, assim como encontrado nos gráficos de dispersão. Os resultados da MANOVA e ADC para a espessura de solo são apresentados na Tabela 4.

Por meio da MANOVA foi possível constatar que há diferenças significativas entre os grupos analisados ($F = 2,07$; $p < 0,044$), confirmando a hipótese de que a produtividade hídrica é influenciada pela espessura de solo. Com os dados apresentados pode-se observar que, assim como na análise multivariada feita para as estruturas intraderrames, a segregação dos grupos de espessura de solo também não se mostrou muito expressiva, visto que o valor de *Lambda Wilks* (0,75) se encontra mais próximo a 1, segregação ainda menor do que a encontrada para a variável estruturas intraderrames. Isto indica que as estruturas possuem maior influência na produtividade hídrica do que a espessura de solo.

Tabela 4 - Londrina (PR): Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e Análise Discriminante Canônica (ADC) aplicada aos grupos de Espessura de Solo, 2019.

Nº de variáveis no modelo: 2; Agrupamento: Espessura (5 grupos)						
<i>Lambda Wilks</i> : 0,75103; $F(8,108) = 2,0778$ $p < 0,0441$						
n = 60	<i>Lambda Wilks</i> '	<i>Lambda Parcial</i>	F	p	Eixo Canônico 1	Eixo Canônico 2
Vazão	0,94	0,79	3,51	0,012	-0,95	0,39
Capacidade Específica	0,76	0,98	0,22	0,924	-0,14	-1,02

n = número de poços utilizados na análise.

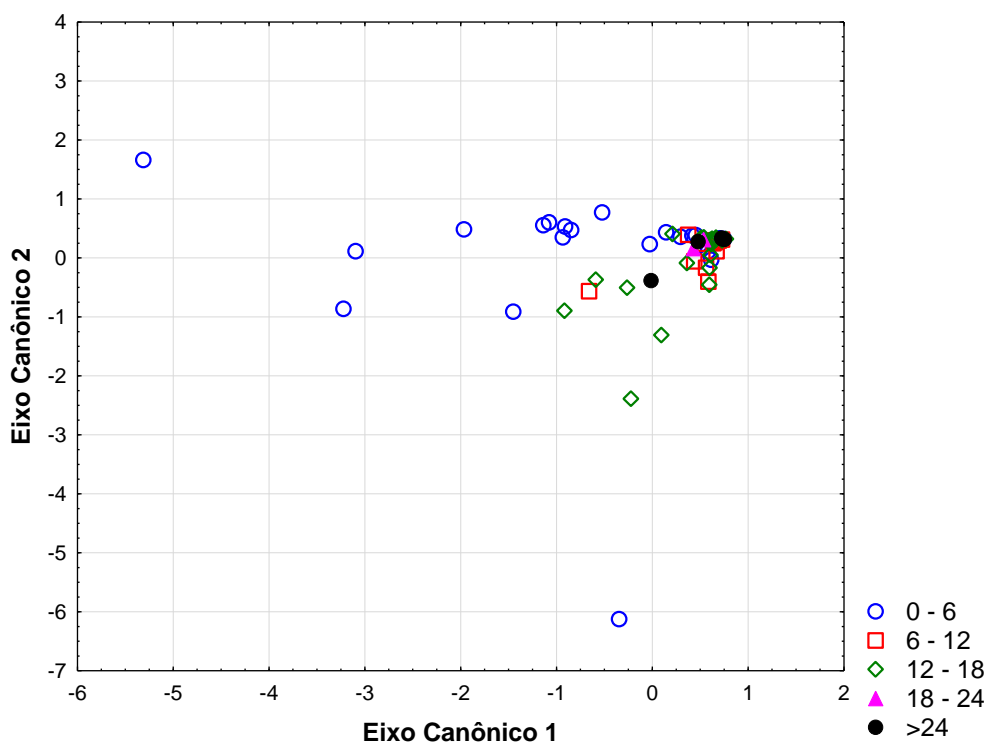
A variável que se mostrou significativa para a segregação destes grupos foi novamente a vazão, com um valor de *Lambda Wilks* = 0,94, $F = 3,51$ e $p = 0,012$, enquanto que a capacidade específica não contribuiu significativamente para a diferenciação entre os grupos de espessura de solo, visto que o valor de p foi superior ao limite de significância. Neste sentido, a MANOVA confirma os resultados encontrados nas análises de correlação linear.

Aplicando a ADC (Figura 10), é possível observar o comportamento das variáveis dependentes (vazão e capacidade específica) em relação ao aumento da espessura de solo e analisar o distanciamento dos grupos estabelecidos. Os coeficientes das variáveis que mais explicam os eixos canônicos 1 e 2 estão apresentados na Tabela 4.

Os valores dos coeficientes para o E1, por apresentarem um valor negativo, explicam melhor o sentido negativo do eixo 1 no gráfico de dispersão, com destaque para o valor da vazão (-0,95), que apresentou maior score, indicando que os grupos de espessura de solo são mais segregados por esta variável, seguida pela capacidade específica (-0,14). Entretanto, diferentemente dos resultados

encontrados na ADC para as estruturas intraderrames e das análises de correlação linear, a ADC demonstra que ambas as variáveis são influenciadas pela espessura de solo, e não apenas a vazão. Estes resultados podem ter sido diferentes devido à ADC considerar conjuntamente os dados de vazão e capacidade específica, e não analisá-los de forma isolada, como feito na Correlação Linear de Pearson.

Figura 10 - Londrina (PR): Análise Discriminante Canônica entre os grupos de espessura de solo e as variáveis indicadoras de produtividade hídrica, 2019.

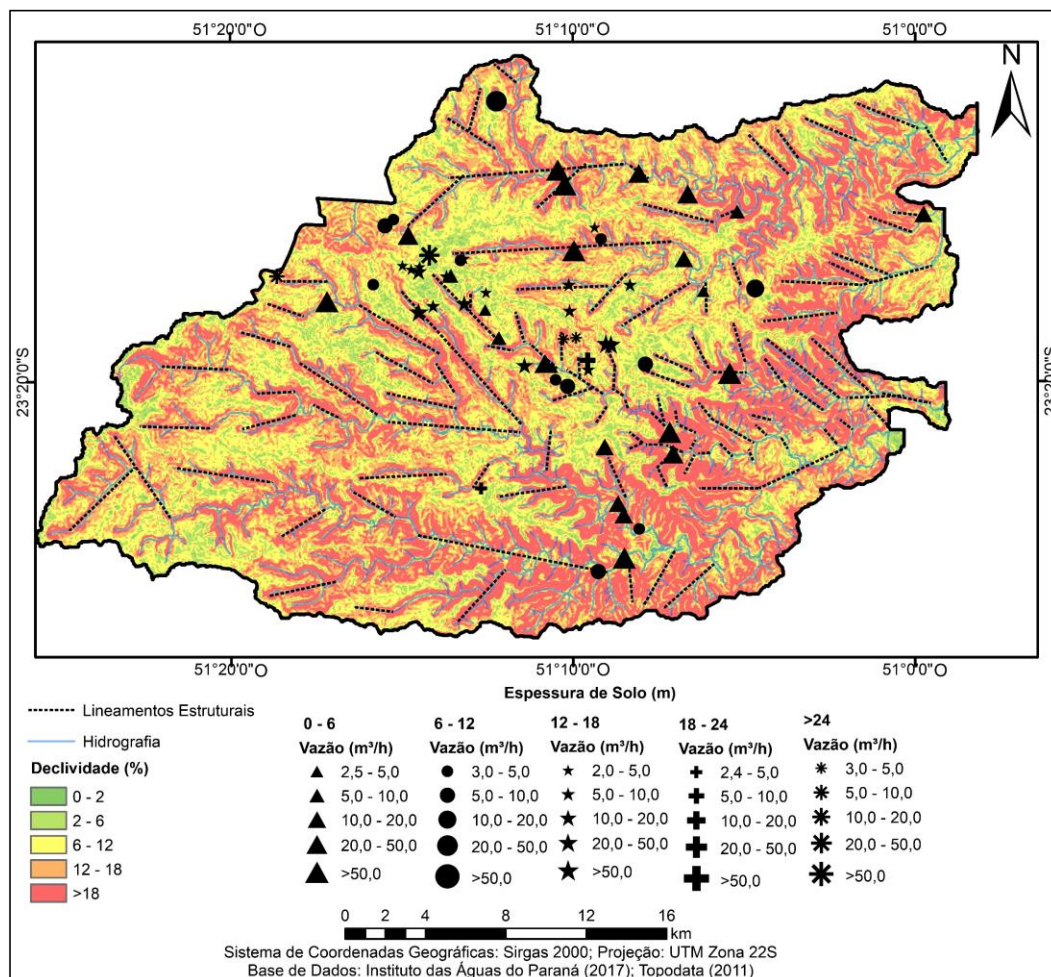


Ao observar o gráfico de dispersão (Figura 10), constata-se que o grupo com menor quantidade de estruturas (Grupo 1, 0 – 6 metros) apresenta um maior distanciamento dos demais grupos, seguido pelo grupo 3 (12 a 18 metros). O grupo 2 (espessura de 6 a 12 metros) apesar de a maioria dos poços estarem localizados nos valores positivos do E1, apresentou um distanciamento maior que os grupos 4 (18 a 24 metros) e 5 (>24 metros). Estes resultados sugerem que quanto menor é a espessura de solo, maior é produtividade hídrica do poço.

Assim como na ADC para as estruturas intraderrames, os grupos 4 (18 a 24 m) e 5 (>24 m) se apresentaram pouco segregados e concentrados do lado positivo do E1, sugerindo desta forma que maiores espessuras de solo são inversamente proporcionais à produtividade hídrica. Contudo, ainda que a capacidade específica tenha apresentado um coeficiente negativo, o mesmo apresentou um valor quase sete vezes menor que a vazão, demonstrando que a capacidade específica não sofre tanta influência da espessura de solo quanto a vazão.

Baixas espessuras de solo geralmente estão relacionadas a altas declividades do relevo, visto que em altas declividades o escoamento superficial é maior, o que leva à maior erosão do solo e menor tempo de residência da água no local, reduzindo o tempo de ação do intemperismo químico. Na região da área de estudo observa-se, por meio do mapa de declividade apresentado na Figura 11 que as áreas de maiores declividades estão localizadas próximas à rede de drenagem, principalmente às drenagens localizadas na calha do rio Tibagi, à leste. Além disto, é possível observar ainda que os poços também localizam-se, em sua maioria, próximos às drenagens, principalmente os poços com menores espessuras de solo (0 a 6 m e 6 a 12 m).

Figura 11 - Londrina (PR): Localização dos poços no mapa de declividade de acordo com a espessura de solo, 2019.



Em regiões mais distantes às drenagens, o solo normalmente possui maior profundidade e progressivamente vai reduzindo a sua espessura em direção aos rios. Como em aquíferos do tipo fraturado ocorre o fenômeno chamado riacho-fenda, em que as drenagens coincidem com os lineamentos estruturais, as regiões próximas a estes lineamentos podem apresentar maior fraturamento (CORIOLANO; SÁ; SILVA, 2000). Este fraturamento, de origem tectônica e não mais por resfriamento do magma, possibilita maior armazenamento de água, visto que as fraturas possuem maior comprimento e abertura, aumentando a produtividade hídrica no local.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi avaliada a influência que as estruturas das rochas e a espessura de solo exercem sobre a vazão e capacidade específica de poços tubulares que exploram o SASG nos municípios da região de Londrina.

Com base nos resultados obtidos pela análise de correlação linear, foi constatado que o método apresentou resultados satisfatórios em relação ao tipo de estrutura intraderrame e à vazão dos poços, mostrando que as estruturas de forma isolada – apenas vesículas/amígdalas ou fraturas – não contribuem significativamente para o aumento da vazão, mas sim quando há presença de ambas as estruturas.

A MANOVA e ADC também apresentaram resultados satisfatórios, condizentes com a análise de correlação linear, indicando que apenas a vazão é influenciada pelas estruturas intraderrames, apesar de estas considerarem conjuntamente os dados de estruturas, vazão e capacidade específica.

Neste sentido, a MANOVA e ADC atuaram de forma complementar e confirmatória da análise de correlação linear. Além disto, estas análises permitiram observar que o aumento da vazão é diretamente proporcional à quantidade de estruturas presentes no perfil geológico do poço, ou seja, quanto maior a quantidade de estruturas intraderrames, maior a vazão que um poço poderá fornecer.

Em relação à espessura de solo, a análise de correlação linear e a MANOVA constataram a influência exercida pela espessura sobre a vazão dos poços. Contudo, estas análises não foram suficientes para constatar a relação de dependência existente entre a espessura de solo e a capacidade específica, que pôde ser observada apenas pela ADC. Ainda que tenha sido observada uma influência sobre a capacidade específica, o valor do coeficiente canônico desta variável, se comparado ao coeficiente da vazão, demonstra que a mesma sofre uma pequena influência, quase desprezível, se comparada à vazão.

Este estudo permitiu constatar que estes fatores podem ter uma contribuição muito fraca a moderada no aumento da produtividade hídrica do SASG. Neste sentido, deve-se salientar que a produtividade hídrica pode ser influenciada por diversos outros fatores ambientais e que, considerando a dificuldade exploratória dos aquíferos fraturados, principalmente o SASG – que apresenta forte heterogeneidade, anisotropia e descontinuidade – torna-se necessário o desenvolvimento de métodos que auxiliem na predição de áreas de maior produtividade hídrica, tendo o presente trabalho um papel fundamental nas pesquisas futuras que têm como objeto de estudo os aquíferos fraturados.

Por fim, destaca-se que uma melhor compreensão do funcionamento do SASG pode auxiliar a gestão de recursos hídricos subterrâneos da região de Londrina, contribuindo para o uso mais eficiente das águas e melhorando a disponibilidade hídrica, tanto em quantidade quanto em qualidade, para fins de abastecimento humano.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e Fundação Araucária do Estado do Paraná, Brasil, pelo suporte financeiro através dos projetos do Convênio CNPq/Fundação Araucária: 61.0088/06-8 e Convênio Fundação Araucária/Uel: 063/08.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES – pela concessão de bolsa de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. C.; CONICELLI, B. P.; PEÑARANDA, J. R. Avaliação da produtividade dos poços tubulares na sub-bacia do Juqueri-Cantareira/SP. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XIX., 2016. Campinas. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 2016.

ARCHELA, E.; FRANÇA, V.; CELLIGOI, A. Geologia, geomorfologia e disponibilidade hídrica subterrânea na bacia hidrográfica do Ribeirão Jacutinga. **Geografia (Londrina)**. v. 12, n. 2, p. 131-140. 2003.

ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. V. M.; ROSA FILHO, E. F. Compartimentação hidroestrutural e aptidões químicas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42 (Supl. 1): 167-185, 2012. <https://doi.org/10.5327/Z0375-75362012000500014>

CELLIGOI, A. **Recursos hídricos subterrâneos da formação Serra Geral em Londrina – PR**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1993.

CELLIGOI, A.; DUARTE, U. Hidrogeologia da formação Serra Geral em Londrina – PR. **Boletim Paranaense de Geociências**. n. 45, p. 117-132, 1997.

CORIOLOANO, A. C. F.; SÁ, E. F. J.; SILVA, C. C. N. Implicações da neotectônica no condicionamento estrutural de água subterrânea em terrenos cristalinos: exemplo do semi-árido do leste do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *In*: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1, 2000. Fortaleza. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo: Águas Subterrâneas, 2000.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise Multivariada**: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia. 1.ed. São Paulo: Atlas, 2012.

COSTA, W. D. **Análise dos Fatores que Atuam no Aquífero Fissural**: Área Piloto dos Estados da Paraíba e R. G. do Norte. 1986. 233f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1986.

COSTA, W. D.; SILVA, A. B. Hidrogeologia de Meios Anisotrópicos. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia**: Conceitos e Aplicações. 2.ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Execução de testes de bombeamento em poços tubulares**: Manual prático de orientação. 1998. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/Testes_Bombeamento_Pocos_Tubulares.pdf. Acesso em: 15 jun. 2019.

DOUAGUI, A. G.; KOUADIO, S. K. A.; MANGOUA, J. O. M.; KOUASSI, A. K.; KOUAM, B. K.; SAVANÉ, I. Using specific capacity for assessing of the factors controlling borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of N'Zi, Iffou and Moronou regions in the eastern area of côte d'Ivoire. **Groundwater for Sustainable Development**. v, 9, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100235>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mapa de solos do estado do Paraná, 2008. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aparana_solos_wgs84. Acesso em: 26 abr. 2019.

GOUVÊA, T. H.; WENDLAND, E. C. Influência de Características do Solo na Variação do Nível d'água em Região de Recarga do Aquífero Guarani. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 16, n. 1. p. 55 – 65, 2011. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n1.p55-65>

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOLLAND, M.; WITTHÜSER, K. T. Evaluation of geologic and geomorphologic influences on borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of Limpopo Province, South Africa. **Hydrogeology Journal**. v. 19, p. 1065-1083, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0730-5>

IAC - Instituto Agrônomo de Campinas. **Nitossolos**. 2014. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosspp/pdf/Nitossolos.pdf> Acesso em: 26 abr. 2019.

IAP - Instituto Ambiental do Paraná. **APA da Escarpa Devoniana**. 2003. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Planos_de_Manejo/APA_Escarpa_Devoniana/Mapas/2_mapa_c_limas.pdf. Acesso em: 16 abr. 2019.

IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná. **Médias Históricas em Estações do IAPAR**. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1070>. Acesso em 16 abr. 2019a.

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

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

_____. **Bases Cartográficas**. 2015. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas.html>. Acesso em 02 Jul. 2020.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. **Dados de poços tubulares profundos perfurados na Região Metropolitana de Londrina**. Cedidos diretamente pelo órgão estadual. 2017.

ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Geologia. **Dados e informações geoespaciais temáticos: Geomorfologia**. 2006. Disponível em: <https://itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>. Acesso em: 02 Jul. 2020.

LONDRINA. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Londrina/ PR: Relatório de Diagnóstico da Situação do Saneamento**. 2010. Disponível em: http://www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/gabinete/PMSB/abastecimento_agua_03_10.pdf. Acesso em: 23 abr. 2019.

MINEROPAR - Minerais do Paraná. **Atlas geológico do estado do Paraná**. 2001. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2019.

_____. **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.

_____. **Atlas geomorfológico do estado do Paraná:** escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Universidade Federal do Paraná, 2006. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/Geomorfologicos/atlas_geomorforlogico.pdf. Acesso em 22 abr. 2019.

NEVES, M. A. **Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na bacia do Rio Jundiá (SP).** 2005. 200 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE). Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro. 2005.

OPEN STREET MAP. 2019. **Base cartográfica de arruamento dos municípios de Cambé, Londrina e Ibiporã.** Disponível em: <https://openstreetmap.org>. Acesso em 02 Jul. 2020.

PETERLINI, G. **Mapeamento de lineamentos estruturais e sua influência na potencialidade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia do Ribeirão Cambé em Londrina, PR.** 2017. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

REBOUÇAS, A. C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978. Recife. Anais do 30º Congresso Brasileiro de Geologia, v. 6. Recife: SBG, 1978, p. 2963-2976. <https://doi.org/10.14295/ras.v12i1.11282>

REBOUÇAS, A. C.; FRAGA, C. G. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. **Águas Subterrâneas**. n. 12, 1988.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C.; CEMIN, G. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do aquífero livre localizado no manto de alteração da Formação Serra Geral, na bacia hidrográfica Taquari-Antas, região Nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Ambi-Agua**. v. 7, n. 2, p. 143-162, 2012. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.903>

ROQUES, C.; BOUR, O.; AQUILINA, L.; DEWANDEL, B. High-yielding aquifers in crystalline basement: insights about the role of fault zones, exemplified by Armorican Massif, France. **Hydrogeology Journal**. v. 24, p. 2157-2170, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1451-6>

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L. A Importância do Sistema Aquífero Serra Geral para a Cultura da Soja no Estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 2, p. 49-56, 2006. <https://doi.org/10.14295/ras.v20i2.10720>

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. Z. **Gleissolos**. Embrapa, 2019. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_10_2212200611540.html. Acesso em: 30 abr. 2019.

SOUZA, M. T.; CAMPOS, J. E. G. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. **Rem, Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 191-198, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672001000300005>

TOPODATA - BANCO DE DADOS GEOMORFOMÉTRICOS DO BRASIL. 23_51_ e 23_525: **Altitude**. 2011. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 03 jul. 2020.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. **Atas III Simp. Sul-Bras. De Geologia**. Curitiba, v.1, p. 441-474, 1987.

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XV, 2008. Natal. Anais do **Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Natal: Águas Subterrâneas, 2008.

Recebido em: 12/03/2020

Aceito para publicação em: 07/07/2020