

## Caracterização dos poços de águas subterrâneas no triângulo mineiro: estudo dos aspectos construtivos, hidrodinâmicos e energéticos

Os recursos hídricos estão disponíveis de diversas maneiras e locais no planeta terra, sendo uma delas subterrâneas. Estas águas recebem o nome de lençol freático e estão localizadas em meio as rochas abaixo do nível da superfície, que podem ser classificadas em aquíferos fraturados, porosos ou cársticos. No Brasil, a captação deste recurso hídrico é feita, dentre outras maneiras, por meio de poços de água subterrâneas, que são registrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Nesse contexto, a plataforma online foi utilizada para o levantamento de todos os pontos de captação para a região do Triângulo Mineiro, salvas as exceções daqueles poços que foram perfurados e são utilizados de modo clandestino (sem registro no aparato da regulação estatal). Buscando a caracterização dos aspectos construtivos e hidrodinâmicos da região, foram realizadas análises e discussões acerca da distribuição de tais parâmetros pelo território mineiro, resultando inclusive, em estimativas de potência e energia totais para toda região, média de custos para implantação de um poço e suas emissões de dióxido de carbono. O estudo mostra que o emprego de bombas a diesel para os poços estudados, além de poluir 37% mais o ar atmosférico, possuem um custo anual aproximadamente 141% maior em relação as bombas elétricas.

**Palavras-chave:** Águas subterrâneas; Consumo energético; Custos de operação e Poços tubulares.

## Characterization of underground water wells at triângulo mineiro: constructive, hydrodynamic and energetic aspects studies

Water resources are available in different forms and locations on planet Earth, one of which is underground. These Waters are called the groundwater and are located among rocks below the surface level, which can be classified as fractured, porous or karstic aquifers. In Brazil, the water harvesting is made, among other ways, through underground water wells, which are registred in the Brazilian Underground Water Information System. In this context, the online platform was used to survey all harvesting points to the region of Triângulo Mineiro, except for those wells that were drilled and are used clandestinely (without registration in the state regulatory apparatus). Seeking to characterize the constructive and hydrodynamic aspects of the region, analyzes and discussions were carried out on the distribution of such parameters throughout the territory of Minas Gerais, resulting in estimates of total power and energy for the entire regions, average costs of underground wells implementation and its carbon dioxide emissions. The study shows that the use of diesel pumps for the studied wells, implies in 37% more atmospheric air pollution and elevate the anual costs in 141% when compared to electric pumps.

**Keywords:** Underground water; Energetic consumption; Operation costs; Tubular Wells.

Topic: Engenharia de Recursos Hídricos

Received: 05/10/2021

Approved: 26/10/2021

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Túlio Meloni Virgílio 

Universidade Federal de Itajubá, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2372345253996099>  
<http://orcid.org/0000-0002-5378-8634>  
[tulieloniv@gmail.com](mailto:tulieloniv@gmail.com)

Gabriel Francisco do Espírito Santo Garcia 

Universidade Federal de Itajubá, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2640271493411826>  
<http://orcid.org/0000-0001-6181-0865>  
[gabriel\\_espgarcia@yahoo.com.br](mailto:gabriel_espgarcia@yahoo.com.br)

Leonardo Augusto Freire André 

Universidade Federal de Itajubá, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2678974651181441>  
<http://orcid.org/0000-0002-7535-9785>  
[leofa2001@gmail.com](mailto:leofa2001@gmail.com)

João Victor dos Santos Silva

Universidade Federal de Itajubá, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/4184847835593630>  
[victorsilvajii@gmail.com](mailto:victorsilvajii@gmail.com)

Ivan Felipe Silva dos Santos

Universidade Federal de Itajubá, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1175675008975515>  
[ivanfelipeceice@hotmail.com](mailto:ivanfelipeceice@hotmail.com)

Maria Claudia Costa de Oliveira Botan 

Universidade Federal do Sul da Bahia, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/6964937951981304>  
<http://orcid.org/0000-0002-6299-9732>  
[maclau\\_oliveira@hotmail.com](mailto:maclau_oliveira@hotmail.com)



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0023

### Referencing this:

VIRGÍLIO, T. M.; GARCIA, G. F. E. S.; ANDRÉ, L. A. F.; SILVA, J. V. S.; SANTOS, I. F. S.; BOTAN, M. C. C. O.. Caracterização dos poços de águas subterrâneas no triângulo mineiro: estudo dos aspectos construtivos, hidrodinâmicos e energéticos. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.10, p.273-292, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0023>

## INTRODUÇÃO

Conforme a definição apresentada pela Fundação Joaquim Nabuco (PERNAMBUCO, 2020), águas subterrâneas podem ser compreendidas como toda a parcela deste recurso que se encontra no solo, nas mais diversas profundidades e quantidades. Elas por sua vez ficam armazenadas tanto nos poros do solo e das rochas como também nas fissuras e fraturas destes agregados minerais.

As águas subterrâneas apresentam funções fundamentais na manutenção e continuidade do sistema biótico local e global, através do suprimento hídrico para os rios, mecanismo fundamental em épocas de seca, além de constituir uma das partes do ciclo hidrológico. Estima-se que tal fornecimento possa chegar à 130 quilômetros cúbicos por ano, sendo responsável principalmente pelas perenidades dos corpos de água e derivados, garantindo o escoamento de base. Este volume representa 33,33% de todas as descargas dos rios mundiais (RIO DE JANEIRO, 2005).

“A água subterrânea é o mineral mais extraído no mundo, com retiradas anuais globais da ordem de 982 km<sup>3</sup>/ano” (MARGAT et al., 2013). Com o aumento populacional ao redor do mundo, as águas subterrâneas vêm ganhando espaço ao que tange o abastecimento humano. “Até 2012, cerca de dois bilhões de pessoas ao redor do mundo dependiam dos suprimentos de águas subterrâneas” (UNESCO, 2012). “Alguns países como Arábia Saudita, Dinamarca e Malta utilizam exclusivamente os recursos subterrâneos para seus abastecimentos” (GOMES et al., 2020). Já no território brasileiro, mais especificamente no estado de São Paulo, 80% dos municípios são abastecidos completamente ou parcialmente pelas águas subterrâneas (PRATES et al., 2012).

Segundo Boretti et al. (2019), o último relatório de desenvolvimento das Nações Unidas estimou que até 6 bilhões de pessoas enfrentarão problemas de escassez hídrica até 2050. Alexandratos et al. (2012) estimaram um aumento de 60% do consumo de água na agricultura até 2025, “setor responsável por 70% do consumo de águas subterrâneas no mundo” (MARGAT et al., 2013). Tais dados demonstram que as águas subterrâneas ainda podem ganhar mais relevância nos próximos anos com o aumento da necessidade por recursos hídricos. Em regiões de rendas baixas, climas áridos, locais desprovidos dos devidos controles e orientações, grandes centros urbanos ou em regiões que não se presa pelo devido tratamento dos efluentes, a qualidade e a quantidade das águas vêm diminuindo de forma mais expressiva. Fatos estes que aumentam os enfoques nas utilizações das águas subterrâneas, através de poços, para consumo humano, agropecuários e industriais.

Simon (2012) ressalta que uma das vantagens das águas presentes no subsolo seriam que elas já passaram por processos de filtrações e purificações naturais, pelas próprias camadas de solos e rochas, dispensando então tratamentos prévios em alguns casos. Além de fisicamente ocuparem menos espaços para suas captações, que são feitas nos poços tubulares.

Diversos são os aspectos relevantes dos poços tubulares. Primeiramente tem-se o aspecto construtivo. A evolução das técnicas de construções de poços e aumento das tecnologias envolvendo as bombas de recalques, permitem maiores profundidades e volumes de água explorados sejam alcançados

(BORGHETTI et al., 2004, citado por CORRÊA, 2014). Tem-se também o aspecto energético. O consumo de energia no bombeamento das águas subterrâneas pode ser elevado e o valor presente do custo operacional com energia elétrica, ao longo da vida útil, pode ultrapassar o próprio custo inicial de construção do poço (PERRONI et al., 2006). Apesar da importância do tema e do grande número de poços de águas subterrâneas no país, estudos que considerem consumo energético desses poços são escassos na literatura.

Os aspectos hidrodinâmicos do poço, por sua vez, como sua vazão e rebaixamento, bem como a relação estes fatores com as características do aquífero, estão intimamente ligados com sua eficiência (SANTOS et al., 2015). A caracterização dos aspectos dos poços tubulares é muito importante para uma adequada gestão e uso dos recursos hídricos subterrâneos, tendo sido objeto de estudo de diversos autores (como SALES et al., 2014; FAQUIN, 2015; dentre outros).

Deste modo o presente trabalho apresenta uma caracterização dos poços de água subterrâneas para a região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais – Brasil, considerando-se aspectos construtivos, energéticos e hidrodinâmicos deles. A região escolhida é de alta relevância para a economia do Estado, contendo também um elevado número de poços tubulares.

## **METODOLOGIA**

As caracterizações do presente trabalho foram aplicadas à região do Triângulo Mineiro, localizada no sudeste do Brasil, abrangendo um total de 66 municípios. Situada entre os rios Grande e Paranaíba, a região ocupa uma área de aproximadamente 90.545 km<sup>2</sup> (IBGE), com 2.144.482 habitantes (IBGE) destacando-se por seu alto Índice de Desenvolvimento Humano – IDH de 0,713 (BRASIL, 2010) e Produto Interno Bruto – PIB de R\$ 103.097.212 (BRASIL, 2018). Os dados utilizados para os estudos e correlações abordadas nos itens seguintes foram obtidos no site do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS e no site do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, em que a primeira plataforma online é oficial dos registros de dados coletados dos poços de águas subterrâneas e a segundo é oficial da classificação geológica do território brasileiro.

### **Coleta de dados de poços de águas subterrâneas no Triângulo Mineiro**

Em função da extensa área a ser caracterizada, bem como de algumas limitações da plataforma disponibilizada pelo SIAGAS, foram coletadas informações de todos os poços inseridos no retângulo delimitado pelas coordenadas 18°10'53" S 51°12'33" O e 20°15'24" S 45°10'35" O. Na sequência, esses dados passaram por uma filtragem de modo a evitar duplicatas e para que nenhum poço fora da região do Triângulo Mineiro fosse considerado no momento das caracterizações.

Após esse processamento foram identificados, no total, 1217 poços de águas subterrâneas dentro da região do Triângulo Mineiro, os quais possuem diversas falhas de registros e que serão abordadas no item seguinte.

## Caracterização dos aspectos construtivos e características hidrodinâmicas dos poços

Também no portal SIAGAS, foram levantados dados como: natureza (tipo), situação, uso da água (finalidade), formação geológica, método de perfuração e diâmetro da boca do tubo, para avaliação dos aspectos construtivos dos poços da região. Já para o levantamento das características hidrodinâmicas dos poços, informações como: nível estático, nível dinâmico, rebaixamentos e vazões são suficientes para um estudo detalhado nos itens seguintes. Além disso, esse tipo de levantamento possibilita um diagnóstico das condições de registro da plataforma online, a fim da verificação dos possíveis pontos de melhoria do sistema.

## Estudo estatístico e das correlações hidrodinâmicas diversas dos poços

Buscando entender os números de ocorrências das características hidrodinâmicas dos poços, bem como a identificação de algum padrão delas em decorrência de suas semelhanças (aspectos construtivos), foram elaborados histogramas com frequência e frequência acumulada das profundidades e vazões dos poços da região do Triângulo Mineiro, incluindo também os cálculos de suas médias e desvios padrões.

A existência de correlações entre os parâmetros hidrodinâmicos também foi verificada. Ao se estabelecer correlações entre vazões e profundidade, rebaixamento e vazão, rebaixamento por unidade de vazão e vazão, foi possível apresentar as equações de melhor ajuste (coeficientes de determinação – R<sup>2</sup>) e concluir a respeito da existência ou não de relações lógicas entre as características hidrodinâmicas e/ou aquífero.

## Estimativa de potência e energia consumida pelos poços

Tratando-se das caracterizações energéticas dos poços de águas subterrâneas da região do Triângulo Mineiro, foram feitas estimativas das potências dos mesmos em função de suas profundidades e vazões, adotando um rendimento médio das bombas de 88%, por meio da equação da potência hidráulica (1). Em seguida, foram determinados os consumos de energia em função da potência calculada e um tempo de operação médio de 8h/dia, adotado para todos os poços em função da dificuldade de obtenção de dados de tempo de operação mais detalhados, por meio da equação (2).

$$Pot = \frac{9,8 \cdot H \cdot Q}{\eta} \quad (1)$$

Sendo:

Pot – Potência do poço [kW]

H – Profundidade do poço [m]

Q – Vazão de estabilização [m<sup>3</sup>/s]

$\eta$  – Rendimento médio da bomba (adotada como sendo igual a 88%)

$$E = Pot \cdot t \quad (2)$$

Sendo:

E – Energia consumida pelo poço [kWh]

Pot – Potência do poço [kW]

t – Tempo de operação médio [h]

Para fins de comparações, foram considerados dois cenários de tipos de motores das bombas: B1 – bombas com motores a diesel e B2 – Bombas com motores elétricos, possibilitando então as discussões das

vantagens dos tipos de combustíveis sob as óticas energéticas e ambientais, quando observados os fatores de emissões de dióxido de carbono por cada equipamento disposto na Tabela 1. Para o estudo com a bomba elétrica, que será atendida pela eletricidade da rede, considerou-se o fator de emissão da matriz elétrica Brasileira.

**Tabela 1:** Fatores de emissão da bomba à diesel e elétrica.

Fatores de emissão	Valor	Referência
Bombas à diesel [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	0,8	Akella et al. (2009)
Bombas elétricas [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	0,584	Brasil (2021)

### Avaliação de implantação e dos custos envolvidos para um poço na região

Partindo dos resultados de energia consumida, foi elaborada uma avaliação dos custos de implantações e operações médios na região do Triângulo Mineiro, de modo a identificar as vazões e profundidades recomendadas de um poço em função do uso da água. Os custos estimados nesse item, estão em função do custo de operação e manutenção, preço da energia elétrica e preço do diesel considerados.

**Tabela 2:** Custos envolvidos na perfuração e no emprego de bombas à diesel e elétrica para captação de águas subterrâneas.

Custos	Valor	Referência
Perfuração do poço [R\$/m]	400,00	PERFURARTE (2020)
Operação e manutenção	2% do custo de perfuração ao ano	ADOTADO PELOS AUTORES
Energia elétrica [R\$/kWh]	0,60	ANEEL (2021) e MINAS GERAIS (2021)
Combustível Diesel [R\$/L]	4,633	ANP (2018)

Para o cálculo do volume de consumo de diesel pela bomba, foi utilizada a equação (3) obtida em Alkmin (2017), em que foi considerado o valor do poder calorífico inferior do diesel igual a  $3,66 \times 10^{10}$  J/m<sup>3</sup>, com base em ANP (2018) e Engineering ToolBox.

$$V = \frac{\left(\frac{Pot}{PCI}\right)}{e} \cdot t \quad (3)$$

Sendo:

V – Volume de combustível consumido [m<sup>3</sup>]

Pot – Potência consumida na bomba no poço [W]

PCI – Poder calorífico inferior do diesel [J/m<sup>3</sup>]

e – Eficiência do motor a Diesel (adotada como sendo igual a 30%)

t – Tempo de operação [s]

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Estudo dos aspectos construtivos

#### Tipo de poço

A classificação de poços quanto a sua natureza é dividida em três tipos na região do Triângulo Mineiro: poços tubulares, escavados (cacimba/cisterna) e de monitoramento (RIMAS). Na Figura 1 a seguir, observa-se a distribuição encontrada para a natureza dos poços registrados na plataforma SIAGAS para o território estudado, bem como identificar a quantidade de poços que estão com falhas no registro.

Segundos os dados do sistema online, cerca de 94% dos poços de águas subterrâneas são tubulares.

Os demais 6% estão divididos em poços escavados, rimas e aqueles em que houve falhas de registro. Notamos que na região em questão existe uma predominância dos poços tubulares que podem estar localizados sobre ambos aquíferos livres ou confinados.

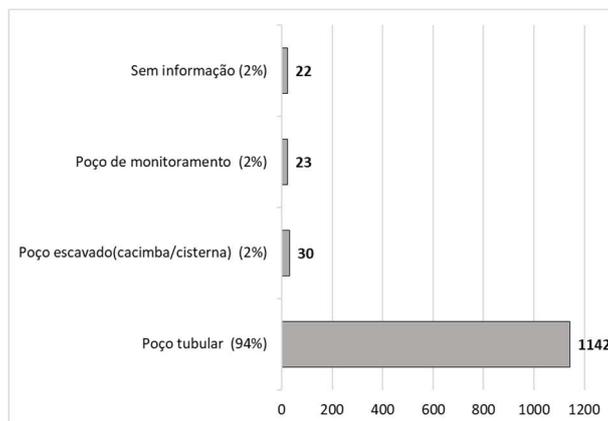


Figura 1: Distribuição dos poços em relação à sua natureza.

### Situação

Em relação à situação de um poço na região do Triângulo Mineiro, ele pode variar entre: bombeando, equipado, seco, abandonado, não instalado, poços rimas, parado, obstruído, não utilizável, fechado e precário. O poço rimas são perfurações voltadas para a monitoração de águas subterrâneas e quanto aos demais a classificação é autoexplicativa. Na Figura 2, pode-se observar a distribuição das situações dos poços na região, bem como a quantidade de falhas presentes nos registros abordando este aspecto construtivo.

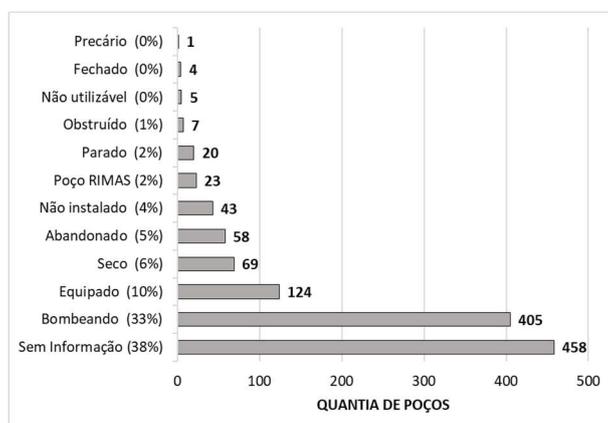


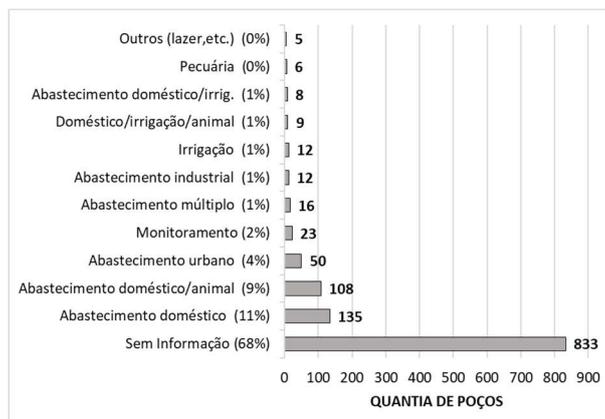
Figura 2: Distribuição dos poços em relação à sua situação.

Pode-se verificar que na região há o predomínio de poços em funcionamento (bombeando) e prontos para funcionamento (equipado). Este último pode significar que o procedimento (outorga ou registro de uso insignificante) para início ou continuação de captação de água está em andamento ou pausada. Importante notar que houve muitas falhas de registro sobre este tipo de informação que pode acabar por comprometer as análises das situações dos poços.

### Uso da água

Um poço pode ser perfurado para diversos fins e, para a região do Triângulo Mineiro, os usos da água

captada, bem como as falhas apresentadas no registro, estão demonstrados na Figura 3 a seguir. Vale ressaltar que na classificação feita pela própria plataforma do SIAGAS há algumas sobreposições nas classificações como por exemplo em abastecimento doméstico e doméstico/animal.



**Figura 3:** Distribuição dos poços em relação a sua finalidade.

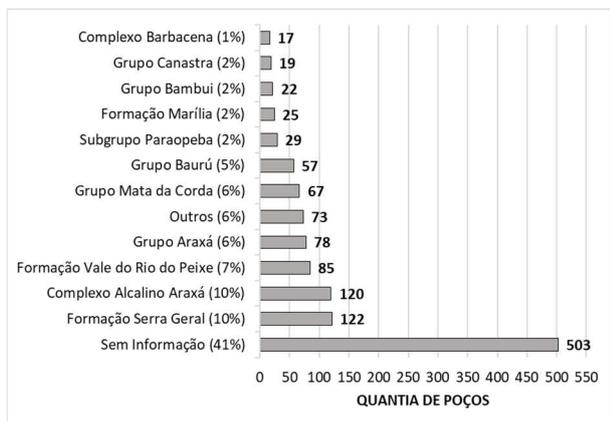
Pelo gráfico pode-se observar que as águas subterrâneas na região de estudo estão em sua maioria (aproximadamente 68%) sem informações de suas utilizações. Tal resultado pode ser apontado como uma falha do registro dos dados identificado na plataforma. Os 32% dos usos restantes estão distribuídos em principalmente abastecimento doméstico, doméstico/animal e urbano, enquanto uma pequena parcela é voltada para as demais finalidades exploradas na região. Logo, devido à grande inconsistência dos registros de informações para a região, qualquer conclusão a respeito da tendência das finalidades no Triângulo Mineiro é comprometida.

### Formação geológica e tipo de aquífero

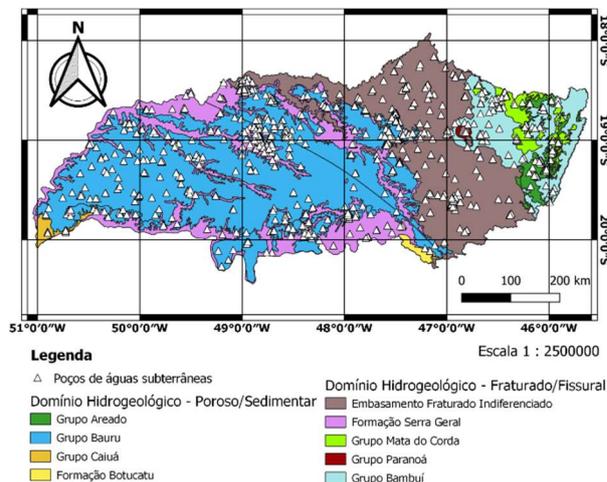
Diferentes composições podem ocorrer na formação geológica de um aquífero e, por isso, é muito importante que se conheça todas as características inerentes a cada tipo existente a fim de se entender melhor como o tipo de rocha pode influenciar na perfuração e no funcionamento de um poço.

Ao extrair os dados da plataforma online do SIAGAS, foi possível determinar a formação geológica de alguns dos poços discutidos nesse trabalho, no entanto, a maioria deles possuem falhas em seus registros. Na Figura 4 a seguir, pode-se notar a distribuição das informações geológicas na região.

Na figura anterior, foi verificado que a ocorrência de falhas se deu de maneira frequente para os poços em estudo e, por conta disto, foi buscado na plataforma da CPRM por este tipo de informação. No momento da coleta de dados, uma das informações extraídas além dos aspectos construtivos e características hidrodinâmicas, foram as localizações de cada ponto de estudo. Dessa forma, foi possível cruzar as informações dos bancos de dados das duas plataformas e extrair a classificação de todos os poços, como visto na Figura 5.



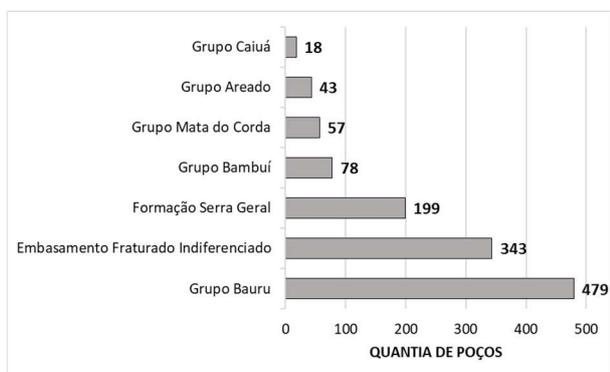
**Figura 4:** Distribuição dos poços em relação a sua formação geológica pela classificação da plataforma do SIAGAS.



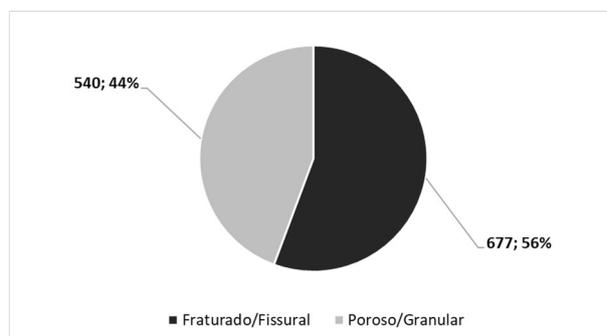
**Figura 5:** Distribuição dos poços em relação ao seu domínio hidrogeológico.

A partir da combinação entre a localização dos poços (BRASIL, 2021) e dos domínios hidrogeológicos (BRASIL, 2019), foi possível classificar todos os pontos de extração de águas subterrâneas em relação ao tipo de formação geológica, como mostra a Figura 6.

Como visto nesta nova distribuição segundo a classificação da CPRM, nota-se que não há presença de nenhum poço sem informações em relação a sua formação geológica. Logo, foi possível a determinação do tipo de aquífero de todos os poços, como mostra a Figura 7. Tal resultado demonstra a importância de se utilizar ambas as plataformas, tanto a do SIAGAS quanto a do CPRM, para caracterização dos poços subterrâneos de uma região.



**Figura 6:** Distribuição dos poços em relação a sua formação geológica pela classificação da plataforma da CPRM.



**Figura 7:** Distribuição dos poços em relação ao tipo de aquífero.

## Métodos de perfuração

Os métodos de perfuração utilizados na região de estudo, podem se diferenciar em: rotopneumático, rotativo, percussão, roto-percussão e trado, como mostra a Figura 8.

Mais uma vez, destaca-se que a falta de dados influencia fortemente na análise dos resultados, já que aproximadamente 77% dos poços não possuem informação em seu registro em relação ao método utilizado no momento de sua perfuração. Dentre os poços com dados, o método rotopneumático (que combina uma perfuratriz rotativa com ar comprimido) foi o método de perfuração mais utilizado.

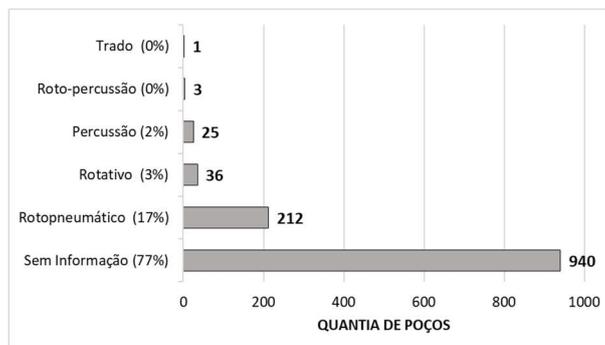


Figura 8: Distribuição dos poços em relação ao método de perfuração utilizado.

### Diâmetros da boca do tubo

Os diâmetros das bocas dos tubos dos poços de águas subterrâneas da região estudada variam entre: 63,5 e 475 mm. Na Figura 9 informa-se como se deu a distribuição dos diâmetros dos poços.

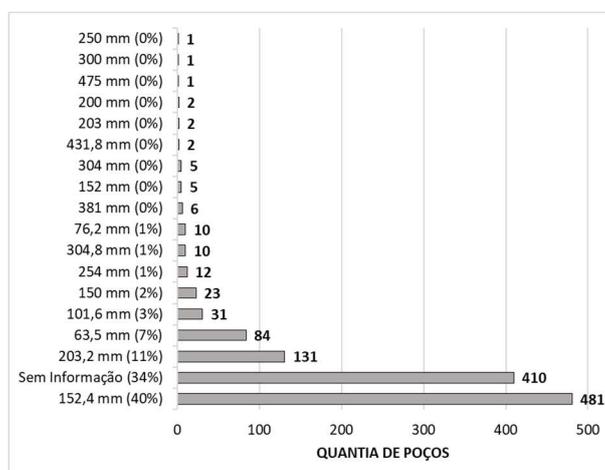


Figura 9: Distribuição dos poços em relação ao diâmetro da boca do tubo.

Pode-se observar uma grande variação dos diâmetros de boca do tubo ao longo de toda a região do Triângulo Mineiro, no entanto, há uma predominância muito forte do diâmetro de 152,4 mm (aprox. 40%) e das falhas de registro (aprox. 34%). Vale ressaltar que, ao fazer uma média ponderada dos diâmetros encontrados em toda a área de estudo (desconsiderando aqueles sem informação), tem-se o resultado de 156,1 mm que é bastante próximo do diâmetro predominante da região.

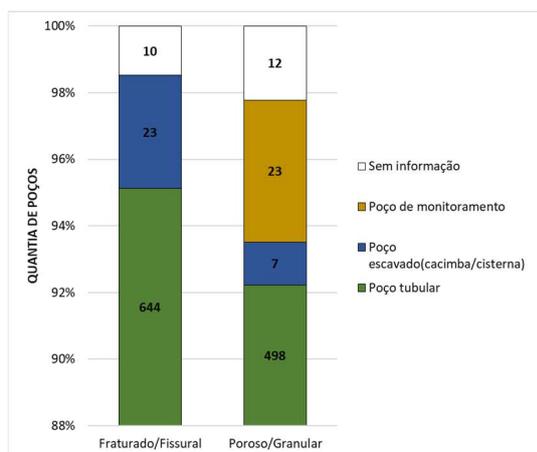
Além disso, de acordo com Costa Filho et al. (1998), os diâmetros mais frequentes para aquíferos fissurais varia entre 101,6 mm e 152,4 mm (4" e 6"), enquanto para os aquíferos porosos o intervalo é bem maior, podendo ser de 101,6 mm até 558,8 mm (4" até 22"). Ao compararmos esses valores ao resultado encontrado na média, notamos que ela está dentro dos intervalos mencionados na literatura.

### Correlações dos aspectos construtivos

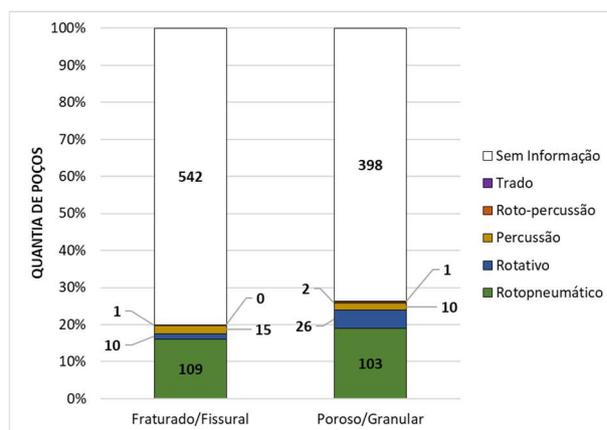
Buscando entender se existem interações entre os aspectos construtivos listados anteriormente com o tipo de aquífero, foram construídas algumas correlações a procura por evidências de algo mais conclusivo.

Partindo de uma primeira correlação entre a natureza dos poços e o tipo de aquífero, foi observado que os poços de monitoramento (RIMAS) foram perfurados apenas em rochas porosas, como mostra a Figura

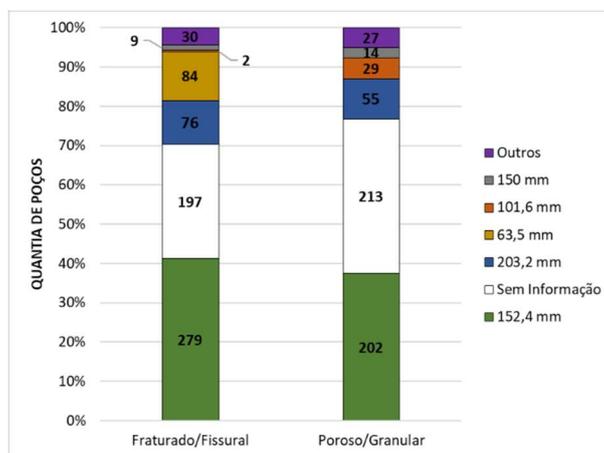
10. No entanto, vale ressaltar que dos 1217 poços em que são estudados os aspectos construtivos, apenas 23 deles são voltados para tal finalidade.



**Figura 10:** Correlação entre as naturezas dos poços e o tipo de aquífero.



**Figura 11:** Correlação entre os métodos de perfuração e o tipo de aquífero.



**Figura 12:** Correlação entre os diâmetros da boca de tubo e o tipo de aquífero.

A correlação com o método de perfuração, como mostra a Figura 11, mostra uma maior tendência de se usar técnicas rotopneumáticas para perfurações de poços de águas subterrâneas para a região do Triângulo Mineiro, independentemente do tipo de aquífero. Por outro lado, a falta de informação para este parâmetro foi muito grave e dificulta qualquer discussão mais detalhada sobre a existência ou não de tendências para escolha do método de perfuração na área de estudo.

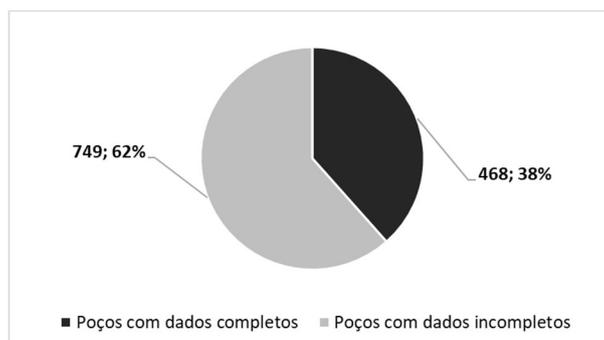
Por fim, a última correlação construída foi entre os diâmetros encontrados para as bocas dos tubos dos poços com o tipo de aquífero, como mostra a Figura 12.

Pela Figura 12, é evidente que o diâmetro de boca de tubo de 152,4 mm é bastante comum, independentemente do tipo de aquífero e, como foi mencionado anteriormente, esse é um resultado esperado, dado que a média dos diâmetros foi de aproximadamente 156 mm e que esse diâmetro de

Observa-se também que, em aquíferos porosos, não são utilizados diâmetros de 63,5 mm para as bocas de tubo (84 amostras) na região do Triângulo Mineiro. Para os demais diâmetros encontrados em todos os poços estudados, não é possível elaborar uma discussão adequada em decorrência da carência de informação disponibilizada pela plataforma do SIAGAS.

## Estudo das características hidrodinâmicas

Para que seja possível fazer estudos e correlações estatísticas, estimativas de potência e energia consumida e avaliações de implantação e de custo nos itens seguintes, primeiramente é necessário separar os poços que possuem dados completos de profundidade, níveis estáticos e dinâmicos e vazão, dos demais. Na Figura 13 a seguir, nota-se que de 1217 poços de águas subterrâneas, apenas 468 deles apresentam esses dados registrados simultaneamente.



**Figura 13:** Distribuição dos poços com dados hidrodinâmicos completos e incompletos.

Pela Figura 13, nota-se que para as caracterizações e estudos efetuados nos itens seguintes, apenas 38% dos poços de águas subterrâneas serão considerados.

## Estudos e correlações estatísticas

### Vazões

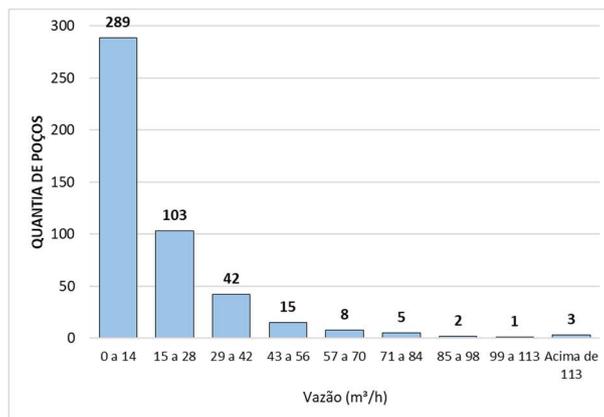
Embasado nos dados obtidos e apresentados anteriormente, referentes aos poços cadastrados no SIAGAS, tornou-se possível a confecção de tabelas e gráficos, estes por sua vez serão apresentados na sequência. Possibilitando assim análises mais detalhadas sobre as características hidrodinâmicas das águas subterrâneas na região de estudo.

Os dados de interesses foram principalmente as vazões e profundidades alcançadas pelos poços. A Tabela 3 a seguir representa a primeira variável de interesse.

**Tabela 3:** Organização das frequências das vazões em intervalos.

Intervalos [m]	n°
0 a 14	289
15 a 28	103
29 a 42	42
43 a 56	15
57 a 70	8
71 a 84	5
85 a 98	2
99 a 113	1
Acima de 113	3

Como mencionado no item anterior, ao todo foram analisados 468 poços, em que as vazões foram separadas em intervalos com amplitude de 14 m<sup>3</sup>/h. Tal critério foi adotado em prol da melhor visualização gráfica, vista na Figura 14.



**Figura 14:** Distribuições das frequências de vazões.

De acordo com as informações dispostas anteriormente, pode-se perceber que dos 468 poços registrados aproximadamente 61,75% apresentam vazões exploradas relativamente baixas, podendo chegar ao máximo de 233,33 litros por minuto, considerando um cenário ideal, com quatorze metros cúbicos por hora.

A Deliberação Normativa CERH-MG n.º 09, de 16 de junho de 2004, a qual dispõem sobre os usos insignificantes para as circunscrições hidrográficas no Estado de Minas Gerais ressalta que captações subterrâneas com limite de 10.000 litros por dia são isentas da outorga, exigindo apenas o Cadastro de Uso Insignificante. Isto resultaria em uma extração mínima da ordem de 416,66 litros por hora, durante 24 horas ininterruptas ou 1.250 litros por hora, durante 8h ao dia. Porém em um cenário com captação da ordem de 14 m³/h a extração poderia dar-se apenas por 0,714 horas, considerando o bombeamento constante de 233,33 litros por minuto.

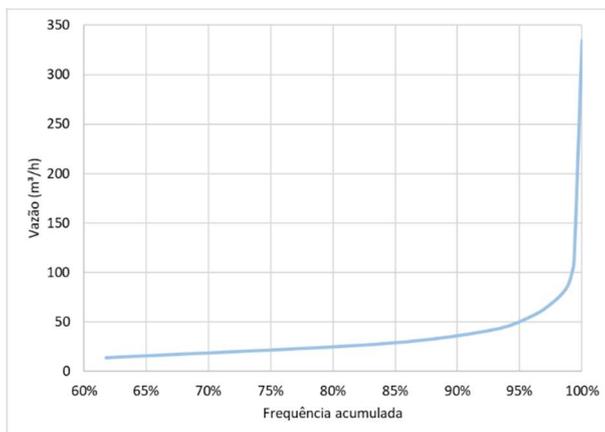
Em uma realidade onde ocorrem as elevações dos volumes captados, os usos destes recursos passam a ser mais abrangentes, como por exemplo abastecimentos públicos, industriais e agrícolas (de médios a grandes portes), tornando-se obrigatório então a emissão da outorga.

Para melhores visualizações dos resultados, foi confeccionada a Tabela 4, a qual demonstra as frequências acumuladas em função das vazões obtidas, para cada classe.

**Tabela 4:** Frequência acumulada das vazões.

Q [m³/h]	Fa
14	61,75%
28	83,76%
42	92,74%
56	95,94%
70	97,65%
84	98,72%
98	99,15%
113	99,36%
335	100,00%

O comportamento dos dados da tabela é verificado na Figura 15.



**Figura 15:** Frequência acumulada de vazões.

Através deste, evidencia-se o cenário em que os poços de captações de até 14.000 litros por hora representam aproximadamente 62% do quantitativo total, frequência acumulada. Estando então de acordo com a análise resultante da Figura 15.

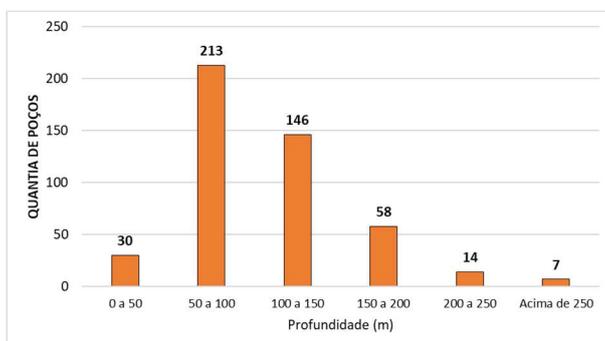
### Profundidade

Já ao que tange às profundidades dos poços com dados cadastrados no SIAGAS, buscou-se aplicar a mesma metodologia utilizada nas análises das vazões. Sendo assim, a Tabela 5 representa os dados organizados em seis intervalos com amplitudes de 50 metros.

**Tabela 5:** Organização das frequências das profundidades em intervalos.

Intervalos [m]	n°
0 a 50	30
50 a 100	213
100 a 150	146
150 a 200	58
200 a 250	14
Acima de 250	7

Os critérios utilizados para as separações das classes foram feitos visando melhores visualizações gráficas. A Figura 16 a seguir ilustra tal situação.



**Figura 16:** Distribuição das frequências de profundidade dos poços.

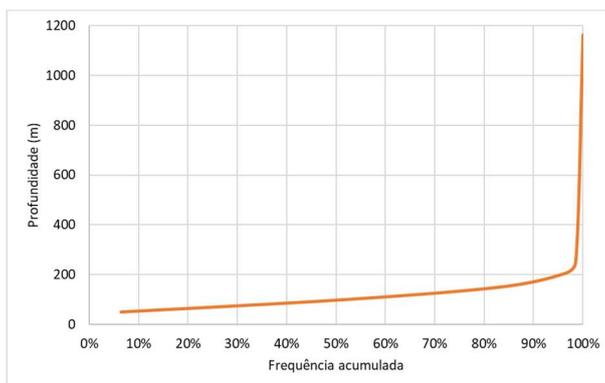
Fundamentando-se ainda na Deliberação Normativa CERH-MG n.º 09, de 16 de junho de 2004, a qual além das ressalvas sobre as vazões de águas subterrâneas que exigem o instrumento da outorga, dispõem em seu Art. 3 parágrafo 1 que poços de naturezas tubulares necessitam desta regularização, independentemente dos volumes captados.

Visando a melhor compreensão dos resultados bem como as distribuições das frequências relativas acumuladas, confeccionou-se a Tabela 6 e Figura 17.

**Tabela 6:** Frequência acumuladas das profundidades.

Profundidade [m]	Fa
50	6%
100	52%
150	83%
200	96%
250	99%
1163	100%

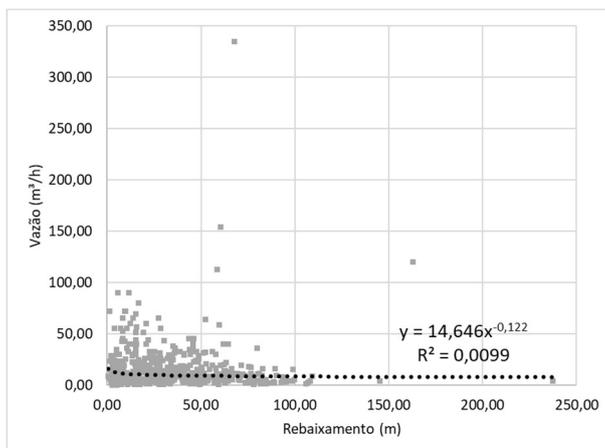
Os resultados obtidos demonstram que grande parte dos poços escavados se encontram na faixa de profundidade compreendida entre 50 e 100 metros.



**Figura 17:** Profundidade relativa acumulada.

### Equiparações das variáveis de interesses

Com tais exposições torna-se possível o estudo de algumas correlações entre as variáveis, como o rebaixamento em função da vazão e vazão específica. Segundo Moraes (2016), a vazão específica também conhecida como capacidade de produção pode ser compreendida pela razão entre a vazão e o rebaixamento medido, expressada em  $m^3/h/m$ .



**Figura 18:** Relação entre vazão e rebaixamento.

Tais análises tornam-se muito importantes no ato de caracterizações dos aquíferos, porém como ao todo são 468 analisados na região do Triângulo Mineiro, seria inviável a análise individual de cada um deles. Sendo assim, na Figura 18, serão apresentados e discutidos os gráficos de forma ampla, com o intuito da

caracterização geral da área de estudo.

O gráfico anterior demonstra as relações previamente discutidas, evidenciando que a maioria dos poços apresentam vazões até 100 metros cúbicos por hora, coincidindo com o rebaixamento, em que a maioria destas construções se encontram na faixa de 0 a 100 metros. Posto isto mostra-se interessante à análise de tais variáveis em seus pontos médios, acompanhadas de seus respectivos desvios padrões.

**Tabela 7:** Valores médios e desvio-padrão.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão
Vazão [m <sup>3</sup> /h]	17,07	23,22
Profundidade [m]	107	76,78
Rebaixamento [m]	36,70	27,36

O fato de que os desvios padrões apresentarem em relações a suas médias, tanto de vazão, profundidade e rebaixamento, quantitativos de 136%, 71,76% e 74,55% respectivamente, demonstra a heterogeneidade dos dados de tal região brasileira. Este evento pode ser compreendido sob duas perspectivas, a falta de dados dos demais poços existentes na zona de estudo ou a diversidade hidrodinâmica da área. Portanto, analisar os parâmetros envolvidos por municípios ou sub-regiões poderia resultar em análises mais precisas.

Partindo deste pretexto, buscou-se correlacionar a vazão captada com as respectivas profundidades dos poços escavados, conforme apresentada a Figura 19.

Ressalta-se que os valores das vazões coletadas no portal do SIAGAS apresentam uma amplitude alta, fato este que influenciou na escolha da aplicação da função Log, no eixo das abscissas. O formato da curva de tendência obtida na Figura 19 demonstra que não há uma relação clara entre a vazão e profundidade. Todavia torna-se possível a observação de que uma grande parte dos poços da região de estudo apresentam uma profundidade de até 200 metros, com vazões não superiores à 100 metros cúbicos por hora, como citado anteriormente. Havendo algumas exceções, por exemplo, o poço mais profundo coincidentemente é o mesmo que detém a maior vazão da região.

Na mesma tendência buscou-se a plotagem das relações das vazões específica (capacidade de produção) pelas suas respectivas profundidades. O Figura 21 demonstra a resultante. Para a melhor distribuição dos dados, aplicou-se a função Log, no eixo das coordenadas. A plotagem dos dados denota que a profundidade de um poço não garante sua alta capacidade de produção. Variáveis como tipo de aquífero, volume disponível e demais poços ao seu redor influenciam na capacidade de exploração. O ajuste polinomial (melhor ajuste) apresenta um coeficiente R<sup>2</sup> extremamente baixo, 0,0265, reforçando a tese da heterogeneidade das condições hidrodinâmicas da região.

A plotagem dos dados denota que a profundidade de um poço não garante sua alta capacidade de produção. Variáveis como o tipo do aquífero, volume disponível e demais poços ao seu redor influenciam na captação de exploração. O ajuste polinomial (melhor ajuste) apresenta um coeficiente R<sup>2</sup> extremamente baixo, 0,0265. Reforçando a tese da heterogeneidade das condições hidrodinâmicas da região.

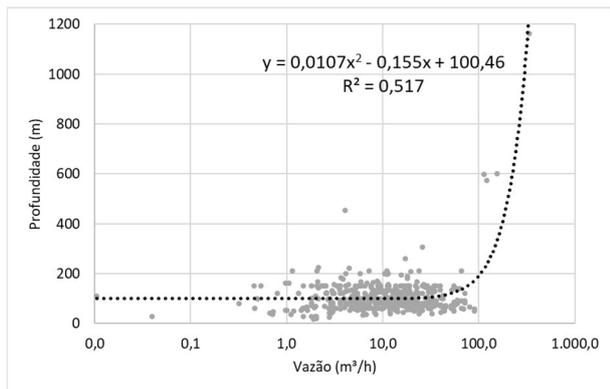


Figura 19: Relação entre vazões e profundidades.

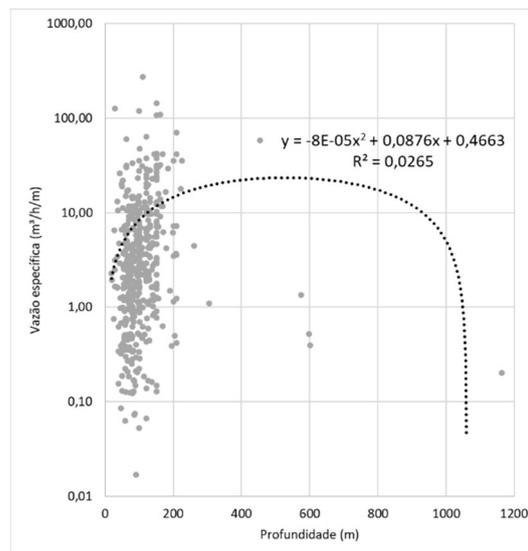


Figura 20: Capacidade de produção dos poços por suas profundidades.

### Resultados das estimativas de potência e energia consumida

Foram obtidas as potências de cada poço registrado no Triângulo Mineiro através da equação 1, apresentada no Item 2.5. A somatória das potências dos poços da região com dados hidrodinâmicos (468 poços) resultou em um valor de 4.108,10 kW. Valor consideravelmente elevado, e que equivale a potência instalada de uma pequena usina hidrelétrica.

A região apresentou diversos poços que atuam com diferentes faixas de potência, variando desde o menor valor encontrado, igual a 0,00359 kW até o maior valor obtido, igual a 1.204,498 kW de potência. Contudo, a grande maioria dos poços apresentaram a utilização de potências pequenas, na faixa de 1 até 10 kW, como mostra a Figura 22.

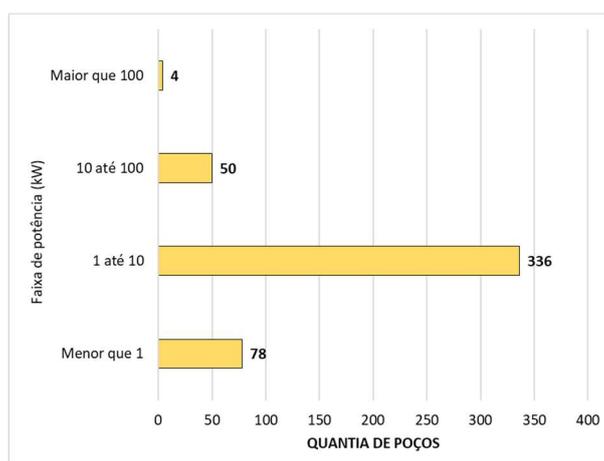


Figura 21: Faixa das potências dos poços de águas subterrâneas.

É visto que, a utilização de altas potências, como no maior valor obtido, é proveniente de casos específicos, qual ocorreu uma única vez em toda região do Triângulo Mineiro. A alta potência foi advinda de um poço que utiliza de uma alta vazão (334,8 m³/h) para bombeamento em uma grande profundidade (1163 m).

Os valores de energia consumida foram calculados para cada poço, considerando o bombeamento

realizado por 8 horas diárias. A energia consumida obtida foi de 32,86 MWh/dia, equivalente ao consumo de aproximadamente 12,00 GWh/ano.

### Avaliações de custo de implantação de poços tubulares e suas emissões

Através de dados apresentados e com os valores de potência e energia consumida calculados anteriormente, foi possível estimar o custo de implantação e manutenção médio de um poço artesiano para dois cenários, sendo eles, com motor elétrico e a diesel, na região estudada.

Foram utilizadas as médias de profundidade (107 m) e de vazão (17,07 m<sup>3</sup>/h) dos poços da região do Triângulo Mineiro, e um tempo de uso da bomba de 8 horas por dia. A partir disso, calculou-se os custos de perfuração operação e manutenção anual e o preço da energia anual requerida para a operação do poço em cada cenário. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8:** Custos médios envolvidos na perfuração e operação de um poço de águas subterrâneas e suas respectivas emissões de dióxido de carbono.

Custos	Valores para Bombas Elétricas	Valores para Bombas à Diesel
<b>Custo da Perfuração</b>	42800,00	42800,00
<b>Custo com Energia Elétrica ou Combustível [R\$/dia]</b>	27,05	68,47
<b>Custo com Energia Elétrica ou Combustível [R\$/ano]</b>	9872,18	24991,57
<b>Custos Operacionais e de Manutenção [R\$/dia]</b>	2,35	2,35
<b>Custos Operacionais e de Manutenção [R\$/ano]</b>	856,00	856,00
<b>Custos Anuais [R\$/dia]</b>	29,39	70,82
<b>Custos Anuais [R\$/ano]</b>	10728,18	25847,57
<b>Emissões de CO<sub>2</sub></b>	<b>Valores para Bombas Elétricas</b>	<b>Valores para Bombas à Diesel</b>
<b>Emissões Totais [t CO<sub>2</sub>/dia]</b>	12,32	16,88
<b>Emissões Totais [t CO<sub>2</sub>/ano]</b>	4496,98	6160,24

Percebe-se que para implantar um poço, é preciso um investimento inicial de 42.800,00 reais na perfuração. Em seguida, se faz necessário a seleção da bomba a ser utilizada, podendo ser uma bomba elétrica ou à diesel. Na Tabela 8, nota-se que há um custo anual de 10.728,18 reais para um motor elétrico. Já para o motor a diesel o gasto é 25.847,57 reais anuais. Além disso, o cenário da bomba elétrica tem emissões de dióxido de carbono menores quando comparadas àquelas movidas a diesel. Para os 468 poços avaliados, a utilização dos motores elétricos emite aproximadamente 4.497 toneladas de CO<sub>2</sub> anuais, enquanto as bombas à diesel emitem 6.160 toneladas de CO<sub>2</sub> anuais, valor consideravelmente superior ao da energia elétrica, o que indica a importância de utilização de bombas elétricas em poços de captação de águas subterrâneas para diminuir a pegada de carbono desta atividade.

A partir dos resultados obtidos, percebe-se que o motor elétrico é significativamente mais econômico que o motor a diesel. Uma vez que este é 140,93% mais caro e polui o ar atmosférico 37% a mais do que o motor elétrico. Essas estatísticas devem ser levadas em consideração por um investidor que tem o interesse de implantar um poço.

### CONCLUSÕES

Mesmo utilizando do meio oficial para coleta deste tipo de dados, a plataforma SIAGAS apresenta diversas falhas em seu registro de dados, fato que dificulta o refino de análises para a região do Triângulo

Mineiro. No entanto, na busca pelo melhor entendimento das características hídricas, das perfurações mais comuns da região e dos aspectos econômicos envolvidos, é possível destacar alguns pontos com base nos dados obtidos.

Ao observar os estudos apresentados anteriormente, nota-se que a maioria dos poços possui natureza tubular, são perfurados através do método rotopneumático e, sem considerar aqueles que não possuem dados, os demais são utilizados em sua maioria para abastecimento doméstico ou doméstico/animal. Além disso, as vazões e profundidades médias dos poços da região são de, respectivamente, 17,07 m<sup>3</sup>/h e 107 m, com um desvio padrão alto que pode ser explicado devido a carência de informações inseridas e atualizadas no sistema.

Em relação aos aspectos da formação geológica e classificação do tipo de aquíferos dos 1217 poços levantados, foi definido que aproximadamente 56% dos pontos de captação de águas subterrâneas estão situados em um aquífero fraturado e os 44% restantes sobre aquífero poroso. Diferente das características discutidas anteriormente, esses aspectos são apresentados de maneira precisa devido ao cruzamento de informações com a plataforma do Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Caso contrário, qualquer conclusão acerca desta característica estaria igualmente comprometida.

Como foi visto até aqui, o site do SIAGAS apresenta muitas falhas em seu registro, que acabam impossibilitando qualquer discussão detalhada sobre a manifestação das características hídricas na região, bem como as tendências dos aspectos construtivos e utilitários dos poços de águas subterrâneas no Triângulo Mineiro. Deste modo, seria interessante corrigir a precariedade dos dados na plataforma, de modo a permitir consultas mais precisas e coerentes com a realidade.

Agravando ainda mais este cenário, sabe-se que há diversos poços de águas subterrâneas clandestinos (sem regularização) espalhados por todo o Brasil. Sendo assim, o número de 1217 poços levantados não é um valor preciso, afinal muitos deles não estão registrados na plataforma do SIAGAS.

Em seguida, foram calculadas as potências utilizadas por uma bomba hidráulica, para a captação de água nas profundidades e vazões especificadas, e, a energia utilizada diariamente para todos os 468 poços que possuem esses dados disponíveis. Foi verificado uma potência total aproximada de 4,11MW para os poços válidos da região do Triângulo Mineiro, que corresponde a um consumo energético total de 32,86 MWh/dia ou 12,00 GWh/ano.

Ressalta-se que para instalar um poço, além do investimento inicial médio de R\$42.800,00 para perfuração do poço, deve ser levar em considerações os gastos com manutenção, operação e contas de energia ou diesel. Para o cenário da bomba elétrica, foi estimado que o custo médio anual é de R\$10.728,12, enquanto para a bomba à diesel esse valor foi de R\$25.847,57. Além disso, foi verificado que para os mesmos 468 poços de águas subterrâneas, a estimativa de emissão de CO<sub>2</sub> pela bomba elétrica é de 4.496,98 toneladas por ano, enquanto para bomba à diesel a massa é de 6.160,24 toneladas por ano. Desta forma, percebe-se que é mais viável utilizar o motor elétrico, uma vez que é mais viável economicamente e traz menos prejuízos ao meio ambiente por conta da sua baixa emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Para um investidor que quer implantar um poço, é importante analisar que um poço com motor a diesel custa aproximadamente

141% mais por ano, quando comparado a um poço com motor elétrico, além de poluir 37% mais.

Por fim, é necessário salientar que uma base de dados completa e atualizada é de caráter essencial. Haja vista, que auxiliaria tanto os órgãos ambientais que utilizam informações de águas subterrâneas, como empreendedores que pretendem estipular custos de implementação de projetos, que envolvem o uso dessas águas na região.

## REFERÊNCIAS

- AKELLA, A. K.; SAINI, R. P.; SHARMA, M. P.. Social, economic and environmental impacts of renewable energy systems. **Renewable Energy**, v.34, n.2, p.390-396, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.002>
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J.. **World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012.
- ALKMIN, V. B. N.. **Dimensionamento de um Reator de Lodos Ativados e Análise Tecno-Econômica das alternativas Para Suprimento Energético**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Hídrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Ranking de Tarifas**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021.
- ANP. Agência Nacional de Petróleo. **Oportunidade no Setor de Petróleo e Gás no Brasil**. Agência Nacional de Petróleo, 2018.
- BORETTI, A.; ROSA, L.. Reassessing the projections of the World Water Development Report. **Clean Water**, Basingstoke, v.2, n.15, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- BRASIL. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo**. CPRM, 2019.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho**. MCTI, 2021.
- BRASIL. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **IDHM Municípios**. PNUD, 2010.
- BRASIL. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. **Pesquisa de poços de águas subterrâneas**. SIAGAS, 2021.
- BRASIL. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Produto Interno Bruto**. SIDRA, 2018.
- COSTA FILHO, W. D.; GALVÃO, M. J. T. G.; LIMA, J. B.; LEAL, O.. **Noções básicas sobre poços tubulares: cartilha informática**. CPRM, 1998.
- CORRÊA, V. D.. **Levantamento de poços tubulares profundos perfurados no município de Concórdia – SC entre os anos de 1981 a 2006**. Monografia (Bacharelado em Gestão Ambiental de Municípios) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014.
- FAQUIN, V.. **Identificação e caracterização dos poços comunitários de captação de água subterrânea no meio rural do município de Medianeira**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C.. Cenário mundial dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v.15, n.8, p.79-97, 2020.
- MARGAT, J.; VAN DER GUN, J.. Groundwater around the World: A geographic synopsis. **CRC Press**, London, n.1, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1201/b13977>
- MINAS GERAIS. Companhia Energética de Minas Gerais. **Valores de Tarifas e Serviços**. CEMIG, 2021.
- MINAS GERAIS. **Deliberação n. 09, de 16 de junho de 2004**. Define os usos insignificantes para as circunscrições hidrográficas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: DOE, 2004.
- PERFURARTE. **Poço artesiano: quanto custa a perfuração e qual o preço por metro?**. Perfurarte, 2020.
- PERNAMBUCO. Fundação Joaquim Nabuco. **Águas subterrâneas: o que é e qual sua importância?**. FUNDAJ, 2020.
- PERRONI, J. C. A.; WENDLAND, E. C.. Avaliação da Eficiência Energética em Poços Profundos Utilizados para Abastecimento Público. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.11, n.3, p.123-134, 2006. DOI: <http://doi.org/10.21168/rbrh.v11n3.p123-134>
- PRATES, M. M.; LOURENCETTI, J.; OLIVEIRA, J. N.. O crescimento urbano e suas implicações na água subterrânea: O exemplo de Mirassol/SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18. **Anais**. 2012.
- RIO DE JANEIRO. Departamento de Recursos Naturais. **Águas Subterrâneas**. Niterói: DRM-RJ, 2005.
- SALES, L. F. P.; JÚNIOR, J. P. M.; FERREIRA, N. C.. Caracterização de poços tubulares profundos em ambiente sig com disponibilização via web. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18. **Anais**. 2015.
- SANTOS, I. F. S.; BERNAL, A. P. B.; FEST, G.; DINIZ, N.; COSTA, C.; VIEIRA, N. D. B.. Aplicação do método dos mínimos quadrados para resolução de testes de bombeamento de poços tubulares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS, 11. **Anais**. Brasília, 2015.
- SIMON, A. L. J.. O conhecimento das águas subterrâneas, sua

importância, conservação, preservação, evitando o seu desperdício no ambiente escolar. In: **O Professor PDE e os desafios da escola pública paranaense**. Santa Lúcia, 2012.

**UNESCO. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 4: O manejo dos recursos hídricos em condições de incerteza e risco**. Paris, 2012.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.