

Mapeamento Geotécnico da Bacia do Córrego Capetinga, Distrito Federal, para Identificação de Zonas de Recarga de Aquíferos

Luiz Eduardo Ferreira de Souza Hipólito

Estudante de graduação, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, luizeduardoferreira1803@gmail.com

Mariana dos Santos Diniz

Estudante de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, marianadiniz12@gmail.com

Katherin Rocio Cano Bezerra da Costa

Estudante de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, katherin.cano@aluno.unb.br

André Luís Brasil Cavalcante

Doutor em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: Considerando o intenso processo de expansão vivenciado nos centros urbanos, tem-se observado um aumento na impermeabilização das áreas correspondentes a zonas de recarga de aquíferos. Em vista da tamanha importância dos aquíferos e principalmente do processo de recarga, este trabalho tem como objetivo, o levantamento de parâmetros geotécnicos intrínsecos ao fenômeno, por meio de ensaios laboratoriais realizados com solo extraído da região de estudo, a Bacia do Córrego Capetinga, localizado na Fazenda Água Limpa-UnB, Distrito Federal. Por fim, esses dados serão interpretados com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica – SIG, a fim de delimitar as zonas mais influentes no processo de recarga por meio de uma análise espacial. Foi implementada uma metodologia dividida em seis etapas, sendo: 1) Escolha dos pontos de estudo na região, 2) Realização das sondagens, 3) Caracterização geotécnica, 4) Interpretação dos resultados, 5) Interpolação dos dados com utilização de um Modelo Digital de Elevação – MDE e 6) Identificação das zonas de recarga. Por fim, foi possível identificar que as regiões com maiores potenciais de recarga de aquífero correspondem às zonas que possuem silte de baixa plasticidade e solo orgânico, em função da elevada condutividade hidráulica desses tipos de solo.

PALAVRAS-CHAVE: Zonas de recarga, aquíferos, caracterização do solo, Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT: Considering the intense expansion process experienced in urban centers, an increase in the waterproofing of areas corresponding to aquifer recharge zones has been observed. In view of the great importance of aquifers and mainly the recharge process, this work aims to survey geotechnical parameters intrinsic to the phenomenon, through laboratory tests carried out with soil extracted from the study region, the Capetinga stream basin, located at Fazenda Água Limpa-UnB, Federal District. Finally, this data will be interpreted with the help of a Geographic Information System – GIS, in order to delimit the most influential zones in the recharge process through a spatial analysis. A methodology divided into six stages was implemented, being: 1) Choice of study points in the region, 2) Carrying out surveys, 3) Geotechnical characterization, 4) Interpretation of results, 5) Interpolation of data using a Digital Model of Elevation – MDE and 6) Identification of recharge zones. Finally, it was possible to identify that the most potential regions for aquifer recharge correspond to areas that have low plasticity silt and organic soil, due to the high hydraulic conductivity of these types of soil.

KEYWORDS: Recharge zones, aquifers, soil characterization, Geographic Information System.

1 INTRODUÇÃO

Aquíferos são formações geológicas subterrâneas capazes de armazenar e transmitir água. São como reservatórios naturais de água subterrânea que podem ser encontrados sob o solo em várias regiões do mundo. Essas formações aquáticas são compostas por camadas de rochas, solo ou sedimentos porosos, que têm a capacidade de acumular água em seus espaços vazios, conhecidos como poros. A água presente nos aquíferos pode ser proveniente de chuvas, rios ou outras fontes superficiais, que infiltra no solo e se acumula nas camadas permeáveis do subsolo. Em razão da percolação da água pelo solo, naturalmente ocorre um processo de filtração, tornando essas águas potencialmente potáveis, representando uma fonte segura para consumo humano, algo pertinente no cenário atual, onde tem-se observado uma grande demanda atrelada à escassez do recurso. Ainda, os aquíferos são fundamentais participantes do ciclo hidrológico, mantendo os cursos das águas superficiais estáveis e evitando transbordamentos em função do fenômeno de absorção (Adasa et al., 2015).

Além disso, a identificação desses aquíferos torna-se fundamental ao considerar que o intenso processo de expansão dos centros urbanos, principalmente nas últimas décadas, tem levado a impermeabilização de muitas áreas correspondentes a zonas de recarga, regiões que permitem que a água penetre no solo, reabastecendo as reservas subterrâneas e, assim, mantendo o fluxo de água no aquífero. A proporção de água que infiltra no solo após a precipitação pode variar de 50%, em ambientes naturais, para 30 a 15 % dependendo do tipo de ocupação do solo urbano (Mota, 1981; Hough, 1984). Para melhor compreensão da recarga de aquíferos, este trabalho visa o levantamento de parâmetros geotécnicos e hidráulicos intrínsecos ao fenômeno por meio de ensaios laboratoriais realizados em laboratório com solo extraído da região de estudo, Bacia do Córrego Capetinga, localizado na Fazenda Água Limpa-UnB, Vargem Bonita, Distrito Federal. Por fim, esses dados serão interpretados com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica – SIG, a fim de delimitar as zonas mais influentes no processo de recarga por meio de uma análise espacial.

2 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para o zoneamento das zonas mais influentes de recarga na área de estudo foi dividida em seis etapas: 1) Escolha dos pontos de estudo na região, 2) Realização das sondagens, 3) Caracterização geotécnica em laboratório, 4) Interpretação dos resultados e inserção dos dados no SIG (ArcGIS Pro, versão 3.0), 5) Interpolação dos dados com utilização de um Modelo Digital de Elevação (MDE) e 6) Identificação das zonas de recarga. Inicialmente, foi necessário determinar os pontos de interesse dentro da área de estudo. Considerando a magnitude da Fazenda Água Limpa - FAL (924,6 hectares) e o desconhecimento da região, utilizou-se, em um primeiro momento, um mapa pedológico para realizar um reconhecimento dos solos da região visando selecionar pontos em locais com diferentes classificações pedológicas. A Figura 1 apresenta o mapa com os pontos escolhidos em função da pedologia local. Com isso, esperava-se obter diferentes valores para os parâmetros geotécnicos de interesse e, conseqüentemente, observar diferentes comportamentos no que tange à recarga de aquíferos.

É válido ressaltar que os pontos escolhidos levaram em consideração não apenas a pedologia da região, mas também outro fator muito importante: a acessibilidade local. Este ponto foi fundamental, pois a etapa seguinte, referente às sondagens, foi realizada com trados mecanizados, por meio de caminhões equipados. Dessa forma, era necessário observar a presença ou não de estradas que tivessem capacidade para permitir a passagem dos veículos para realização da sondagem. Com os pontos selecionados, os quais atendiam aos quesitos de acessibilidade e variabilidade pedológica, foram realizadas as sondagens à trado. À medida que o trado perfurava o solo, retirava-se o material, observando sempre a variação de coloração e cheiro do solo, o que indicava uma possibilidade de mudança de material no perfil do furo.

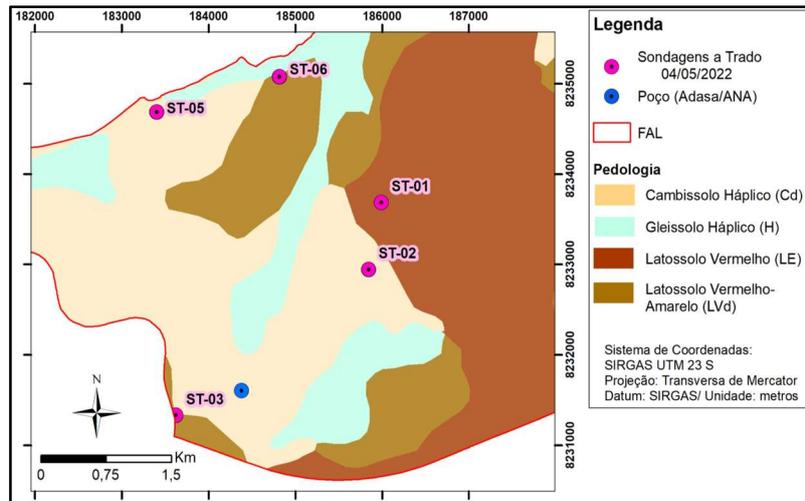


Figura 1. Mapa pedológico da Fazenda água Limpa e respectivos pontos escolhidos.

Este material foi coletado e posteriormente encaminhado para laboratório. A Figura 2, presente abaixo, contém imagens das sondagens com suas respectivas coordenadas.

ST-01	ST-02	ST-03	ST-05	ST-06
				
				
Observação: Prof.: 11.2 m	Observação: Prof.: 3.3 m	Observação: Prof.: 4m (até o NA)	Observação: Prof.: 4.2 m	Observação: Prof.: 7 m
Coordenadas*: Long: 185995,5 Lat: 8233689	Coordenadas: Long: 185847,4 Lat: 8232948	Coordenadas: Long: 183626,5 Lat: 8231334	Coordenadas: Long: 183404,4 Lat: 8234687	Coordenadas: Long: 184818,4 Lat: 8235077
* Sistema de Coordenadas SIRGAS 2000 Utm 23 Sul				

Figura 2. Sondagens à trado realizadas na Fazenda Água Limpa – FAL – UnB.

A terceira etapa consistiu na realização de ensaios para caracterização dos materiais. Para caracterizar o solo retirado dos furos, foram realizados o ensaio de Casagrande, a fim de obter os limites de liquidez e de plasticidade, segundo as normas NBR 6459 (ABNT, 2016a) e NBR 7180 (ABNT, 2016b), respectivamente. Foram ainda realizados os ensaios para obtenção da densidade dos grãos, de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 2021) e a classificação expedita para identificação de solos lateríticos. O método usado neste trabalho foi o desenvolvido por Nogami & Vallibor (1994). A fim de aumentar o reconhecimento da região, foram adicionados outros pontos à área de estudo. Inicialmente, realizou-se duas sondagens do tipo SPT, de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2020) e em seguida, foram adicionados sete pontos, dentre os quais, realizou-se a coleta de material para três, denominados poços de monitoramento. Estes pontos foram utilizados, pois correspondiam a poços já existentes na região, utilizados na tese de doutorado de Almeida (2023).

Assim sendo, para esses três pontos, não foram realizadas sondagens com uso de caminhões como no caso dos furos anteriores, mas sim sondagens manuais para coleta de material. O solo colhido também foi encaminhado para o laboratório, onde foram realizados além dos ensaios anteriores, o ensaio de condutividade hidráulica NBR 14545 (ABNT, 2000), para obter o parâmetro que expressa a facilidade com que o fluido se move pelo meio poroso. Este parâmetro está intrinsecamente conectado à propriedade granulométrica do solo, o que justificou a execução deste ensaio, em conformidade com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984). Os poços em que não houve coleta de material não ficaram desguarnecidos de informação, uma vez que os mesmos foram gerados e utilizados anteriormente como já mencionado. Esses poços receberam como nome a sigla VES, que significa *Vertical Electrical Sounding* (Sondagem Elétrica Vertical). A Sondagem Elétrica Vertical é um método geofísico para investigação de um meio geológico. O método é baseado na estimativa da condutividade elétrica ou resistividade do meio. A técnica funciona através da aplicação de uma corrente elétrica entre um par de eletrodos de corrente e a medição da diferença de potencial entre um par de eletrodos de potencial. A partir dessas medições, é possível calcular a resistividade do solo em diferentes profundidades e associar esse valor obtido a um tipo de solo, com bases em valores de referência na literatura.

A utilização desses pontos existentes foi importante para o procedimento da interpolação na construção do perfil geotécnico tridimensional, aumentando a representatividade espacial do local. A quarta etapa, corresponde a transferência desses dados obtidos para um Sistema de Informações Geográficas. Foi utilizado o *software Arcgis Pro* (versão 3.0, licença para estudantes). Este procedimento foi importante, pois com a inserção dos resultados de laboratório no programa, além de proporcionar uma melhor organização dos mesmos, possibilitou a criação de um banco de dados, que pode ser compartilhado e acessado em outras plataformas por outros usuários. Com isso, foi possível realizar a interpolação dos dados e a geração de um modelo geológico-geotécnico tridimensional da área de estudo, de maneira a viabilizar a determinação das zonas potenciais para recarga de aquíferos. Para a obtenção desse resultado tridimensional, foi necessária a utilização de um Modelo Digital de Elevação - MDE da região, capaz de representar a área por meio de uma malha contínua. Com base no mapa anterior, foi realizado um recorte deste MDE para permitir a interpolação em uma área mais específica, a qual incluía os pontos nos quais tinham-se informações, em função da profundidade. A Figura 3 detalha o MDE, seu respectivo recorte e os pontos utilizados para obtenção do modelo geológico-geotécnico.

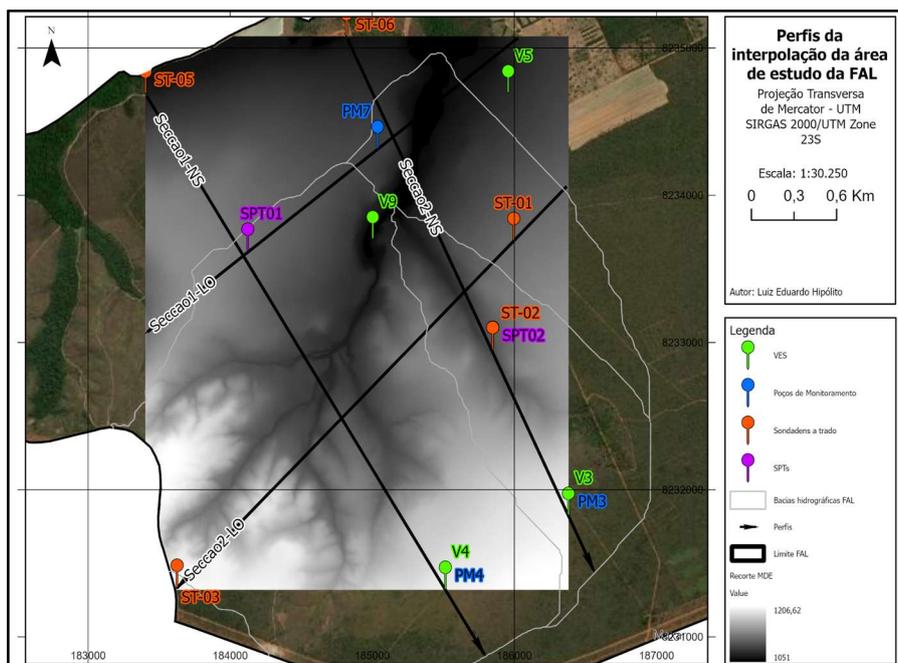


Figura 3. Mapa da área de estudo da Fazenda Água Limpa – FAL, com inserção dos novos pontos.

A ferramenta escolhida para essa realizar essa interpolação foi a krigagem. A krigagem (ou *kriging*) é uma técnica de interpolação espacial utilizada em geostatística para estimar valores desconhecidos em locais não amostrados dentro de uma área geográfica com base em valores amostrados por meio de pontos

conhecidos, realizando previsões ou estimativas em locais onde não há informações disponíveis. A krigagem leva em consideração a correlação espacial entre os pontos amostrados para produzir uma estimativa mais precisa nos locais não amostrados. A técnica se baseia no conceito de variograma, que mede a variabilidade espacial dos dados em função da distância entre os pontos de amostragem. Após a realização da krigagem, foram traçados quatro perfis (duas secções Norte-Sul e duas secções Leste-Oeste), para analisar a profundidade e a variação do tipo de solo. Estes perfis foram feitos perpassando pelos pontos de estudo, juntamente com os demais pontos da região (SPTs e PMs), possibilitando a análise estratigráfica, dentro da área do recorte do MDE.

3 RESULTADOS

A fim de possibilitar a análise estratigráfica dos perfis gerados, previamente foi necessário realizar o agrupamento de todos os dados obtidos para a região de interesse, conforme apresentado na Tabela 1. A reunião dessas informações foi de suma importância, uma vez que delimitou dentro da área de estudo as regiões com maior potencial de recarga de aquíferos. É importante destacar que dentre os valores encontrados para a condutividade hidráulica, apenas os referentes aos poços de monitoramento (PMs) foram obtidos experimentalmente. Os demais valores para o respectivo parâmetro foram retirados em literatura, considerando características semelhantes com os da região de estudo (Campos, 2015).

Tabela 1. Resultados obtidos em laboratório.

ST01				
Prof. (m)	Classificação SUCS	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 2	Orgânico	2,82	Laterítico (LA')	$1,0 \times 10^{-4*}$
2 - 11	Silte de baixa plasticidade	2,84	Não Laterítico (NA-NS')	$1,1 \times 10^{-5*}$
ST02				
Prof. (m)	Classificação SUCS	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 1	Orgânico	2,71	Laterítico (LA'-LG')	$1,0 \times 10^{-4*}$
1 - 3,3	Silte de baixa plasticidade	2,78	Não Laterítico (NA'-NS')	$1,1 \times 10^{-5*}$
ST03				
Prof. (m)	Classificação SUCS	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 2,1	Orgânico	2,71	Não Laterítico (NA-NS')	$1,0 \times 10^{-4*}$
2,1 - 4	Argila de baixa plasticidade	2,81	Não Laterítico (NA-NS')	$4,2 \times 10^{-10*}$
ST05				
Prof. (m)	Classificação SUCS	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 2	Orgânico	2,81	Não Laterítico (NA-NS')	$1,0 \times 10^{-4*}$
2 - 3,5	Silte de baixa plasticidade	2,94	Não Laterítico (NA-NS')	$1,1 \times 10^{-5*}$
3,5 - 4,2	Argila de baixa plasticidade	2,95	Não Laterítico (NS-NA')	$4,2 \times 10^{-10*}$

ST06				
Prof. (m)	Classificação SUCS	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 2,1	Orgânico	2,81	Laterítico (LA')	$1,0 \times 10^{-4}$ *
2,1 - 3,3	Silte de alta plasticidade	2,79	Não Laterítico (NS-NA')	$3,0 \times 10^{-8}$ *
3,3 - 7	Silte de baixa plasticidade	2,98	Não Laterítico	$1,1 \times 10^{-5}$ *
PM03				
Prof. (m)	Classificação granulométrica	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
1 - 1,65	Areia Fina	2,76	Não Laterítico	$1,06 \times 10^{-5}$
PM04				
Prof. (m)	Classificação granulométrica	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
0,6 - 0,8	Areia Fina	2,55	Não Laterítico	$2,42 \times 10^{-3}$
PM07				
Prof. (m)	Classificação granulométrica	Densidade dos grãos (g/cm^3)	Classificação MCT Expedita	Condutividade hidráulica (m/s)
0,5 - 0,7	Pedregulho e argila	2,64	Laterítico (LG')	$6,17 \times 10^{-6}$
VES03**				
Prof. (m)	Classificação SUCS			Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 0,5	Orgânico			$1,0 \times 10^{-4}$
0,5 - 3,5	Argila de baixa plasticidade			$4,2 \times 10^{-10}$
3,5 - 15	Silte de baixa plasticidade			$1,1 \times 10^{-5}$
VES05**				
Prof. (m)	Classificação SUCS			Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 0,5	Orgânico			$1,0 \times 10^{-4}$
0,5 - 16,5	Silte de baixa plasticidade			$1,1 \times 10^{-5}$
VES09**				
Prof. (m)	Classificação SUCS			Condutividade hidráulica (m/s)
0 - 0,5	Orgânico			$1,0 \times 10^{-4}$
0,5 - 10	Silte de alta plasticidade			$3,0 \times 10^{-8}$
10 - 20	Silte de baixa plasticidade			$1,1 \times 10^{-5}$

* Valores de condutividade hidráulica retirados da literatura.

** Resultados experimentais de Almeida (2023).

Após a reunião dos dados, torna-se possível a análise estratigráfica dos perfis gerados, identificando as zonas mais potenciais no fenômeno da recarga de aquíferos, circuladas em azul na Figura 4. Todos os perfis

gerados possuem um exagero vertical a fim de facilitar a visualização das camadas. Na seção 1 – NS, por exemplo, 1000 metros na distância possuem a mesma escala que 65 metros em altura, o que representa um exagero de aproximadamente 15 vezes do eixo y em relação ao eixo x.

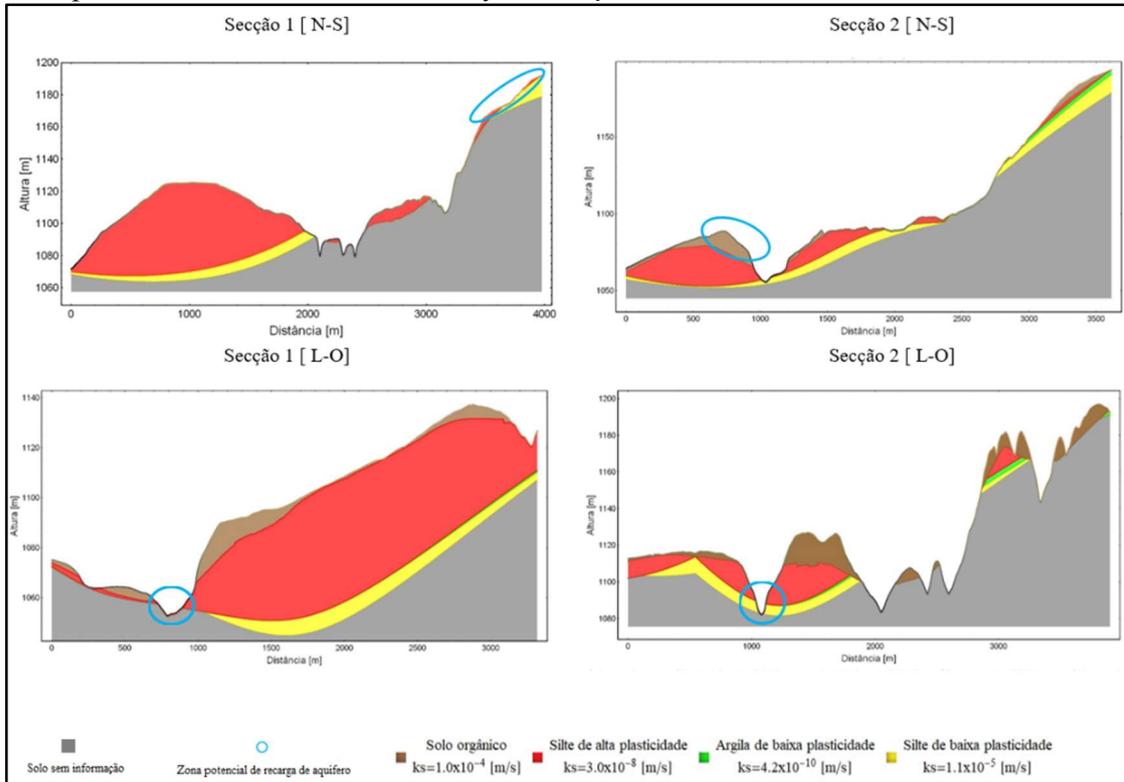


Figura 4. Perfis estratigráficos das 4 secções e demarcações das zonas de recarga de aquíferos.

Ao analisar graficamente os perfis estratigráficos gerados, fica possível identificar as zonas com maior potencial ao fenômeno da recarga de aquíferos. Na seção 1 - NS, a região que possui maior potencial de recarga é a região onde localiza-se o PM04. Nesta região do perfil, a camada mais superficial é composta por um material arenoso, seguido de uma outra camada predominantemente composta por silte de baixa plasticidade, solos que apresentam condutividades hidráulicas maiores. No entanto, considerando a altimetria local deste ponto, o potencial de recarga se vê comprometido, uma vez que a elevação do terreno propicia o escoamento da água. Ainda, é possível observar no perfil uma saliência que atinge uma distância horizontal de aproximadamente 2000 metros, composta por silte de alta plasticidade.

Esse resultado foi obtido visto que a interpolação gerada para esta seção considerou apenas os dados informados referentes aos pontos ST05 e PM04. Ao notar que a região ficou desguarnecida de informação, a krigagem associou dados do ponto mais próximo, o ST06, o que justificou a extensão dessa camada. Na Seção 1 – LO, a zona mais suscetível à recarga de aquíferos corresponde a região do PM07, onde há uma camada superficial pedregulhosa, conforme resultado de laboratório, seguida de uma camada predominantemente orgânica, a qual possui alta condutividade hidráulica. Associado a este fato, tem-se ainda uma altimetria local que favorece o escoamento para uma depressão próxima a sede da FAL, região também composta por solo orgânico. A seção 2 – NS possui logo em seu início uma camada com abundância de solo orgânico. Essa camada tem uma extensão que chega a quase 1000 metros, momento em que é notada uma diminuição de elevação do terreno, o que favorece o escoamento superficial.

Diferentemente do escoamento notado na seção 1 – NS, essa depressão possui uma camada de silte de baixa plasticidade, solo cujo condutividade hidráulica é elevada, propiciando no local a recarga direta. Além disso, a área apresenta proximidade com a região composta por gleissolo, em conformidade com o mapa pedológico apresentado. Esse tipo de solo encontra-se permanente ou periodicamente saturados por água, o que diretamente influencia o fenômeno da recarga. Foi possível identificar que a seção 2 – LO apresenta potencial de recarga natural, na região próxima a 1200 metros, onde é observada a presença de uma camada

de solo composta por silte de baixa plasticidade. Além disso, essa região equivale a uma mata de galeria, tipo de vegetação florestal que acompanha um curso de água, no caso, um dos braços do Córrego Capetinga, favorecendo o fenômeno da recarga indireta na região.

4 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida no estudo apresentou uma metodologia satisfatória e eficaz para a identificação das regiões mais suscetíveis às características da recarga de aquíferos. A utilização de técnicas inteligentes de interpolação espacial, como a krigagem, e integrando dados geotécnicos e hidrológicos ao Sistema de Informações Geográficas (SIG), foi possível gerar perfis tridimensionais detalhados da área de estudo. Essa abordagem permitiu a visualização estratigráfica das secções, facilitando a definição das zonas com maior potencial de recarga. Com isso, a contribuição acadêmica deste trabalho é significativa, pois oferece uma ferramenta robusta e replicável para a análise de recarga de aquíferos em diferentes regiões. Ainda, a metodologia pode ser adaptada e ampliada com a inclusão de outros parâmetros de interesse e a incorporação de outras análises como da declividade, regime pluviométrico e variações de uso e cobertura do solo, aumentando ainda mais a precisão e aplicabilidade dos resultados. A integração de dados em um SIG fornece um banco de informações acessível e de fácil compreensão, promovendo a colaboração entre pesquisadores, construindo uma base sólida para futuros trabalhos e aplicações práticas na preservação e uso eficiente dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2015). *Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no Distrito Federal*. Brasília.
- Almeida, J. (2023). *Monitoramento e modelagem de processos hidrológicos subsuperficiais e evapotranspiração em bacia de Cerrado*. Dissertação de Doutorado, Programa em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília/UNB, 214p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). NBR 7181. *Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2000). NBR 14545. *Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos por carga variável*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016a). NBR 6459. *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016b). NBR 7180. *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). NBR 6484. *Sondagens de simples reconhecimento dos solos com SPT*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). NBR 6508. *Determinação da densidade real dos grãos*. Rio de Janeiro.
- Campos, L. (2015). *Variação da resistividade elétrica para três solos não saturados*. Dissertação de Mestrado, Programa em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração Geotecnia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 146p.
- Hough, M. (1984). *Cities and Natural Process: towards a new urban vernacular*. 1a ed. [S.l.]: Croom Helm, 216p.
- Mota, F. (1981). *Planejamento Urbano e preservação ambiental*. 1a ed. Fortaleza, CE: Edições UFC, 158p.
- Nogami, J., Villibor, D. (1994) *Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais*. In: Anais do X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu. v.4, pp. 1293-1300.