XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DO SISTEMA AQUÍFERO QUATERNÁRIO EM SERGIPE: ESTUDO DE CASO NO SEHRES

Mariana de Fátima Sá de Jesus[1]*; Cássio Filipe Vieira Martins*[2]*; Roger Dias Gonçalves*[3]

RESUMO – Este estudo caracteriza o comportamento hidrodinâmico do Sistema Aquífero Quaternário (SAQ) no *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES), em São Cristóvão-SE, por meio da integração de análises sedimentares, monitoramento de nível d'água e modelagem numérica. Foram realizadas sondagens a trado, análises granulométricas e morfoscópicas, além da estimativa da condutividade hidráulica (K) pelos métodos de Hazen e Shepherd e do rendimento específico (Sy) pela fórmula de *Biecinski*. O monitoramento semanal de 15 poços, entre 2023 e 2024, subsidiou a aplicação do método *Water Table Fluctuation* (WTF), indicando recarga líquida média de 8,7% da precipitação anual (132,8 mm/ano). Esses dados fundamentaram a construção de modelos conceitual e numérico tridimensional no software Feflow, calibrados em regimes permanente e transiente. Os resultados evidenciaram boa concordância entre níveis observados e simulados, além de fluxo preferencial no sentido noroeste–leste/sudeste, em direção ao rio Poxim. A modelagem reproduziu as variações sazonais do nível freático, estimando recarga média de 9,4% (143,75 mm/ano). Os resultados demonstram a aplicabilidade do modelo como ferramenta de suporte à gestão sustentável das águas subterrâneas em aquíferos urbanos rasos no Nordeste brasileiro.

ABSTRACT – This study characterizes the hydrodynamic behavior of the Quaternary Aquifer System (SAQ) at the Sergipe Hydrogeological Research Site (SEHRES), in São Cristóvão, Sergipe, Brazil, through the integration of sedimentary analyses, groundwater-level monitoring, and numerical modeling. Hand-auger drilling, grain-size and morphoscopic analyses were performed, along with estimates of hydraulic conductivity (K) using the Hazen and Shepherd methods and specific yield (Sy) using the Biecinski equation. Weekly monitoring of 15 wells between 2023 and 2024 supported the application of the Water Table Fluctuation (WTF) method, indicating an average net recharge of 8.7% of annual precipitation (132.8 mm/year). These data supported the development of conceptual and three-dimensional numerical models in FEFLOW, calibrated under steady-state and transient conditions. The results showed good agreement between observed and simulated groundwater levels, as well as a preferential flow direction from northwest to east/southeast, toward the Poxim River. The model reproduced seasonal water-table fluctuations and estimated an average recharge of 9.4% (143.75 mm/year). The results demonstrate the applicability of the model as a support tool for sustainable groundwater management in shallow urban aquifers in Northeastern Brazil.

Palavras-Chave – *Sergipe Hydrogeological Research Site*; Modelagem numérica; Aquífero urbano.

[1]Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil, (79) 99801-1939, marianasa534@gmail.com
[2]Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 49107-230, SE, Brasil, (79) 98829-6190, filipe_geol@hotmail.com
[3] Departamento de Geologia (DGEOL) e Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH) da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 49107-230, SE, Brasil, roger.dias@academico.ufs.br

1 – INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas constituem a maior parcela da água doce líquida disponível no planeta, desempenhando papel essencial no equilíbrio dos sistemas hídricos. Sua importância torna-se ainda mais evidente em regiões sujeitas a longos períodos de estiagem, como o Nordeste brasileiro. No contexto nacional, milhões de poços tubulares constituem uma das principais fontes de abastecimento, atendendo uma parcela significativa da população e reforçando a relevância estratégica desse recurso para a segurança hídrica do país (Hirata, 2019).

Diante dessa dependência crescente, torna-se fundamental compreender os fatores que afetam sua disponibilidade e qualidade. Nesse cenário, mudanças climáticas associadas à exploração intensiva tem elevado a pressão sobre os aquíferos, causando rebaixamento do nível freático, maior risco de contaminação e impactos geotécnicos. Assim, o monitoramento contínuo e a adoção estratégias integradas de gestão são fundamentais para garantir o uso sustentável desse recurso, conforme o ODS 6 (Monção e Veloso, 2021).

Considerando essa necessidade de monitoramento contínuo e de gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos, torna-se igualmente importante dispor de metodologias capazes de quantificar e compreender a dinâmica dos aquíferos. Nesse contexto, o monitoramento do nível d'água em poços e à estimativa da recarga subterrânea se destacam, especialmente pelo uso do método *Water Table Fluctuation* (WTF) reconhecido por sua praticidade e confiabilidade. A recarga, embora difícil de medir diretamente, é fundamental para avaliar o comportamento hidrogeológico e a sustentabilidade dos aquíferos (De Vries e Simmers, 2002; Healy, 2010; Ronayne *et al*., 2017; Baum *et al*., 2018).

Para além das abordagens de monitoramento e estimativa direta da recarga, a modelagem numérica de fluxo subterrâneo se apresenta como uma ferramenta complementar e robusta para a análise integrada dos sistemas hidrogeológicos. Essa abordagem permite simular o comportamento do aquífero ao longo do tempo, incorporando variáveis como taxas de recarga e descarga, além de possibilitar a avaliação dos efeitos de intervenções antrópicas. Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos, implementado por meio do software FEFLOW, destaca-se por sua capacidade de representar sistemas hidrogeológicos complexos com elevada precisão (Gonçalves *et al*., 2019).

No contexto da modelagem numérica do fluxo subterrâneo, a integração entre dados de campo, monitoramento hidrogeológico e ferramentas de modelagem é fundamental para compreender a

dinâmica de aquíferos rasos em áreas urbanas. A combinação de métodos de estimativa de recarga, como o *Water Table Fluctuation* (WTF), com modelos numéricos permite avaliar de forma mais consistente os processos hidrogeológicos, contribuindo para a gestão sustentável das águas subterrâneas e o planejamento ambiental.

2 – OBJETIVO

Caracterizar a hidrodinâmica do Sistema Aquífero Quaternário (SAQ) no *Sergipe Hydrogeological Research Site* – SEHRES, em São Cristóvão–SE, por meio da integração de dados de monitoramento hidrogeológico e modelagem numérica do fluxo subterrâneo. Busca-se, adicionalmente, estimar a recarga líquida a partir do método WTF e compará-la aos resultados simulados, bem como analisar os parâmetros hidrodinâmicos e a dinâmica de fluxo do aquífero, visando subsidiar a compreensão do comportamento hidrogeológico de aquíferos urbanos rasos.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

O estudo foi conduzido no SEHRES, situado no Campus José Aloísio de Campos da Universidade Federal de Sergipe (UFS), em São Cristóvão–SE (Figura 1).

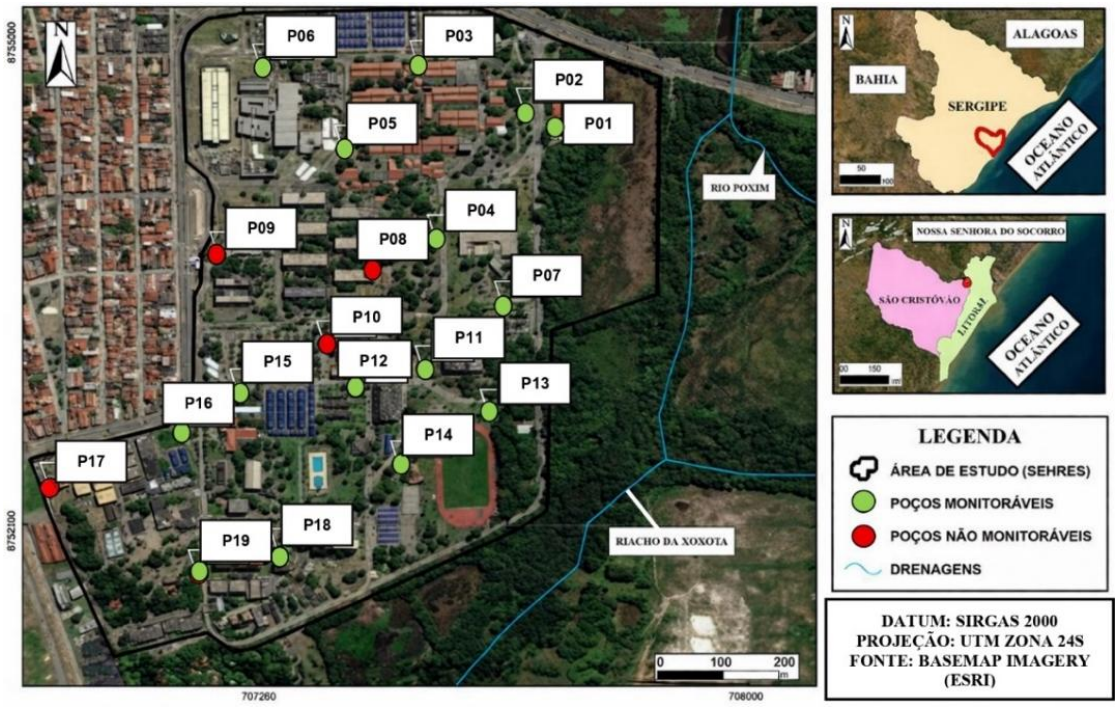


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, SEHRES – Campus Universitário "José Aloísio de Campos" – UFS.

A área compreende 19 poços tubulares implantados sobre o SAQ, dos quais 15 foram monitorados semanalmente no período de março de 2023 a março de 2024. Os poços apresentam profundidade média de 20 metros e vazões estabilizadas variando entre 2,0 e 13 m³/h (Saturnino et al., 2024).

No contexto geológico, o SEHRES encontra-se inserido em unidades cenozóicas, com destaque para o Grupo Barreiras, depósitos flúvio-lagunares e terraços marinhos pleistocênicos. Subjacente a essas unidades, ocorre a Formação Calumbi, pertencente ao Grupo Piaçabuçu, constituída majoritariamente por folhelhos, que configura a base hidroestratigráfica local do sistema raso, conforme ilustrado na Figura 2 (Campos Neto *et al*., 2007)

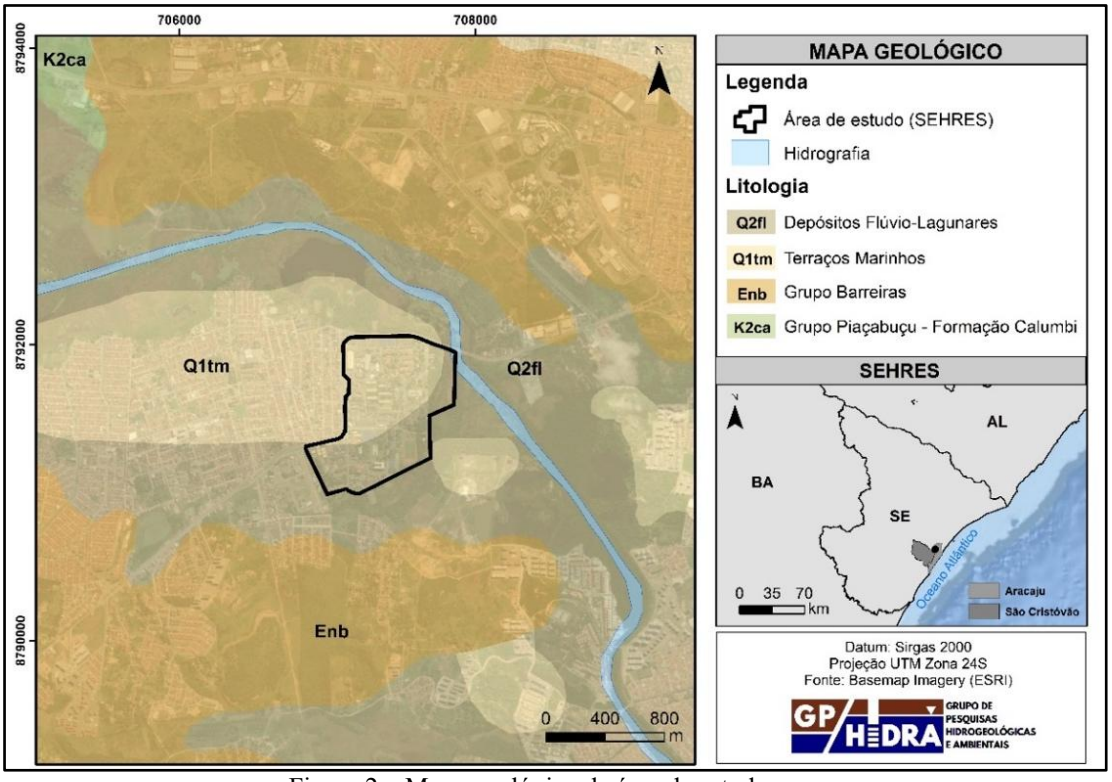


Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo.

Sob a perspectiva hidrogeológica, a área insere-se em unidades granulares constituídas por depósitos aluvionares e litorâneos, formados por sedimentos arenosos, síltico-argilosos e cascalhos. Essas características definem o sistema como aquíferos livres, heterogêneos e de baixa a média produtividade. O presente estudo concentra-se na porção rasa do Sistema Aquífero Quaternário, cuja recarga é controlada por fatores como precipitação, litologia, topografia e uso e ocupação do solo. Nesse contexto, o monitoramento piezométrico contínuo e a modelagem numérica permitem quantificar a recarga líquida e avaliar a resposta sazonal do aquífero sob condições urbanas.

3.2. Caracterização hidrogeológica e análises sedimentares

A caracterização hidrogeológica do SAQ foi conduzida com base em sondagens a trado, análises granulométricas e morfoscópicas, bem como na estimativa de parâmetros hidrodinâmicos. Foram realizadas cinco sondagens, das quais se obtiveram 49 amostras, posteriormente analisadas quanto à textura e composição, conforme classificações sedimentológicas consagradas na literatura. Amostras representativas foram submetidas à análise granulométrica a laser, cujos resultados serviram de base para a estimativa da condutividade hidráulica (K), empregando-se os métodos de Hazen e Shepherd.

3.3. Monitoramento e estimativa de recarga

O monitoramento do nível d'água foi realizado com frequência semanal em 15 poços, no período de março de 2023 a março de 2024. Os dados obtidos subsidiaram a aplicação do método WTF (*Water Table Fluctuation*), permitindo a estimativa da recarga líquida a partir das variações do nível freático. Posteriormente, essas informações foram integradas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), viabilizando a análise espacial dos resultados e a elaboração do modelo conceitual do sistema aquífero.

3.4. Modelagem e Calibração do modelo

A modelagem numérica do fluxo subterrâneo foi realizada por meio do software FEFLOW, fundamentado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O modelo foi estruturado a partir de dados georreferenciados, contemplando a definição de parâmetros hidrodinâmicos, como condutividade hidráulica (K), rendimento específico (Sy), além da atribuição de condições de contorno.

As simulações foram conduzidas em regimes estacionário (permanente) e transiente. A calibração do modelo ocorreu mediante o ajuste iterativo dos valores de K e da recarga, adotando-se o NRMSE inferior a 10% como critério de desempenho. No regime transiente, o modelo simulou um período de 365 dias, com ajuste do rendimento específico (Sy = 10%) e avaliação dos resultados por meio de métricas estatísticas, incluindo o coeficiente de correlação (ρ), coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio normalizado (NRMSE) e eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Potenciometria

Os dados de nível d'água, monitorados entre março de 2023 a março de 2024, evidenciaram um comportamento sazonal do aquífero, com elevação do nível freático entre abril e agosto e rebaixamento progressivo entre setembro e março, em consonância a distribuição temporal das precipitações. Esse padrão reflete a resposta direta do sistema ao regime pluviométrico regional (Figura 3).

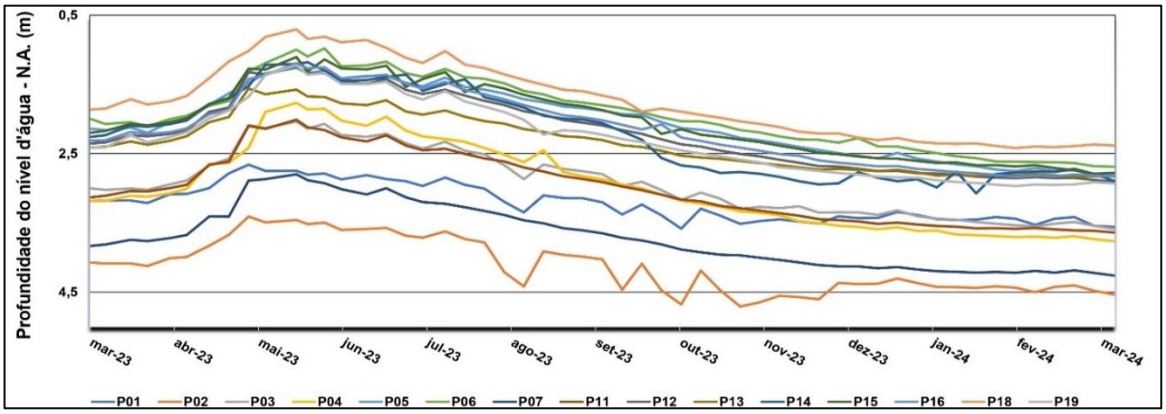


Figura 3 – Variação semanal do nível d'água subterrâneo em 15 poços do SEHRES entre 31/03/2023 e 31/03/2024.

As variações observadas entre os poços refletem, por sua vez, a influência de condicionantes locais, tais como diferenças de permeabilidade, variações topográficas e distintos padrões de uso e ocupação do solo. Tais fatores resultam em respostas hidrogeológicas mais acentuadas em setores com maior condutividade hidráulica. Os mapas potenciométricos indicaram, ainda, um padrão de fluxo subterrâneo preferencial orientado no sentido noroeste–leste/sudeste, com convergência em direção ao rio Poxim e ao riacho da Xoxota, conforme ilustrado na Figura 4.

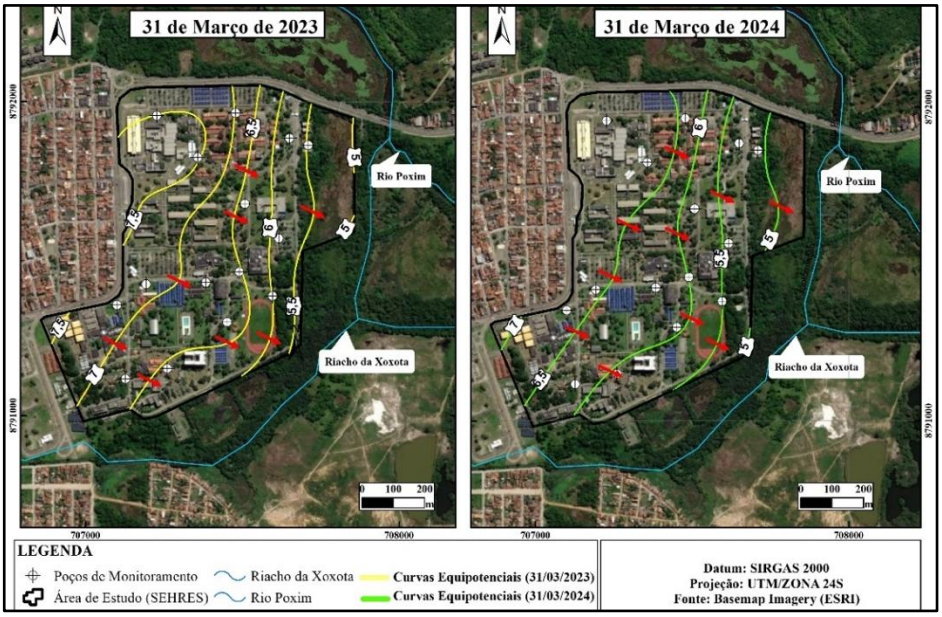
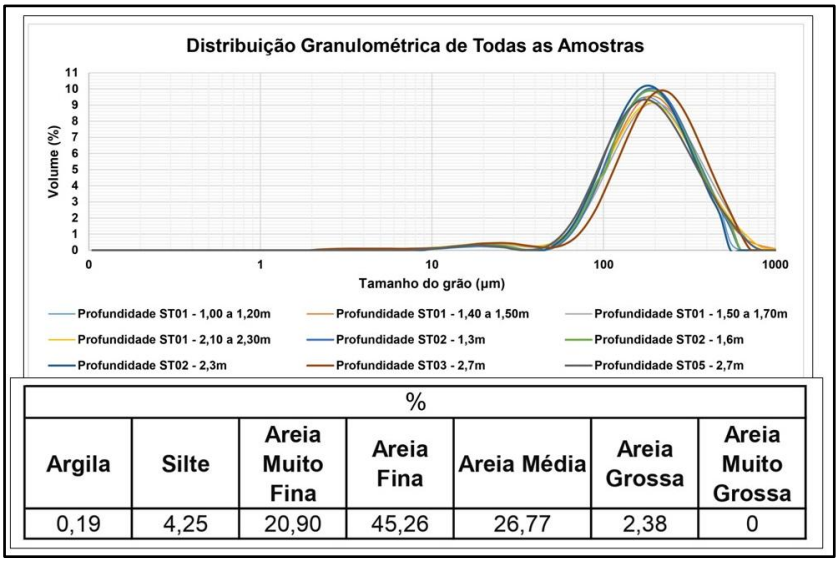


Figura 4 – Mapas potenciométricos do SEHRES correspondentes às medições de 31/03/2023 e 31/03/2024.

4.2. Caracterização do SAQ

As análises granulométricas e morfoscópicas indicaram a predominância de sedimentos arenosos quartzosos, bem selecionados, com elevada porosidade e boa capacidade de condução hidráulica, ainda que com heterogeneidades locais associadas à presença de frações finas. A distribuição granulométrica situou-se predominantemente entre 100 e 500 µm, com pico em torno de 200 µm, caracterizando areia fina e elevada uniformidade textural (Figura 5).

As estimativas de condutividade hidráulica variaram entre 10^{-5} e 10^{-4} m/s, refletindo a natureza granular do meio e sua variação textural. O rendimento específico (Sy) apresentou valores entre 11% e 15%, compatíveis com aquíferos livres arenosos e consistentes com a capacidade de drenagem por gravidade esperada para esse tipo de material. Esses resultados corroboram os parâmetros adotados na modelagem numérica do sistema aquífero.



%						
Argila	Silte	Areia Muito Fina	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Areia Muito Grossa
0,19	4,25	20,90	45,26	26,77	2,38	0

Figura 5 – Comparação entre todas as curvas de distribuição granulométrica.

4.3. Modelagem Hidrogeológica

O modelo conceitual definiu o SAQ como um aquífero livre, raso e poroso, com recarga controlada essencialmente pela precipitação e descarga direcionada aos corpos hídricos superficiais locais, em especial o rio Poxim e o riacho da Xoxota. O fluxo subterrâneo acompanha o gradiente topográfico regional, preferencialmente de noroeste para leste, sendo condicionado pela heterogeneidade litológica dos depósitos quaternários.

A modelagem numérica foi conduzida no software FEFLOW, considerando uma representação de camada única equivalente ao aquífero, com discretização tridimensional e incorporação de 15 poços de monitoramento como pontos de calibração. As condições de contorno incluíram carga hidráulica prescrita nas zonas de descarga (Dirichlet) e fluxo nulo nos limites laterais e de base (Neumann). Os limites de fluxo nulo foram definidos em setores compatíveis com divisores hidráulicos locais ou limites de baixa influência no domínio modelado.

A calibração em regime estacionário resultou na definição de duas zonas com condutividade hidráulica distintas, da ordem de 10^{-5} m/s, valores compatíveis com os valores estimados por métodos empíricos, evidenciando consistência entre os dados de campo e o modelo conceitual adotado (Figura 6a). O modelo apresentou elevado desempenho de calibração, com forte concordância entre níveis observados e simulados ($\rho = 0{,}989$; $R^2 = 0{,}978$; NRMSE = 4,6%).

No regime transiente, a simulação referente a um período de 365 dias reproduziu adequadamente a variabilidade sazonal do nível freático, com ajuste do rendimento específico (Sy = 10%). A recarga média estimada correspondeu a 9,4% da precipitação anual (143,75 mm/ano), em concordância com as estimativas obtidas pelo método WTF. A distribuição espacial da recarga evidenciou influência marcante do uso do solo, com menores valores associados às áreas urbanizadas e maiores taxas em setores com maior permeabilidade, conforme ilustrado na Figura 6b.

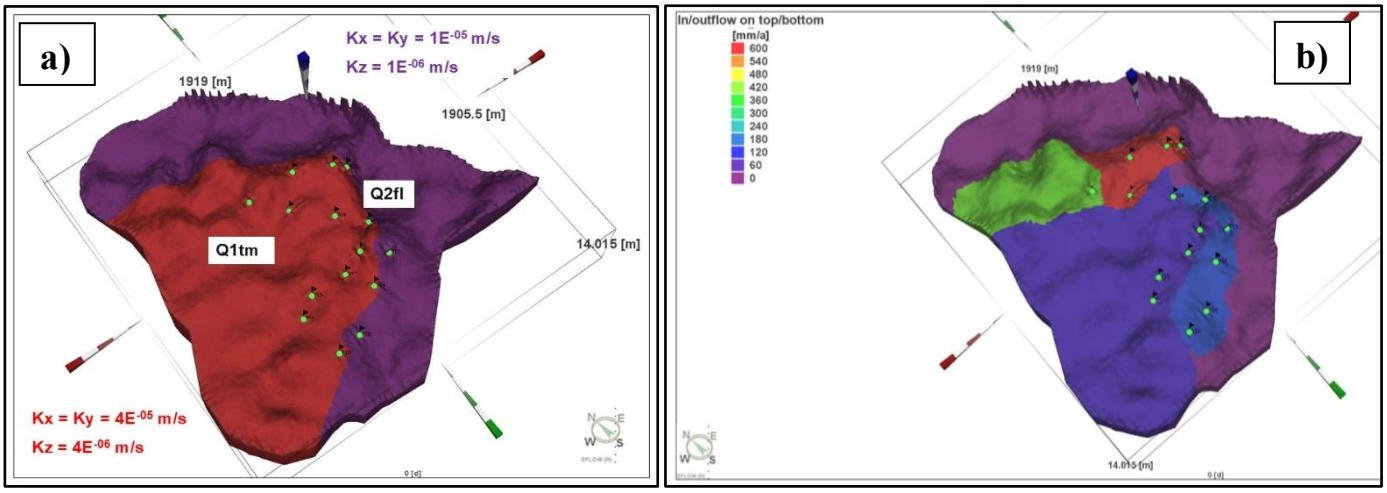


Figura 6 – (a) Distribuição espacial das zonas de condutividade hidráulica no aquífero. (b) Distribuição espacial das zonas de recarga subterrânea estimadas.

O desempenho do modelo em regime transiente foi considerado satisfatório, apresentando coeficiente de correlação ($\rho = 0{,}90$), coeficiente de determinação ($R^2 = 0{,}81$), eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE = 0,76) e NRMSE inferior a 10%, o que indica boa capacidade de representação da

hidrodinâmica do aquífero. O balanço hídrico resultante evidenciou um comportamento próximo ao equilíbrio, com predominância de fluxos de descarga associados às drenagens superficiais.

O mapa potenciométrico final revelou a elevação das cargas hidráulicas nas áreas de maior recarga e persistência de zonas de baixa potenciometria em setores com menor permeabilidade. Esse padrão reflete a influência combinada de fatores climáticos, geológicos e antrópicos na dinâmica do sistema aquífero, conforme ilustrado na Figura 7.

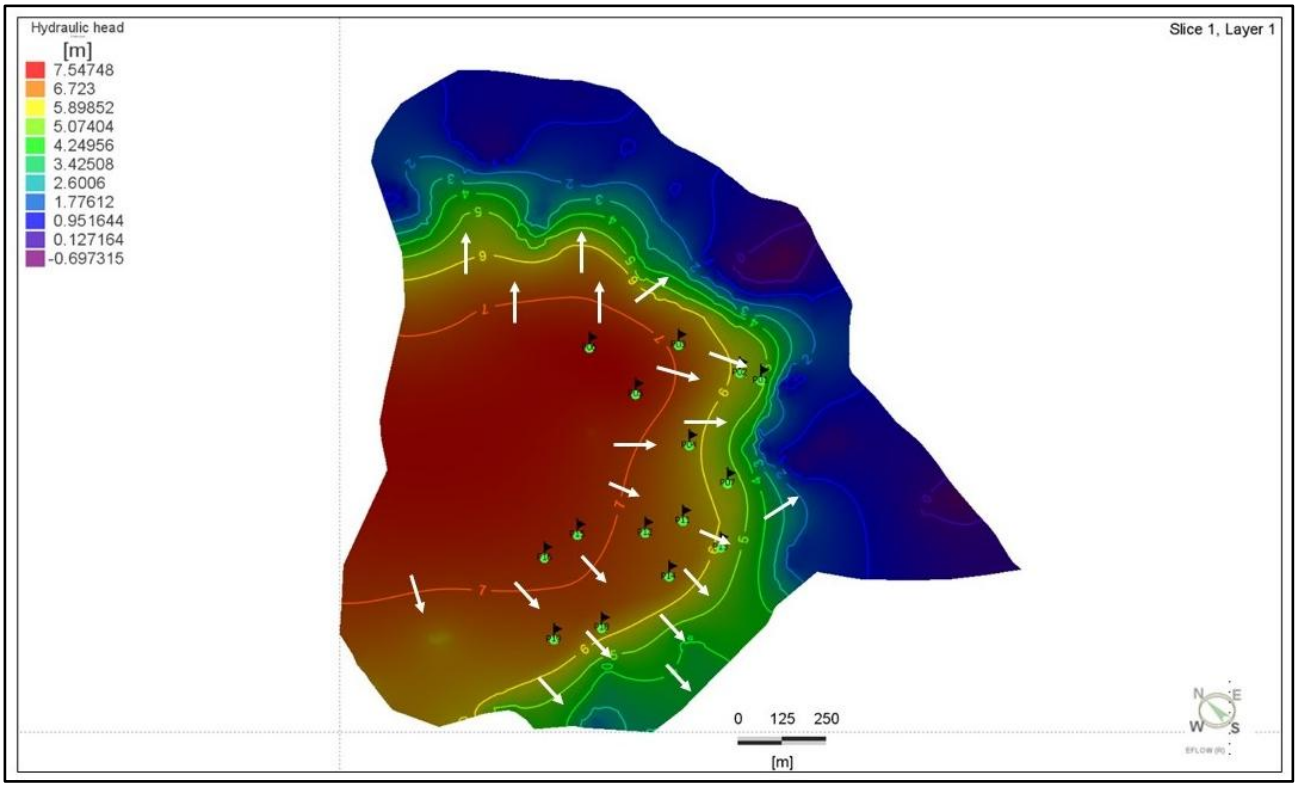


Figura 7 – Distribuição da potenciometria calibrada e setas dos vetores de direção de fluxo subterrâneo preferencial.

5 – CONCLUSÕES

O presente estudo integrou dados de monitoramento piezométrico, sondagens e análises granulométricas para o desenvolvimento de um modelo numérico do Sistema Aquífero Quaternário no SEHRES, capaz de representar de forma consistente sua dinâmica hidrodinâmica. A calibração em regime permanente apresentou elevado desempenho, com coeficiente de correlação ($\rho = 0{,}989$), coeficiente de determinação ($R^2 = 0{,}978$) e NRMSE de 4,6%, evidenciando expressiva concordância entre valores observados e simulados. Nesse contexto, foram obtidas condutividades hidráulicas da ordem de 10^{-5} m/s e rendimento específico (Sy) de 10%, compatíveis com aquíferos granulares rasos.

Em regime transiente, a simulação de 365 dias reproduziu adequadamente as oscilações sazonais do nível freático, apresentando desempenho satisfatório ($\rho = 0,90$; $R^2 = 0,81$; NSE = 0,76; NRMSE < 10%). A recarga média estimada foi de 9,4% da precipitação anual (143,75 mm/ano), em concordância com as estimativas obtidas pelo método WTF.

Os resultados obtidos evidenciam a robustez do modelo, reforçando sua aplicabilidade como ferramenta de apoio à gestão de águas subterrâneas em aquíferos urbanos. Adicionalmente, os resultados destacam a influência do uso do solo e da variabilidade climática na dinâmica do sistema aquífero, evidenciando a importância de abordagens integradas para sua compreensão e gestão sustentável.

REFERÊNCIAS

BAUM, C. A.; MANCUSO, M. A.; FRITZEN, R. R. (2018). "*Application of the WTF method in the study of recharge variability in urban aquifer*." Revista Geociências, v. 37, n. 1, p. 85-98.

CAMPOS NETO, O. P. A.; LIMA, W. S.; CRUZ, F. E. G. (2007). *Bacia de Sergipe-Alagoas. Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, 405-415p.

DE VRIES, J. J.; SIMMERS, I. (2002). "*Groundwater recharge: an overview of processes and challenges*." Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p.5-17.

GONÇALVES, R. D.; TERAMOTO, E. H.; ENGELBRECHT, B. Z.; ALFARO SOTO, M. A.; CHANG, H. K.; GENUCHTEN, M. T. (2019). "*Quasi-saturated layer: implications for estimating recharge and groundwater modeling*." Groundwater, v. 58, p. 235-247.

HEALY, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge.* Cambridge: Cambridge University Press, 256p.

HIRATA, R. (2019). *As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.* São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 9p.

MONÇÃO, A. G. M.; VELOSO, R. A. (2021). "*A importância das águas subterrâneas para a gestão integrada dos recursos hídricos: captação, controle e monitoramento na bacia do rio Verde Grande.*" Revista ABAS: Águas Subterrâneas, v. 35, n. 1.

RONAYNE, M. J.; ROUDEBUSH, J. A.; STEDNICK, J. D. (2017). "*Analysis of managed aquifer recharge for retiming streamflow in an alluvial river.*" Journal of Hydrology, v. 544, p. 373-382.

SATURNINO, N. M. R. S.; JESUS, M. F. S.; DIAS, L. S. S.; SANTOS, C. S. M.; GONÇALVES, R. D. (2024). "*Aplicação do método WTF para estimativa de recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe, Brasil.*" Scientia Plena, v. 20, n. 8. DOI 10.14808/sci.plena.2024.089909.