



Aspectos hidrogeológicos de área úmida geograficamente isolada baseados na integração de dados de Eletorresistividade e VANT

Matheus Felipe Stanfoca Casagrande, UNESP; Lucas Moreira Furlan, UNESP; César Augusto Moreira, UNESP; Vânia Rosolen, UNESP

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Em períodos de escassez hídrica, é urgente a realização de estudos que caracterizem o meio hidrogeológico como forma de apoiar políticas ambientais e gerenciamento dos recursos hídricos, haja vista o abastecimento público e seus usos múltiplos pela sociedade como as atividades agrícolas e industriais. Neste sentido, as áreas úmidas desempenham diversas funções, o que inclui armazenamento e transmissão de águas para aquíferos profundos. Porém, a caracterização hídrica destes ambientes é uma tarefa complexa dada a grande complexidade geológica e climática nas quais estes sistemas estão inseridos. Assim, através de ferramentas pouco invasivas como veículos aéreos não tripulados (VANTS) e geofísica (eletorresistividade), foi possível a caracterização superficial e subsuperficial de uma área úmida em contexto tropical de uma zona rural do interior paulista, com a identificação de alterações antrópicas graves e dos fluxos subsuperficiais através dos quais os sistemas aquíferos locais e regionais são recarregados.

Introdução

Áreas úmidas são ecossistemas comumente caracterizados pela hidromorfia de seus solos e biota adaptada a condições de alagamentos permanentes ou efêmeros (JUNK et al., 2014). Configuram ambientes de extrema importância do ponto de vista hidrológico em virtude de caracterizarem zonas sensíveis de contato direto entre as dinâmicas das águas superficiais e subterrâneas, sobretudo nas ditas áreas úmidas geograficamente isoladas – AUGI, cuja conexão hídrica com seu entorno é estritamente subsuperficial (HAYASHI et al., 2016). Haja vista a ocorrência mais frequente de secas prolongadas, como é o caso de regiões do interior paulista, a relevância de estudos e compreensão destes ecossistemas no âmbito do gerenciamento dos recursos hídricos é notória, especialmente em virtude dos serviços ecossistêmicos desempenhados pelas áreas úmidas como um todo, a exemplo da reserva e purificação das águas, recarga de aquíferos, controle de inundações (riscos naturais) e sedimentação, regulação climática, aspectos sócio-culturais, etc. (FINLAYSON et al., 2005). Estes ecossistemas têm sido amplamente discutidos, caracterizados e inventariados em regiões como América do Norte e Europa, porém no Brasil existem ainda inúmeras oportunidades inexploradas de pesquisa em áreas úmidas além daquelas inseridas no contexto das bacias do Pantanal e Amazônica, sobretudo pela grande variabilidade climática, geológica e ecológica do país.

Isso torna cada área úmida, de modo individual ou em conjuntos regionais, sistemas únicos do ponto de vista hídrico, haja vista a dinâmica e interação entre águas superficiais e subterrâneas, além da mobilização de matéria e energia (HAYASHI et al., 2016; RAINS et al., 2016). Comumente denominadas de brejos, pântanos, charcos, banhados e atoleiros, muitas vezes com vieses de subvalorização, as áreas úmidas de todo o mundo têm sofrido historicamente com o avanço de zonas agrícolas e urbanas através de mudanças no uso e ocupação do solo, o que gera alterações e destruições totais destes ambientes, com consequências severas aos sistemas hídricos regionais. Este fator antrópico, por sua vez, pode comprometer de forma acentuada a incapacidade de suprimento das demandas locais e regionais de recursos hídricos. Este é um problema recorrente em regiões populosas e de grande produção agrícola, como é o caso do interior do estado de São Paulo, onde a agricultura, um setor de extrema importância do ponto de vista socioeconômico e econômico, que deve ter seu desenvolvimento atrelado às boas práticas de manejo do solo que visem a preservação ambiental, o que inclui necessariamente as AU. O objetivo do presente trabalho é a aplicação de geotecnologias na determinação de serviços ecossistêmicos de uma AUGI referentes ao acúmulo e transmissão de água para sistemas aquíferos, além da avaliação de alterações no uso e ocupação do solo do entorno.

Área de Estudo

A AUGI de estudo é localizada na zona rural do município de Cordeirópolis-SP, a uma altitude de 653 m e definida pelas coordenadas -22° 29' 22" S e -47° 29' 14" W (Figura 1). O clima da região é do tipo tropical de altitude, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, o que denota a existência de secas agrícolas de maio a setembro (BLAIN e BRUNINI, 2007). No contexto da Bacia do Paraná, a soleira de diabásio, sobre a qual ocorre a AU, pertence à Formação Serra Geral, unidade eocretácea associada à ruptura do megacontinente Gondwana (MILANI et al., 2007). A intrusão ocorre em meio a rochas permianas do Grupo Passa Dois, mais precisamente na Formação Corumbataí, caracterizada pelo predomínio de argilitos e siltitos (LORETI JÚNIOR et al., 2014).

Metodologia/ Problema Investigado

Nas últimas décadas vem ocorrendo o emprego difundido de geotecnologias nos campos da geologia ambiental e hidrogeologia, como é o caso da geofísica e, mais recentemente, os veículos aéreos não tripulados (VANTS). Dentre os diferentes métodos geofísicos, a eletorresistividade é uma das ferramentas mais versáteis para aquisições rasas, cujo pilar é o parâmetro físico da resistividade elétrica que, por sua vez, engloba os

campos elétricos potenciais gerados pela passagem de uma corrente elétrica artificialmente induzida através do solo (KEAREY et al., 2002). Tal ferramenta quantifica a dificuldade ou não da propagação de tal corrente pelos materiais geológicos, cujas propriedades físicas, químicas e grau umidade desempenham um papel fundamental na variabilidade da resistividade elétrica no ambiente subsuperficial. De maneira complementar, a técnica da tomografia elétrica (ERT), utilizada neste trabalho, é frequentemente aplicada em investigações hidrogeológicas no contexto de sistemas aquíferos fraturados (MOREIRA et al., 2019), dada a abrangência lateral dos produtos gerados. Por fim, a disposição geométrica dos eletrodos seguiu o arranjo tipo Schlumberger em virtude de sua boa resolução e elevada razão sinal-ruído, além de produzir resultados bastante satisfatórios em estudos ambientais e hidrogeológicos (MOREIRA et al., 2016; ROBINSON et al., 2016). O método da eletrorresistividade foi aplicado na área através de 17 linhas de aquisição com dipolo de 10 m, de modo a cobrir a totalidade da porção central da AU com 16 linhas de 200 m cada, além de uma aquisição de 600 m, denominada linha 17, de orientação próxima N-S (Figura 2). Para a conversão dos dados de resistividade aparente, o processamento foi realizado através do software Res2Dinv (Geotomo Software) com a geração do modelo de inversão, cuja interpolação levou em consideração o Método Matemático dos Mínimos Quadrados, além de um avaliador da qualidade do modelo final com base no parâmetro *root-mean-squared* (RMS). Para as aquisições aéreas, foi utilizado o equipamento Phantom 4 V2.0 Pro DJI. O VANT possui receptor duplo GPS/GLONASS e sensor RGB DJI 1" CMOS Effective, com 20 megapixels, além de um sistema GPS embarcado sincronizado com a câmera e que permite que os voos ocorram de forma autônoma, de acordo com plano de voo elaborado. O software de processamento dos dados foi o Agisoft Metashape com a geração de ortomosaico e modelo digital de elevação (MDE) da área. No campo da fotogrametria, o uso de VANT's tem se mostrado bastante oportuno para uma ampla gama de pesquisas nas mais diversas áreas, o que inclui as geociências (RENNER et al., 2020).

Resultados

Após a etapa de processamento, um ortomosaico de alta resolução (2cm/pixel) foi gerado (Figura 3), criado a partir da combinação de três bandas (vermelha-verde-azul), e que representa uma área de 0,19 km². A imagem retrata toda a área central da AUGI e suas vertentes ocupadas pela agricultura, cuja alta resolução permite de forma facilitada a caracterização superficial da área de estudos. A Figura 3a aponta para o contraste nítido entre diferentes espécies vegetais com distintas adaptações ao solo hidromórfico, enquanto a Figura 3b mostra as porções de plantio de cana de açúcar (esquerda) e soja (direita). Uma vez que a aquisição dos dados foi realizada em período de maior umidade, a água superficial pode ser visualizada nas Figuras 3c e 3d, com a estrada rural alagada e a porção interior da AUGI, respectivamente. O MDE gerado (Fig. 4) aponta para desníveis de até 44 m, além de confirmar o isolamento

hídrico superficial, como uma bacia de ordem zero. Os perfis topográficos que cruzam a AU de maneira quase perpendicular ilustram as características morfológicas do local, embora alguns “ruidos”, como aparecem na imagem, são resultado da interferência da vegetação local, em especial do plantio de cana de açúcar nas regiões de vertentes.

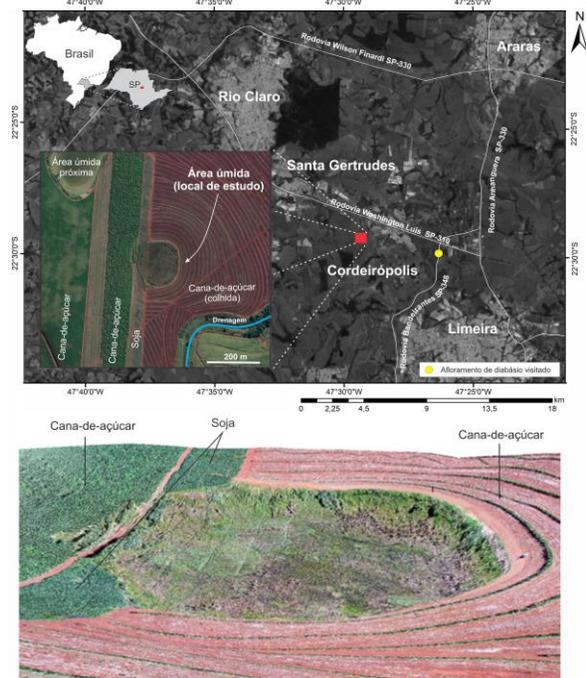


Figura 1 – Área úmida de estudo e arredores.

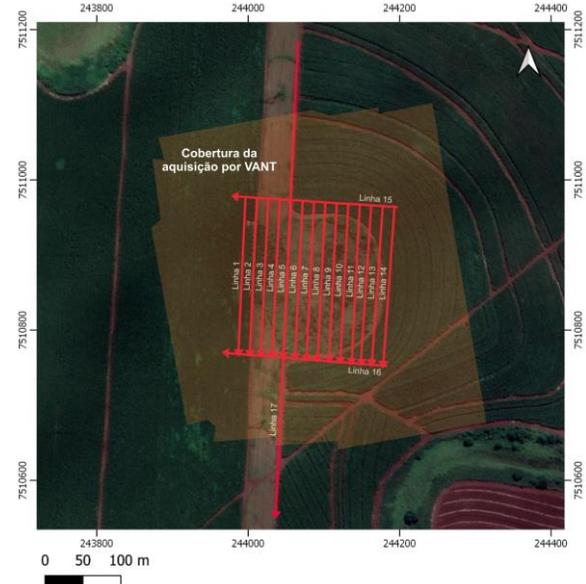


Figura 2 – Disposição das linhas de aquisição de eletrorresistividade através do resistivímetro Terrameter LS de fabricação da ABEM, com possibilidade de aquisições automáticas baseadas em configurações prévias. Em amarelo, área de captura por VANT.

Com base nos modelos de inversão gerados pelas linhas de aquisição 1 a 16 (Fig. 5), cujas profundidades reais de leitura foram de aproximadamente 45 m, é possível notar a existência de ao menos três regiões contrastantes em termos de valores de resistividade elétrica. A primeira delas é situada próxima à superfície, com espessura média de 7 m e definida por valores relativamente baixos ($<150 \Omega.m$), cuja geometria é estabelecida por uma forma tabular indicada por cores frias que se estendem até à superfície do solo da área úmida, com algumas exceções de leve aumento na resistividade em direção aos domínios das vertentes (modelos de inversão 1, 14, 15 e 16), justamente as linhas mais “distantes” do centro de maior saturação da área úmida. Logo abaixo da zona de elevada saturação/umidade, está localizada uma aparente zona de transição de aproximadamente 5 m de espessura, caracterizada por valores de resistividade elétrica da ordem de $200 \Omega.m$ a $500 \Omega.m$. Por fim, uma grande área identificada por cores quentes engloba a metade inferior dos modelos de inversão. Essa região, de valores de resistividade elétrica que variam de $500 \Omega.m$ a $4.000 \Omega.m$, possui extensão lateral em praticamente todas as aquisições. Sua espessura não pode ser definida apenas com base nas linhas de aquisição de 200 m, embora algumas delas apresentem uma certa tendência de decréscimo dos valores de resistividade nos últimos níveis de leitura. O fato, porém, é que esta anomalia tabular de alta resistividade elétrica não apresenta valores elevados de forma homogênea, como pode ser exemplificado nos modelos 1, 5 e 10, com este penúltimo caracterizado por um truncamento entre esta anomalia de alto valor e uma região verticalizada de baixa resistividade que conecta aos os níveis superiores. O modelo de inversão 17 (Fig. 6), por ter seu comprimento significativamente maior e, conseqüentemente uma aquisição mais profunda (160 m), possibilitou a determinação da espessura total da anomalia tabular de alta resistividade em cerca de 30 m e verticalização em 420 m, com uma zona inferior homogênea e de baixos valores ($<100 \Omega.m$), além de seu truncamento com uma anomalia de baixa resistividade verticalizada localizada a aproximadamente 400 m a partir da origem da linha.

Discussão e Conclusões

A aplicabilidade dos dados gerados pelo VANT é traduzida não apenas pelo mapeamento das espécies vegetais, conforme mencionado, mas também as condições de saturação do solo no centro da AUGI (de maneira direta pela presença da água ou pelo padrão de vegetação), além das áreas de conversão do uso do solo, como é o caso da estrada de acesso alagada que corta parte da AUGI (Figura 3c). Em outras palavras, tanto a ortomagem quanto o MDE em alta resolução gerados garantiram uma análise dos aspectos morfológicos da AUGI, bem como a variabilidade superficial de seus componentes como área alagável, presença de vegetação adaptada a condições de hidromorfia e alterações de origens antrópicas. Assim, o uso de ferramentas não invasivas como o VANT foi altamente satisfatório devido à facilidade de aquisição de dados, rapidez e baixo custo da técnica.

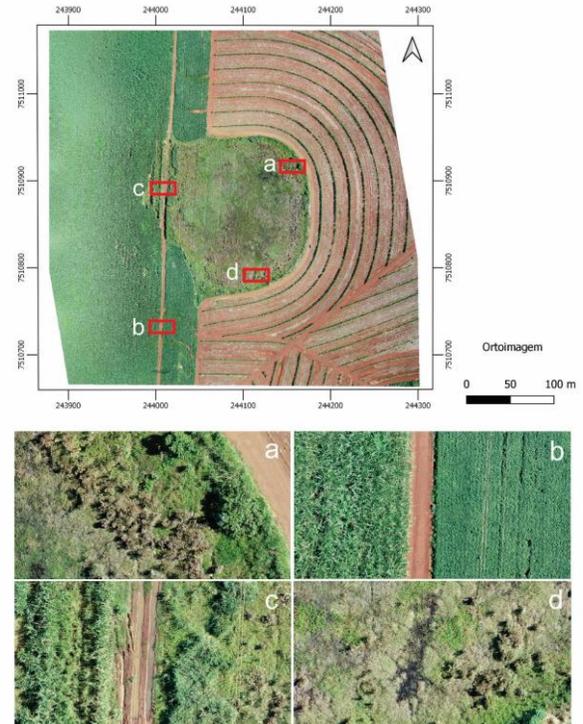


Figura 3 –Ortomosaico de alta resolução gerado por VANT. A) variabilidade florística, B) culturas agrícolas, C) alterações antrópicas e D) área alagada.

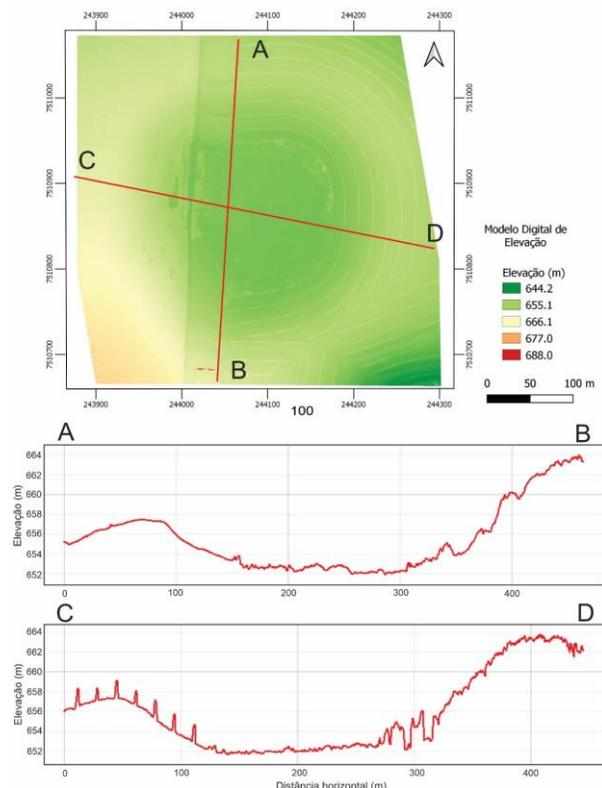


Figura 4 –MDE e perfis topográficos.

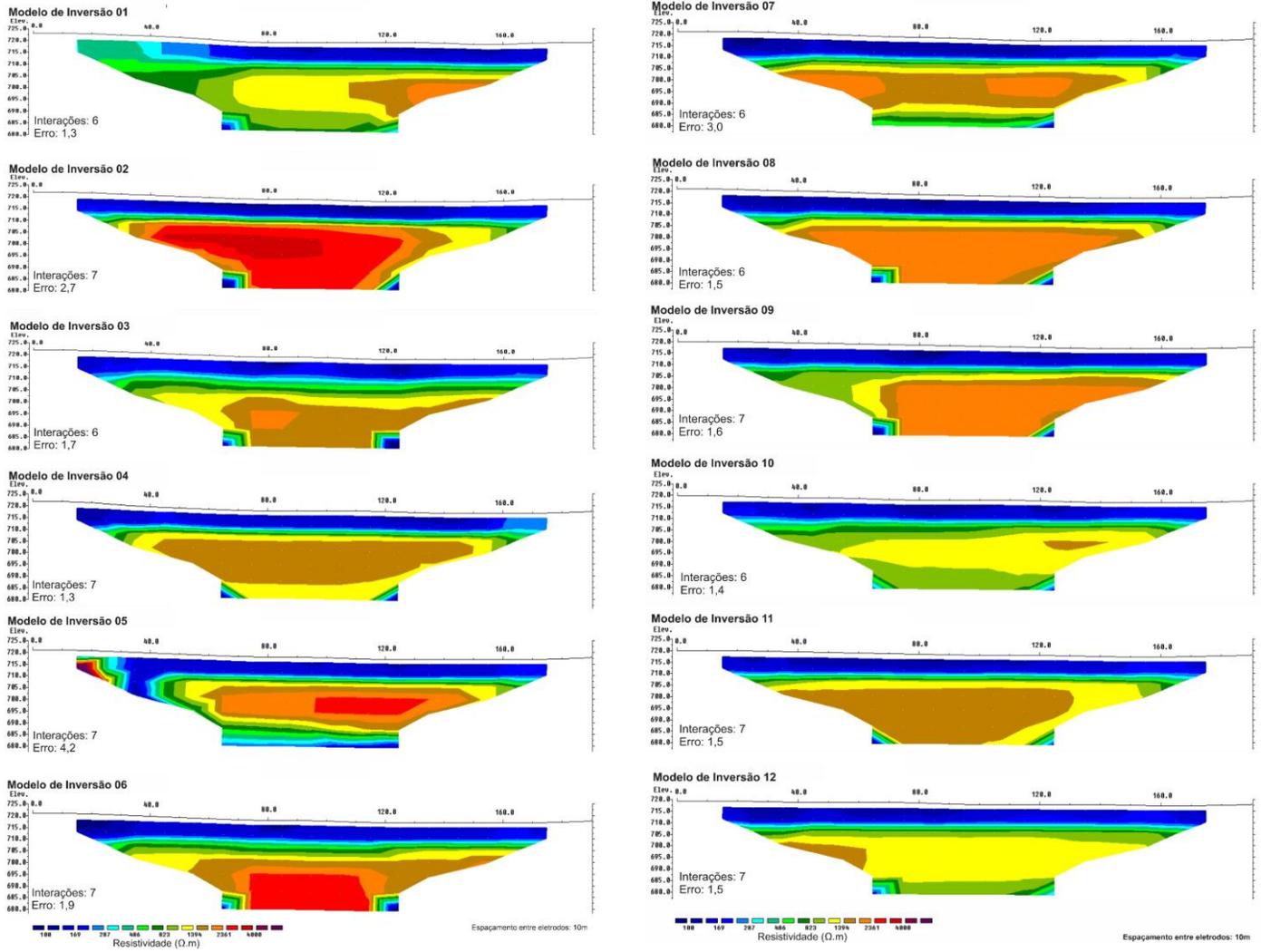


Figura 5 – Modelos de inversão, linhas de aquisição 1-16.

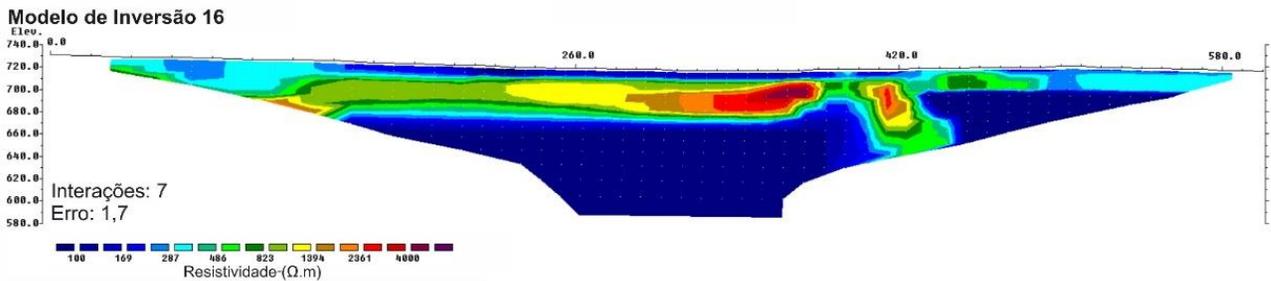


Figura 6 – Modelo de inversão, linha de aquisição 17.

Através do MDE, foi delimitada uma região denominada “potencial zona de expansão da área alagada” que abrange a estrada de terra circundante e partes mais baixas das vertentes caracterizadas pela topografia mais plana e compatível com o interior do perímetro da chamada “atual área úmida”, com sua vegetação típica e zonas alagadas em períodos mais úmidos (verão). Os dados geofísicos, por sua vez, apontaram para três domínios distintos, conforme já mencionados. O primeiro e mais superficial deles seria correlacionável ao solo de alta saturação do local, com a diminuição da umidade em regiões mais distais das vertentes, embora as condições de alta saturação estejam presentes ainda em níveis rasos sob o cultivo de cana de açúcar e com correspondência com a “potencial zona de expansão da área alagada” que recebe água por fluxos horizontais, conforme mostra a Figura 7. Este fato poderia ser correlacionado à possível diminuição espacial da AUGI em virtude do avanço da agricultura ou ainda por questões climáticas que evidenciaríamos uma mudança para condições atuais de menor umidade. Seja qual for o caso, a questão da vulnerabilidade, redução e total destruição das AU são problemas crônicos em várias regiões do planeta e que possuem efeitos na questão da regulação climática global, especialmente pelo fato das AU’s armazenarem grandes quantidades de carbono na forma de matéria orgânica (RAMSAR, 2016). A anomalia tabular caracterizada por altos valores de resistividade elétrica corresponde à soleira de diabásio intrudida nas rochas da Formação Corumbataí, esta última evidenciada pela zona de baixa resistividade elétrica em níveis mais profundos. A variabilidade dos valores observados para o diabásio pode ser compreendida pela existência de porções de rocha mais intemperizada (resistividade elétrica relativamente mais baixa, da ordem de 500 Ω .m a 1.000 Ω .m, como exemplificado pelas linhas 1, 10 e 12) e rocha menos alterada/fraturada (resistividade elétrica relativamente mais elevada, superior a 1.000 Ω .m, como nas linhas 2, 6, 8 e 9). Tal característica pode ser correlacionada com caminhos de fluxo locais bastante importantes no âmbito da recarga de aquíferos através destas zonas de elevada alteração. Outro fator, provavelmente de maior importância, reside nos fluxos através de fraturamentos, como pode ser observado claramente nos modelos de inversão 17 e 5. Este estudo de caracterização da hidrogeologia de uma AUGI contribui com as escassas pesquisas de tais ecossistemas no contexto nacional, além de fornecer parâmetros para o aprimoramento do gerenciamento ambiental e hídrico, com a indicação da importância hídrica desempenhada pelas AU.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo -FAPESP (Processo nº 2020/03207-9), além do apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Referências

- Blain, G. C.; Brunini, O., 2007. Análise da escola temporal de monitoramento das secas agrícolas e meteorológicas no estado de São Paulo. *Revis. Bras. de Meteorol.* 22 (2), 255–261
- Finlayson, C. M.; D’Cruz, R.; Davidson, N., 2005. Millenium ecosystem assessment, ecosystems and human well-being: wetlands and water. Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.
- Hayashi, M.; Van Der Kamp, G.; Rosenberry, D. O., 2016. Hydrology of Prairie Wetlands: Understanding the Integrated Surface-Water and Groundwater Processes. *Wetlands volume 36*, 237–254.
- Junk, W. J. et al. 2014. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 24, 5–22.
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I., 2002. An introduction to geophysical exploration. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho, 1st edition Oficina de Textos, São Paulo. Portuguese.
- Loreti Junior, R.; Sardou Filho, R.; Caltabeloti, F. P., 2014. Projeto polo cerâmico de Santa Gertrudes – SP, Rochas e minerais industriais; n.11..
- Milani, E.J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., França, A. B., 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás* 15 (2), 265–287.
- Moreira, C. A.; Helene, L. P.; Fernanda, T.G.; Hansen, M.A.; Malagutti Filho, W.; Dourado, J.C., 2019. Análise comparativa entre arranjos de tomografia elétrica no reconhecimento de estruturas de fluxo em aquífero fraturado em Caçapava do Sul (RS). *Pesqui. em Geocienc* 46 (1), 0710
- Rains, M. C.; Leibowitz, S. G.; Cohen, M. J.; Creed, I. F.; Golden, H. E.; Jawitz, J. W.; Kalla, P.; Lane, C.R.; Lang, M.W.; Mclaughlin, D.L. 2016. Geographically isolated wetlands are part of the hydrological landscape. *Hydrol. Process.* 30, 153–160.
- RAMSAR. (2016). An Introduction to the Ramsar Convention on Wetlands, 5th ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.
- Renner, L. C. et al. Desenvolvimento e montagem de VANT de asa fixa de baixo custo para suprir a demanda de ensino e pesquisa nas áreas de Geociências. *Terrae Didatica*, Campinas, SP, v. 16, n. e020002, p. 1-12, 2020
- Robinson, J.; Slater, L.; Johnson, T.; Shapiro, A., Tiedeman, C.; Ntarlagiannis, D.; Johnson, C.; Day-Lewis, F.; Lacombe, P.; Imbrigiotta, T.; Lane, J.; 2016. Imaging pathways in fractured rock using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Groundwater* 54 (2), 186–201.

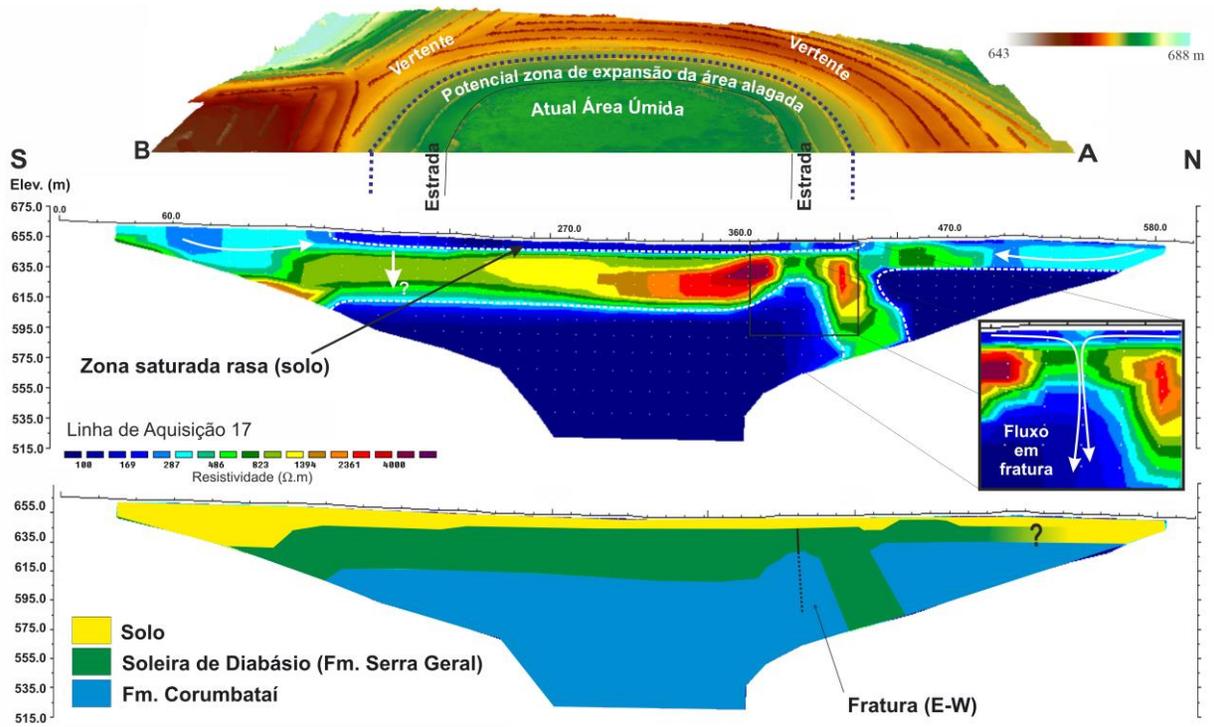


Figura 7 –Compartimentação do MDE com indicação da “potencial zona de expansão da área alagada” e sua correlação com o modelo de inversão, além da interpretação geológica da área de estudos.