Monitoramento de Plumas de CO2 utilizando MCSEM.

Jhonattas G. F. Barros*, Jéssica L. S. P. Itó**, Marcos W. C. Silva**

* Faculdade de Geofísica - Universidade Federal do Pará

** Programa de Pós Graduação em Geofísica - Universidade Federal do Pará

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no X Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 8 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X 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

Marine Controlled Source Electromagnetic Method (MCSEM) has proven to be highly effective in detecting zones with higher resistivity in the subsurface. Therefore, we simulate two 3D models of CO2 reservoirs and analyze how the MCSEM response curves behave in the presence of these plumes. Additionally, we simulate the evolution of the plumes over time at different frequencies. To conduct these simulations, we will use numerical modeling with nodal finite elements technique. Subsequently, to visualize the Amplitude and Phase responses of the electric field Ex, we will utilize MATLAB software.

INTRODUÇÃO

No relatório mais recente do Grupo III do IPCC, é enfatizado que a crescente concentração de dióxido de carbono (CO2) na atmosfera ao longo dos últimos anos está principalmente ligada à atividade humana, especialmente à queima de combustíveis fósseis. Diante disso, o sequestro e o armazenamento de CO2 em estruturas geológicas em subsuperfície na atualidade tem-se mostrado uma das melhores alternativas para reduzir o acúmulo desse gás na atmosfera (Ketzer et al. (2005)).

A aplicação do método MCSEM para o monitoramento de reservatórios de CO2 revela-se altamente viável devido à sua sensibilidade à variação da resistividade do subsolo (Kang et al. (2015)). Este método oferece uma abordagem promissora para a detecção e monitoramento do comportamento do CO2 injetado em reservatórios geológicos profundos. Além disso, a modelagem numérica surge como a principal estratégia para avaliar e prever a trajetória da pluma CO2 após sua injeção em reservatórios geológicos profundos (Souza et al. (2007)).

Várias pesquisas têm investigado a viabilidade do método MCSEM para o monitoramento de reservatórios de CO2. Kang et al. (2012) exploraram a possibilidade de monitorar o sequestro de CO2 em um aquífero profundo de salmoura abaixo de um mar raso. Park et al. (2013) modelaram um reservatório real com base em dados de poços divulgados pela ILD (Integrated Logging Data) na área de Sleipner. Constable & Stern (2022) analisaram o comportamento do reservatório usando MCSEM com o código de modelagem direta 3D (FDM3D CSEM). Ellis & Sinha (2010) avaliaram as respostas do MCSEM para diferentes níveis de saturação de CO2, utilizando um modelo 1D. Appriou et al. (2020) estudaram o comportamento de plumas de CO2 em um reservatório contendo falhas e zonas ladrões, utilizando o simulador 'TOUGH2', e avaliaram o desempenho do monitoramento utilizando gravidade de lapso de tempo de superfície e de poço.

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade do monitoramento de plumas de CO2 utilizando o método MCSEM. Considerando que a resistividade de uma pluma pode variar significativamente, de 50Ω.m a 100Ω.m, pretende-se analisar a evolução do comportamento da pluma ao longo do tempo, utilizando diferentes frequências, e observar como as curvas de Amplitude e Fase do MCSEM respondem a essas variações.

METODOLOGIA

Marine Controlled Source Electromagnetic (MCSEM) está entre os melhores métodos para a detecção de reservatórios na atualidade (Rezende et al. (2011)). Essa técnica é amplamente utilizada para visualizar meios ou camadas mais resistivas em subsuperfície, visto que ele consegue distinguir um meio mais resistivo que outro, tal como um reservatório saturado de óleo que pode ser 100 vezes mais resistivo que o meio onde está inserido (Luz et al. (2007)).

O levantamento de dados do MCSEM, conforme descrito por Miranda et al. (2009), consiste em um arranjo de receptores (Rx) alinhados em uma geometria inline ao longo do eixo X, juntamente com um dipolo elétrico horizontal (DEH) que é rebocado por um barco próximo ao fundo do oceano. Os transmissores criam ondas eletromagnéticas que interagem com a subsuperfície e geram reflexões parciais nas interfaces das camadas sedimentares, fornecendo informações que são registradas pelos dipolos receptores, também como foi observado por Souza Junior et al. (2015).

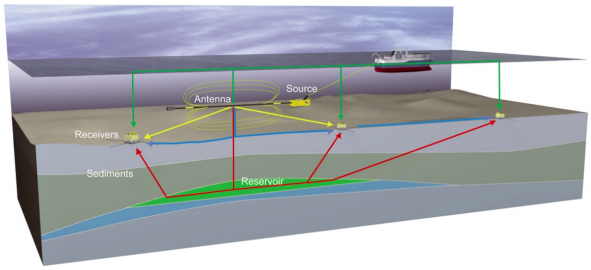

Figura 1 – Esquema de aquisição utilizando MCSEM. fonte: Castillo Reyes et al. (2016)

As equações de Maxwell, assim como outros métodos eletromagnéticos, governam a modelagem numérica. No contexto do MCSEM, as respostas obtidas da modelagem direta fornecem informações sobre o comportamento dos campos no meio de aquisição (Miranda et al. (2009)). Para a análise e interpretação dos dados coletados pelo MCSEM será abordado a técnica dos Elementos Finitos Nodais que se destaca por solucionar problemas físicos complexos (Akel Junior et al. (2008)). Essa abordagem divide a malha em inúmeros tetraedros, cada um composto por 4 nós. Em cada nó, são analisados os potenciais do vetor magnético e escalar elétrico, representando as variáveis a serem determinadas, proporcionando assim 4 graus de liberdade para cada nó da malha (Da Silva (2018)). Diante disso, para solucionar o problema linear foi utilizado uma ferramenta matemática chamada PARDISO. Para realizar os testes presentes neste trabalho, foi usado um algoritmo desenvolvido pelo Laboratório de Processamento Eletromagnético da UFPA (PROEM).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram desenvolvidos dois modelos sintéticos com a finalidade de ilustrar a influência da Pluma de CO2 nas curvas do Método MCSEM.

Modelo 1

No Modelo 1, apresentamos uma estrutura composta por apenas duas camadas: a primeira consiste na lâmina d'água, com 1.3 km de espessura e uma resistividade de 0.3 Ωm. Em seguida, temos a camada de sedimento, que se estende até o semi-espaço infinito, com uma resistividade de 1 Ωm. Para simular o monitoramento de uma pluma de CO2, criamos três estágios distintos.

No primeiro estágio, a pluma tem 100 m de espessura, uma resistividade de 100 Ωm e um diâmetro de 2 km, situando-se a uma profundidade de 1.7 km abaixo do assoalho oceânico, conforme ilustrado na Figura 2a e 2b. Com o decorrer do tempo, essa pluma se expande lateralmente criando assim os próximos estágios. No segundo estágio, a pluma apresenta um diâmetro de 4 km, como mostrado na Figura 2c e 2d. Já no terceiro estágio, o diâmetro da pluma atinge 8 km, conforme visualizado na Figura 2e e 2f.

Para esse modelo, utilizamos três transmissores (Tx), alinhados no eixo X nas posições -2km, 0km, 2km e em 4 frequências diferentes, sendo elas 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz. Visando uma melhor apresentação dos dados escolhemos o transmissor que melhor se adaptou as respostas, que foi o Tx1 localizado em -2km.

As Figuras 3, 4 e 5 mostram a amplitude e a fase do campo elétrico no Tx1 para todas as frequências, considerando o efeito da pluma de 2 km, 4 km e 8 km de diâmetro, respectivamente. Nos gráficos de amplitude do campo, também é apresentado o termo *noise floor* em 10^{-6} indicando até onde os dados são considerados significativos para análise. A partir desse nível, os dados exibem ruído presente nas medições e são descartados.

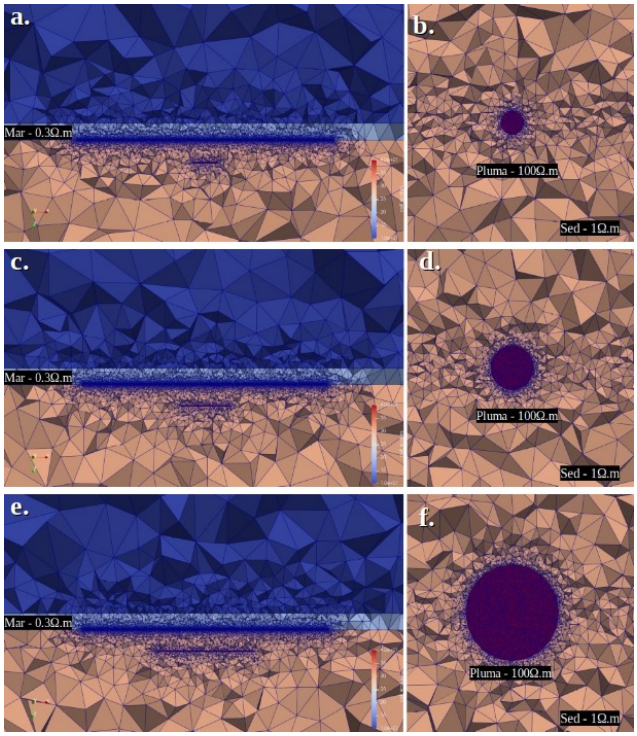

Figura 2 – Modelo 1 com 2 Camadas (Mar - 0.3 Ωm e Sedimento - 1 Ωm) com uma pluma de 100 Ωm com a) e b) 2 Km, c) e d) 4 km e e) e f) 8 km de diâmetro a 1.7 km de profundidade do assoalho oceânico.

Na Figura 3, observamos uma pluma pequena em seu estágio inicial. Podemos notar uma leve variação nas curvas de amplitude do campo. Essa variação do campo total em relação ao primário é atribuída ao efeito da pluma a 2 km. Nestes gráficos, as quatro frequências estão representadas juntas, com o transmissor deslocado em -2 km. Também é possível observar a fase, que acompanha a amplitude, apresentando uma variação semelhante do campo total em relação ao primário. Esta variação é atribuída ao contraste de resistividade entre o meio onde a pluma está inserida e a própria pluma, já que possuem resistividades diferentes. Vale ressaltar que, apesar de a pluma ter uma resistividade vinte vezes maior do que a rocha encaixante, ela influencia pouco nas curvas do campo total, devido ao seu tamanho reduzido. Ao longo do tempo, a resistividade da pluma permanece constante, sendo que apenas o seu tamanho varia.

Nas Figuras 4 e 5, observamos uma variação mais significativa nas curvas do campo total, com a fase acompanhando essa variação, devido ao aumento do tamanho da pluma, que se estende para 4km até 8 km de diâmetro. Também é perceptível uma instabilidade nas altas frequências, devido à relação entre profundidade do corpo e frequência.

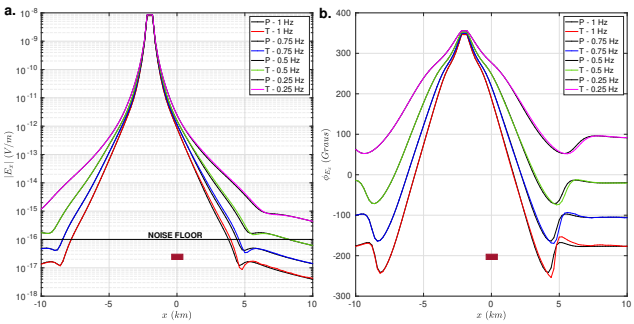

Figura 3 – Campo Elétrico analisado no Tx1 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e a b) fase tanto do campo total (T) quanto do campo primário (P) da pluma de 2Km.

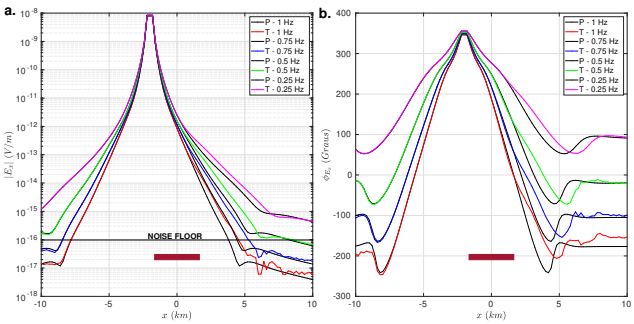

Figura 4 – Campo Elétrico analisado no Tx1 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e a b) fase tanto do campo total (T) quanto do campo primário (P) da pluma de 4Km.

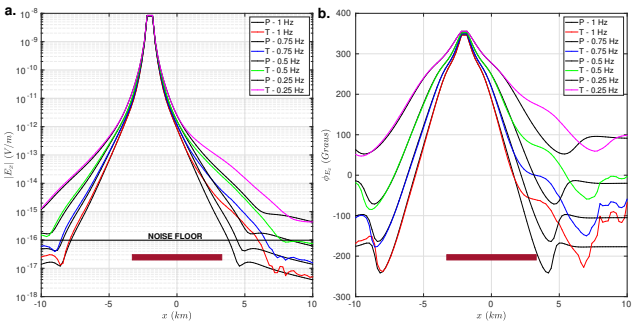

Figura 5 – Campo Elétrico analisado no Tx1 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e a b) fase tanto do campo total (T) quanto do campo primário (P) da pluma de 8Km.

As figuras 6 e 7 foram subdivididas em 4 gráficos cada. Os gráficos a e b de ambas mostram como a pluma evoluiu lateralmente na amplitude e na fase, respectivamente, nos três estágios em relação à curva do campo elétrico primário. As figuras continuam a mostrar as respostas do melhor transmissor, o Tx1, localizado em -2 km. Na Figura 6, destaca-se a frequência de maior estabilidade, de 0.25 Hz, enquanto na figura 7 é destacada a frequência que apresentou menor estabilidade, que foi a de 1 Hz.

Além disso, procedemos com a normalização da amplitude e fase do campo elétrico, gráficos c e d de ambas as figuras. Este procedimento implica na razão da amplitude das curvas do campo total, que refletem a influência de cada nível da pluma com o background representado por um meio sem plumas. Em relação à fase, realizamos a diferenciação entre a fase do campo total em cada nível da pluma e a fase do background, que representa um meio sem a interferência das plumas. Dessa forma, durante a normalização, isolamos apenas a influência das anomalias das plumas. Nos gráficos normalizados, podemos observar que essa anomalia causada pelas plumas aumenta progressivamente à medida que a pluma cresce lateralmente.

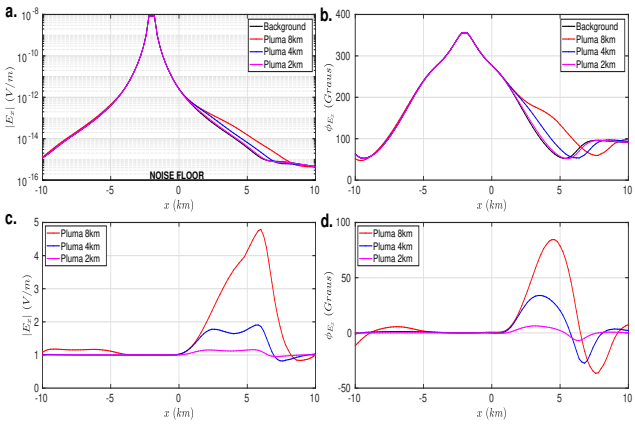

Figura 6 – Evolução da Pluma de CO2 analisada no Tx1, com o aumento das curvas do Campo Elétrico a 0.25Hz de frequência exibindo a) a amplitude e b) a fase. Mostra também a normalização c) da amplitude do campo e d) da fase.

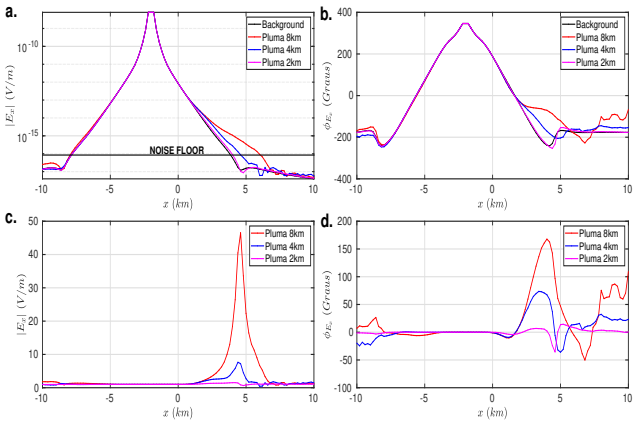

Figura 7 – Evolução da Pluma de CO2 analisada no Tx1, com o aumento das curvas do Campo Elétrico a 1Hz de frequência exibindo a) a amplitude e b) a fase. Mostra também a normalização c) da amplitude do campo e d) da fase.

Modelo 2

No Modelo 2, desenvolvemos uma estrutura composta por quatro camadas distintas. A primeira camada é a lâmina d'água, com 1 km de espessura e uma resistividade de 0.3 Ωm. Em seguida, temos a camada de sedimento, também com 1 km de espessura e uma resistividade de 1 Ωm. Logo após, encontra-se uma formação rochosa conhecida como trapa, ideal para abrigar um reservatório de CO2, com uma espessura de 0.4 km e uma resistividade de 5 Ωm. Por fim, a última camada consiste novamente em sedimento, com resistividade de 1 Ωm, estendendo-se até o semi-espaço infinito.

Para simular o monitoramento de uma pluma de CO2 dentro dessa formação rochosa, dividimos o processo em cinco estágios distintos. No primeiro estágio, a pluma possui 50 m de espessura, uma resistividade de 50 Ωm e um diâmetro de 1 km, localizando-se a uma profundidade de 1.3 km abaixo do assoalho oceânico. Com o passar do tempo, essa pluma se expande lateralmente e migra verticalmente em direção à superfície. No segundo estágio, o diâmetro da pluma aumenta para 2 km, com profundidade de 1.23 km. No terceiro estágio, o diâmetro atinge 4 km, com profundidade de 2.16 km. No quarto estágio, o diâmetro chega a 6 km, com profundidade de 1.09 km. Por fim, no quinto e último estágio, o diâmetro da pluma alcança 8 km, situando-se a uma profundidade de 1.02 km, conforme ilustrado na figura 8.

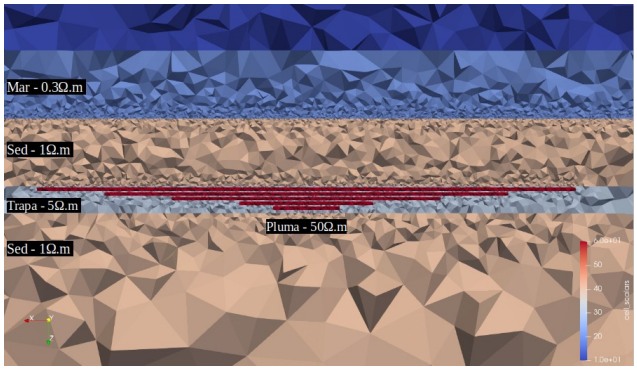

Figura 8 – Modelo Marinho Homogêneo e Isotrópico com 4 camadas (Mar - 0.3Ω.m, Sedimento - 1Ω.m, Trapa - 5Ω.m e Sedimento - 1Ω.m) exibindo os 5 niveis da pluma dentro da formação rochosa.

Para esse modelo utilizamos quatro transmissores (Tx), alinhados no eixo X nas posições 0km, 2km, 4km, 6km e em 4 frequências diferentes, sendo elas 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz. Visando uma melhor apresentação dos dados escolhemos o transmissor que melhor se adaptou as respostas que foi o Tx localizado em 4km.

As figuras 9, 10, 11, 12 e 13 apresentam a amplitude e a fase do campo elétrico no Tx3 para todas as frequências, considerando uma pluma no primeiro estágio que é o momento de sua injeção na figura 9, o segundo estágio na figura 10, o terceiro estágio na figura 11, o quarto estágio na figura 12 e o último estágio na figura 13. Ao longo dessas figuras, é possível analisar o efeito da pluma nas curvas do campo total à medida que ela varia tanto lateral quanto verticalmente. Essa análise detalhada proporciona uma compreensão abrangente do impacto dinâmico da pluma, destacando suas mudanças e influências no campo elétrico ao longo do seu desenvolvimento espacial e temporal.

Nas figuras de 9 a 13, também é perceptível que o tamanho da pluma influencia nossas respostas aumentando a amplitude das curvas . Isso ocorre porque a pluma mantém sua resistividade constante e, à medida que o tempo passa, ela se expande para cinco diferentes níveis, aumentando sua largura e consequentemente impactando nas curvas de amplitude e fase do campo total em relação ao primário. É importante destacar que a resistividade da pluma é dez vezes maior que a da rocha encaixante. Essa observação reforça a importância do tamanho da pluma no contexto das análises, destacando seu papel significativo na modelagem das respostas do campo elétrico. Além disso, também observamos a instabilidade das curvas de amplitude e fase nas altas frequências abaixo do *noise floor*.

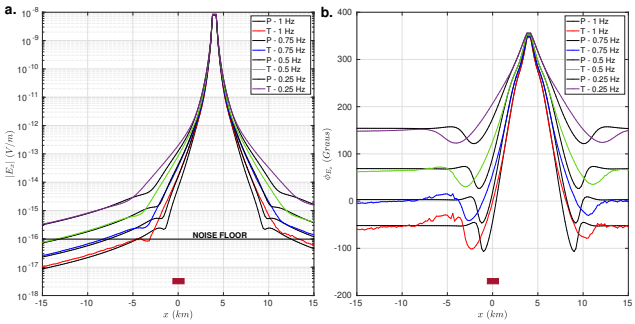

Figura 9 – Campo Elétrico analisado no Tx3 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e b) fase do campo total (T) e do campo primário (P), no nível 1.

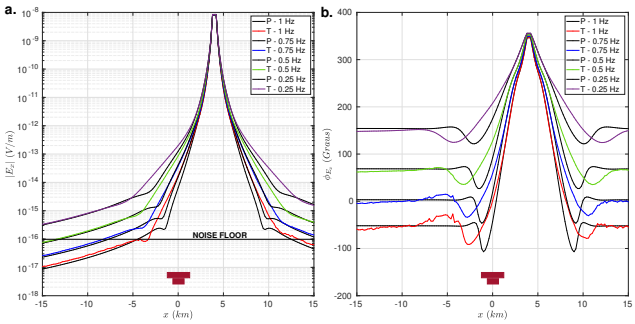

Figura 10 – Campo Elétrico analisado no Tx3 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e b) fase do campo total (T) e do campo primário (P), no nível 2.

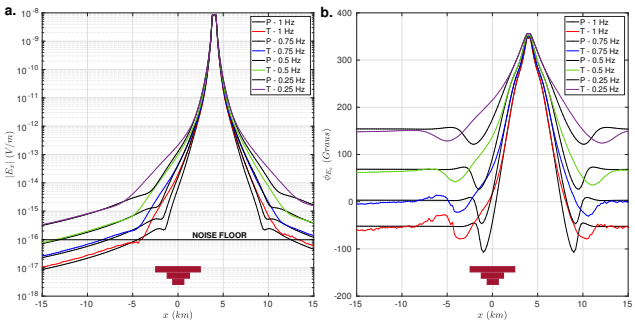

Figura 11 – Campo Elétrico analisado no Tx3 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e b) fase do campo total (T) e do campo primário (P), no nível 3.

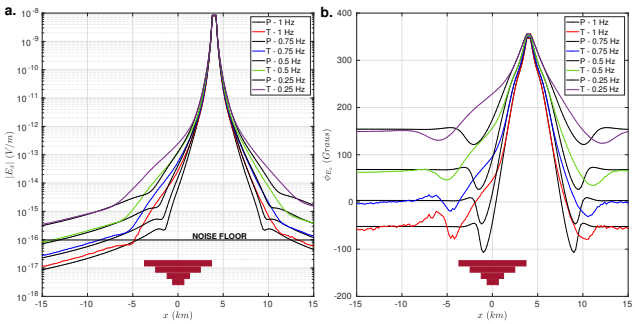

Figura 12 – Campo Elétrico analisado no Tx3 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e b) fase do campo total (T) e do campo primário (P), no nível 4.

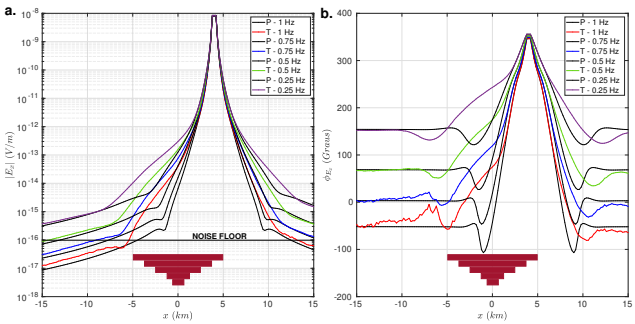

Figura 13 – Campo Elétrico analisado no Tx3 em quatro frequências 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz e 1Hz, exibindo a) a amplitude e b) fase do campo total (T) e do campo primário (P), no nível 5.

As figuras 14 e 15 foram subdivididas em 4 gráficos cada. Nos gráficos a e b de ambas mostram como a pluma evoluiu lateralmente e verticalmente na amplitude e na fase nos cinco estágios em relação à curva do campo elétrico primário. As figuras continuam a mostrar as respostas do melhor transmissor, o Tx3, localizado a 4 km. Na Figura 14, destaca-se a frequência de maior estabilidade, de 0.25 Hz, enquanto na Figura 15 é destacada a frequência que apresentou menor estabilidade, que foi de 1 Hz.

Além disso, realizamos a normalização da amplitude e fase do campo elétrico. Este procedimento implica na razão da amplitude das curvas do campo total, que refletem a influência de cada nível da pluma, com o background representado por um meio sem plumas. Em relação à fase, realizamos a diferenciação entre a fase do campo total em cada nível da pluma e a fase do background, que representa um meio sem a interferência das plumas. Dessa forma, durante a normalização, isolamos apenas a influência das anomalias das plumas. Nos gráficos c e d de ambas as figuras, podemos observar que essa anomalia causada pelas plumas aumenta progressivamente à medida que a pluma cresce.

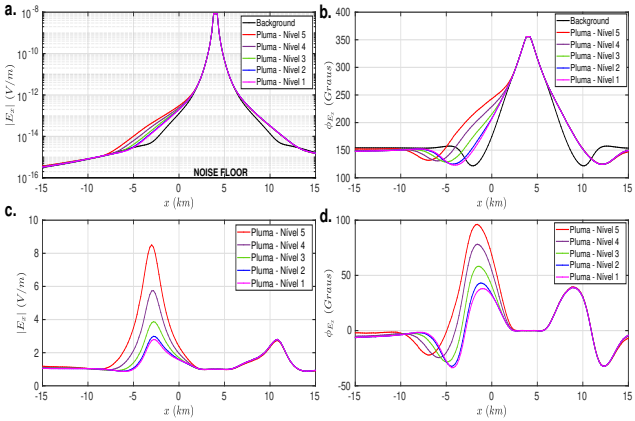

Figura 14 – Evolução da Pluma de CO2 analisada no Tx3, com o aumento das curvas do Campo Elétrico a 0.25Hz de frequência exibindo a) a amplitude e b) a fase. E também a normalização da c) amplitude e da d) fase.

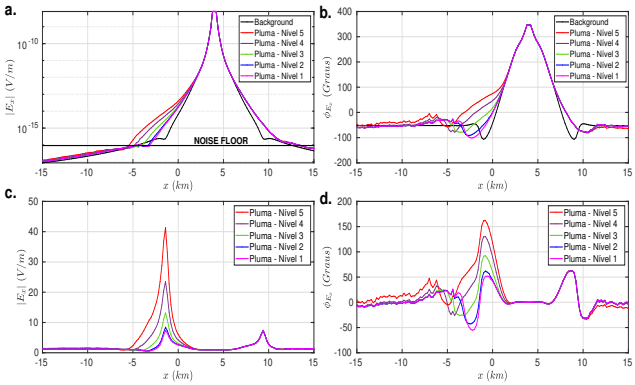

Figura 15 – Evolução da Pluma de CO2 analisada no Tx3, com o aumento das curvas do Campo Elétrico a 1Hz de frequência exibindo a) a amplitude e b) a fase. E também a normalização da c) amplitude e da d) fase.

CONCLUSÕES

O método MCSEM é altamente eficaz na identificação de meios resistivos, sendo sua eficácia diretamente proporcional ao tamanho do alvo que se pretende localizar.

No Modelo 1, temos uma pluma que migra verticalmente, enquanto no Modelo 2, a pluma varia tanto vertical quanto lateralmente. Observamos que, mesmo tendo uma resistividade muito maior do que o meio onde está inserida, as curvas do método apresentaram pouca variação inicialmente em ambos os modelos. Conforme a pluma aumenta tanto lateral quanto verticalmente, as curvas do método também aumentam significativamente, evidenciando a influência que a pluma exerce à medida que ela cresce.

Outro fato importante é que ambos os modelos foram melhor visualizados em baixas frequências, como a de 0.25Hz, que proporcionou a melhor resposta em ambos os casos, ficando acima do *noise floor*.

Para nossos próximos estudos, podemos investigar como as curvas do MCSEM se alteram em resposta à variação da resistividade da pluma. Além disso, podemos explorar os efeitos de diferentes geometrias de aquisição de dados. Outra possibilidade é aperfeiçoar a modelagem de trapas de forma mais realista. Também seria interessante analisar o comportamento da pluma em outros locais de armazenamento.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Programa de Educação Tutorial (PET) pelo suporte financeiro enquanto bolsista e o segundo e terceiro autor agradecem a Petrobras pela estrutura computacional fornecida. Agradecemos também ao Laboratório de Processamento Eletromagnético da UFPA (PROEM) pelo espaço disponibilizados.

Referências

Akel Junior, A. F. et al., 2008. Estudo sobre geração de malhas de elementos finitos para a modelagem numérica do método mcsem, TCC (Curso de pós-graduação em geofísica) - Universidade Federal do Pará, instituto de geociências, Belém – PA.

Appriou, D., Bonneville, A., Zhou, Q. & Gasperikova, E., 2020. Time-lapse gravity monitoring of co2 migration based on numerical modeling of a faulted storage complex, International journal of greenhouse gas control, vol. 95: 102956.

Castillo Reyes, O., Puente, J. d. l., Modesto, D., Puzyrev, V. & Cela, J. M., 2016. A parallel tool for numerical approximation of 3d electromagnetic surveys in geophysics, Computación y sistemas, vol. 20(1): 29–39.

Constable, S. & Stern, L. A., 2022. Monitoring offshore co2 sequestration using marine csem methods; constraints inferred from field-and laboratory-based gas hydrate studies, Energies, vol. 15(19): 7411.

Da Silva, H. F., 2018. Modelagem anisotrópica 3D de dados do método marinho de fonte eletromagnética controlada (MCSEM 3D), Ph.D. Thesis, Universidade Federal do Pará.

Ellis, M. & Sinha, M., 2010. The potential of controlled source electromagnetic surveying in co2 storage monitoring, in: SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG, SEG–2010.

Kang, S., Noh, K., Seol, S. J. & Byun, J., 2015. mcsem inversion for co2 sequestration monitoring at a deep brine aquifer in a shallow sea, Exploration Geophysics, vol. 46(3): 236–252.

Kang, S., Seol, S. J. & Byun, J., 2012. A feasibility study of co 2 sequestration monitoring using the mcsem method at a deep brine aquifer in a shallow sea, Geophysics, vol. 77(2): E117–E126.

Ketzer, J., Carpentier, B., Le Gallo, Y. & Le Thiez, P., 2005. Geological sequestration of co2 in mature hydrocarbon fields. basin and reservoir numerical modelling of the forties field, north sea, Oil & gas science and technology, vol. 60(2): 259–273.

Luz, E. d. C. et al., 2007. Modelagem unidimensional de dados do método mcsem com variação na resistividade da água do mar e na orientação dos sensores, Tese (Curso de pós-graduação em geofísica) - Universidade Federal do Pará, instituto de geociências, Belém – PA.

Miranda, D. d. C. et al., 2009. Modelagem do mcsem no domínio do tempo usando transformada discreta de fourier, Tese (Curso de pós-graduação em geofísica) - Universidade Federal do Pará, instituto de geociências, Belém – PA.

Park, J., Fawad, M., Viken, I., Aker, E. & Bjørnarå, T. I., 2013. Csem sensitivity study for sleipner co2-injection monitoring, Energy Procedia, vol. 37: 4199–4206.

Rezende, D. P. et al., 2011. Análise da componente magnética em dados mcsem 1d, TCC (Curso de pós-graduação em geofísica) - Universidade Federal do Pará, instituto de geociências, Belém – PA.

Souza, V. C. T. d. et al., 2007. Modelagem numérica de dados mcsem 3d usando computação paralela, Tese (Curso de pós-graduação em geofísica) - Universidade Federal do Pará, instituto de geociências, Belém – PA.