



Influência da batimetria em dados MCSEM *inline* 3D

Jéssica Larissa da Silva Pinheiro (Faculdade de Geofísica - UFPA)*, Marcos Welby Correa Silva (Programa de Pós-graduação em Geofísica - UFPA) e Hilton Farias da Silva (Programa de Pós-graduação em Geofísica - UFPA)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The Marine Controlled Electromagnetic Source (MCSEM) method has been used by the oil industry as an indicator of hydrocarbons. In this work, we simulated the MCSEM in the presence of a reservoir of HC and analyzed the effects of the bathymetry variation on the responses. The experiments were done using software that uses the finite element method 3-D in unstructured meshes. In the amplitude and phase results of the electric field we observed the influence of bathymetry and how it varies for the different frequencies.

Introdução

O método eletromagnético marinho de fonte controlada (MCSEM, em inglês) foi formulado inicialmente para auxiliar no estudo da litosfera oceânica rasa e na identificação de minas marinhas (CONSTABLE & SRNKA, 2007; EIDESMO et al., 2002).

Posteriormente, a partir dos anos 2000 foi descoberto o potencial do método MCSEM na detecção e mapeamento de corpos resistivos *offshore* e a partir daí foi moldado para a exploração de hidrocarbonetos. Desde então, a aplicação do método pela indústria tem crescido bastante, acompanhado pelo desenvolvimento teórico de modelagem e inversão no meio acadêmico e na indústria (STRACK, 2012; EIDESMO et al, 2002).

Um grande proveito tirado da característica do método em detectar corpos resistivos é o incremento de informação na interpretação sísmica (UM; ALUMBAUGH, 2007). Esta característica permite ao interprete diferenciar estruturas com potencial de reservatório de hidrocarboneto daquelas com resistividade comparáveis a resistividade do sedimento, oferecendo uma diminuição do risco exploratório (CONSTABLE & SRNKA, 2007).

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da batimetria na geometria *inline* em modelos geoeletricos com a presença de reservatório de hidrocarbonetos. Em geral, variações de batimetria perturbam as anomalias MCSEM quando analisadas na forma de amplitude e fase normalizadas do campo elétrico. Analisamos não só a batimetria como também as diferentes respostas da

amplitude e da fase do campo elétrico com a variação da frequência.

Metodologia

O MCSEM é usado na exploração de hidrocarbonetos em ambientes de águas profundas e ultraprofundas (EDWARDS, 2005) por ser sensível a diferença de resistividade elétrica entre o reservatório de hidrocarbonetos (mais resistivo) e as rochas sedimentares encaixantes.

Este método utiliza como fonte um dipolo elétrico horizontal (DEH) que é movido na direção *inline* a alguns metros acima do assoalho oceânico, emitindo um sinal de baixa frequência que pode variar entre 0.01 Hz e 10 Hz (ANDRÉIS & MCGREGOR, 2008). O sinal se propaga em todas as direções sofrendo influência das propriedades geoeletricas da água do mar, dos sedimentos e, quando for o caso, de corpos resistivos localizados em maiores profundidades.

Um conjunto de receptores dispostos no fundo oceânico captam o campo elétrico que por sua vez depende da geometria do arranjo transmissor-receptor e da resistividade das estruturas presentes em subsuperfície. A geometria do arranjo transmissor-receptor simulada neste trabalho é a *inline*, onde o transmissor está na direção do eixo x assim como os receptores e a componente elétrica medida é puramente radial. A Figura 1 exemplifica como é realizado uma aquisição de dados MCSEM.

O algoritmo utilizado para realizar a modelagem do MCSEM foi o software fem3Dmcsem desenvolvido por Hilton Silva, do CPGf/UFPA. O programa utiliza o método de elementos finitos 3D para malhas formadas por tetraedros (estrutura nodal). Neste método, os campos elétricos são resolvidos em suas componentes secundárias através de um potencial vetorial magnético e escalar elétrico seguindo o trabalho de SOUZA (2007).

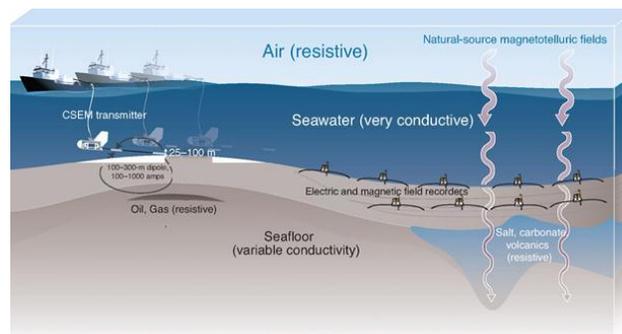


Figura 1 - Representação da aquisição de dados MCSEM. Fonte: hub.globalccsinstitute.com/

Resultados

O modelo geoeletrico tridimensional desenvolvido para este trabalho foi feito com a presença do reservatório de hidrocarboneto (Hc) e sem a presença do reservatório (Nohc), tanto para o modelo sem batimetria (Nobat) e com batimetria (Bat), utilizando lâminas d'água de 1.500 metros (L1) e de 10.000 metros (L2). O modelo mais complexo (Hc e Bat) está representado em seções x-z, y-z e x-y pelas Figuras 2a, 2b, 2c e 2d. Os outros modelos usados seguem o da figura 2, mudando apenas a lâmina d'água, a presença da batimetria e do reservatório. Para a geração desses modelos foram criadas malhas 3D não-estruturadas de elementos finitos usando o software TetGen. As quatro frequências usadas para o DEH foram 0.25Hz, 0.5 Hz, 0.75Hz e 1.0 Hz. Para estes modelos, a resistividade do ar vale 10^{12} Ohm.m, a do mar tem o valor de 0.3 Ohm.m, a resistividade da rocha sedimentar encaixante é de 5.0 Ohm.m e quando há o reservatório, ele tem resistividade de 100 Ohm.m.

A Figura 2c mostra a seção transversal x-y do modelo que apresenta elevação, cuja sua base está definida entre -12 km e 12 km e o topo entre -4 km e 4 km no eixo x e no eixo y, com espessura de 1 km. Já na Figura 2d temos a seção x-y do modelo com a representação do reservatório de hidrocarboneto disposto em eixo x entre -13 km e -3 km e no eixo y entre -3 km e 3 km a 1 km de distância entre a interface mar-sedimento e o seu topo, com 100 m de espessura.

Ao realizarmos a modelagem numérica, substituímos o transmissor móvel localizado no fundo oceânico por transmissores fixos dispostos em diferentes posições e 150 receptores distribuídos de -30 a 30 km no assoalho oceânico. Além disso, usaremos transmissores em três diferentes posições ao longo da direção inline: $x = -12$ km (Tx1); $x = -4$ km (Tx2); e no ponto central $x = 0$ km (Tx3). Esses transmissores estão localizados 30 metros acima do fundo oceânico.

Nos nossos experimentos, usamos malhas com no máximo 300.000 nós, pois estávamos limitados à uma estação de Dell T3500 com 24GB de memória. Usando o pacote Pardiso e o compilador Intel Fortran, cada experimento demandava 1,5 horas de processamentos de 3 transmissores.

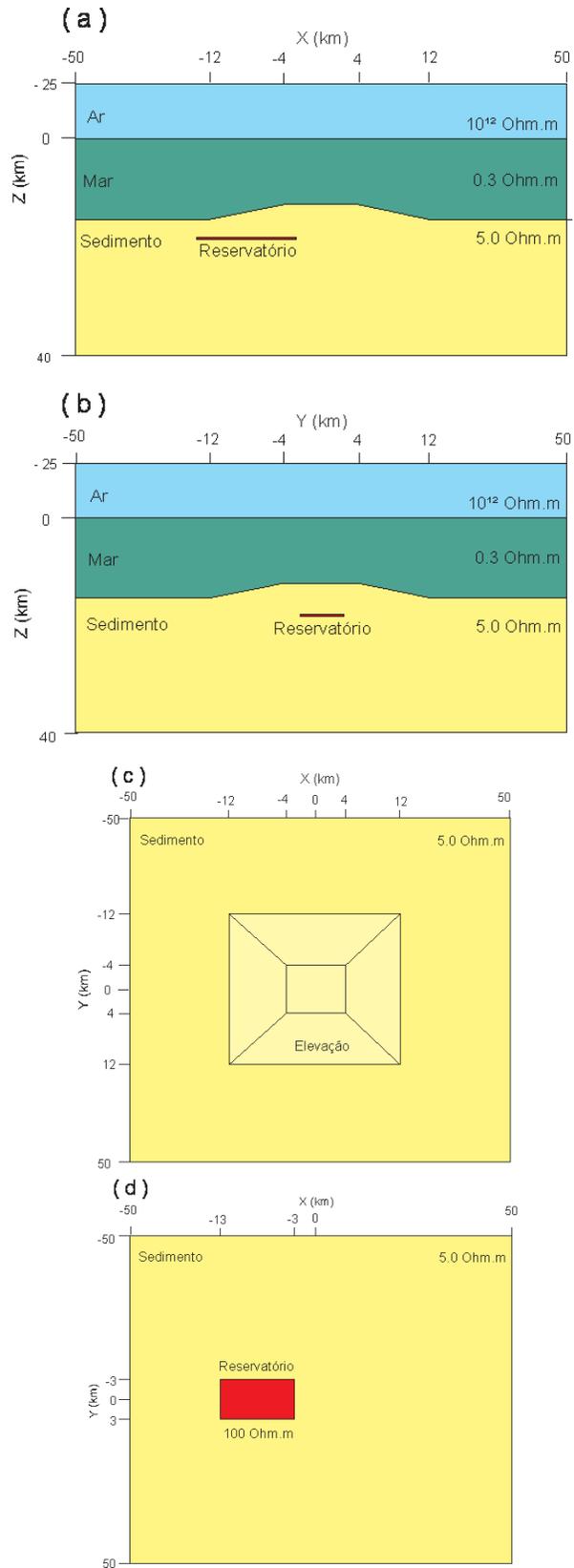


Figura 2 – Modelo geoeletrico 3D utilizado nos experimentos. (a) Seção transversal x-z; (b) seção transversal y-z; (c) seção transversal x-y da elevação; (d) seção transversal x-y do reservatório.

Variação da frequência

Para o modelo geoeletrico da Figura 2, com lâmina d'água de 1.500 metros na presença da elevação e do reservatório, realizamos o experimento 1 para analisarmos o comportamento da amplitude e da fase do campo elétrico com a variação da frequência nas três posições de transmissores definidas anteriormente.

Observamos nas Figuras 3, 4 e 5 que a amplitude do campo elétrico diminui com o aumento da frequência em um mesmo offset, que pode ser explicado pela relação frequência e profundidade de investigação (skin-depth). Quanto menor a frequência usada maior é a influência do corpo que está em profundidade e esse efeito é observado no aumento da amplitude do campo. A relação com a fase se dá de forma similar à da amplitude.

Outro ponto a ser destacado é a assimetria dos gráficos, mais evidente na Figura 5, onde para $x > 0$ temos a influência apenas da batimetria na resposta e para $x < 0$ se dá também a resposta do reservatório. Nos levantamentos MCSEM o noise-floor se dá em torno de 10^{-15} V/m para medidas de campo elétrico, o que limita o off-set a no máximo 12 km.

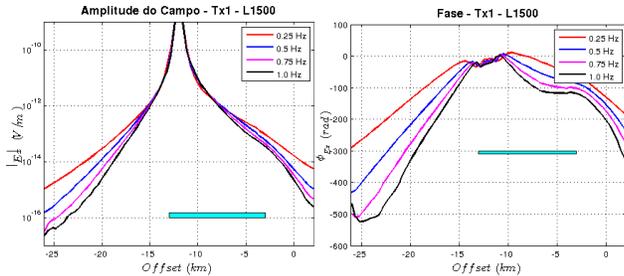


Figura 3 - Amplitude e fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

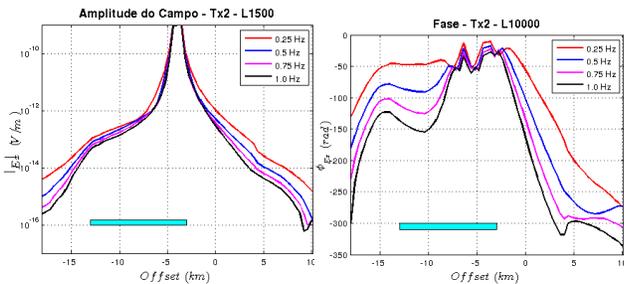


Figura 4 - Amplitude e fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

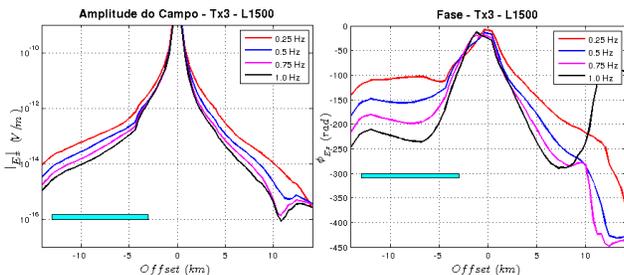


Figura 5 - Amplitude e fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

No experimento 2 usamos a lâmina d'água do modelo geoeletrico igual a 10 km a fim de eliminar a interação entre a onda-aérea e a batimetria, numa menor lâmina d'água como ocorre para 1.500 m. Ressaltamos que esta é uma condição hipotética de levantamento MCSEM. Analisamos o comportamento do modelo para as três posições de transmissores relativas à elevação da Figura 2 vemos que nas respostas das Figuras 6, 7 e 8 a amplitude do campo elétrico também diminui com o aumento da frequência.

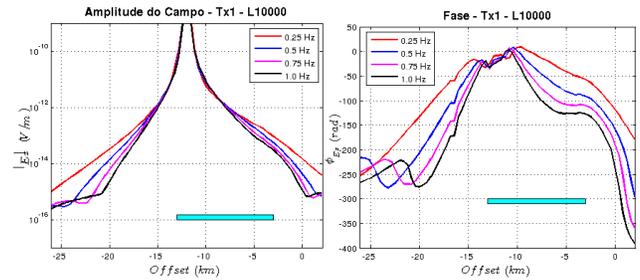


Figura 6 - Amplitude e fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

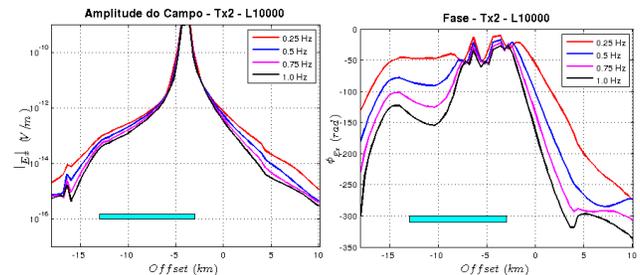


Figura 7 - Amplitude e fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

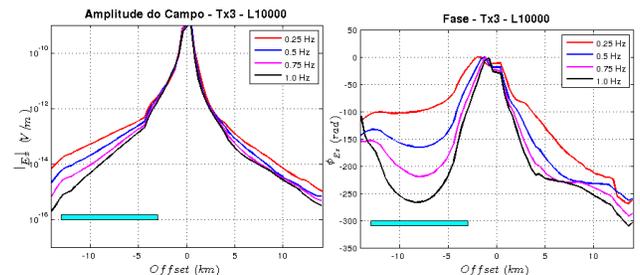


Figura 8 - Amplitude e fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

As curvas chegam a delimitar, de forma sutil, onde começa e onde termina a elevação, exemplificado na figura 8 com mais clareza na coordenada $x = -12$ km (início da elevação) e $x = -4$ km (fim da elevação), especialmente na frequência de 1 Hz. A relação com a fase se dá de forma similar a da amplitude. Podemos ver esse mesmo comportamento para todos os transmissores. Comparando as Figuras 5 e 8, podemos perceber a influência da onda aérea, que é bastante acentuada no receptor em $x = 0$ km, no alto da elevação (onde há apenas 500 m de lâmina d'água).

Efeito da batimetria

Para o modelo geoeletrico da Figura 2, porém sem o reservatório de hidrocarbonetos e com a lâmina d'água de 10 km, analisaremos a influência apenas da batimetria na amplitude e da fase do campo elétrico para as quatro frequências usadas nesse trabalho e para as posições de transmissores iguais a -12 km e 0 km: no primeiro caso temos duas regiões distintas no offset, uma com receptores na parte plana do assoalho oceânico e à esquerda do transmissor e a outra à direita, com receptores localizados na elevação. A comparação será tomada em relação à resposta de um modelo sem batimetria, que servirá de referência.

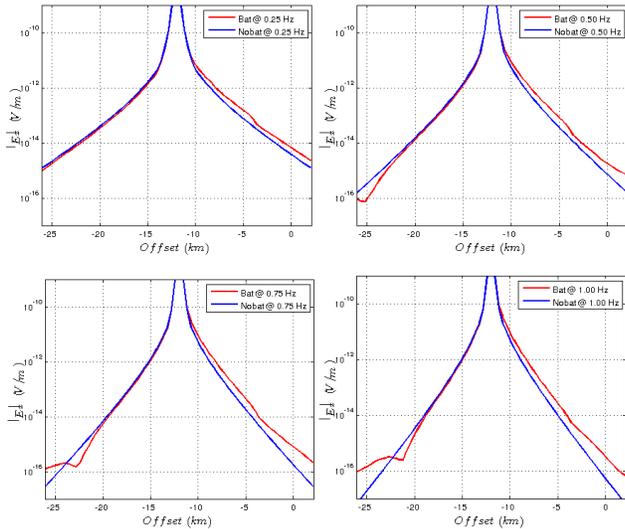


Figura 9 - Amplitude dos campos elétricos para um modelo com batimetria (vermelho) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

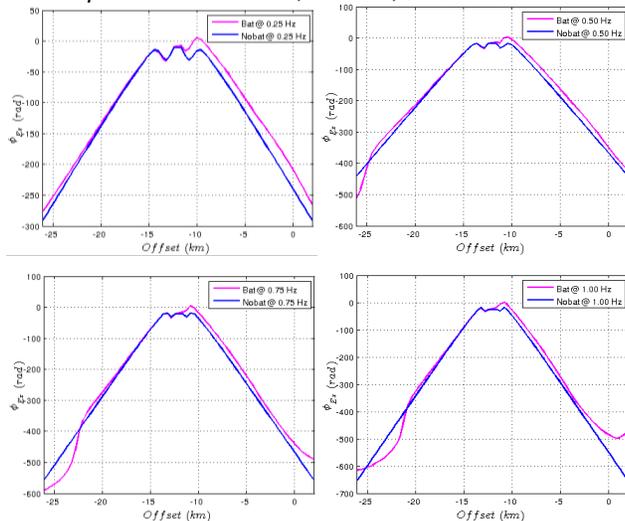


Figura 10 - Fase dos campos elétricos para um modelo com batimetria (magenta) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

As figuras 9 e 10 que representam a amplitude do campo e a fase, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição -12 km. Observa-se uma assimetria na amplitude dos campos que se dá pela

presença da batimetria e pela geometria do arranjo transmissor-receptor, porém o efeito não varia com a frequência, apesar que amplitude do campo diminui com o aumento da frequência em um mesmo offset, como era de se esperar. Na fase o efeito é similar, principalmente para offsets de no máximo 12 km.

As figuras 11 e 12, que representam a amplitude do campo e a fase, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição x = 0 km. Observa-se um ligeiro aumento na amplitude dos campos quando comparados com a resposta sem batimetria.. Essa diferença de amplitude se dá pela presença da batimetria e pela geometria do arranjo transmissor-receptor. A mesma análise pode ser feita para a fase. Observamos ainda a delimitação das bordas da elevação com mais clareza nas frequências mais baixas (0.25 Hz e 0.50 Hz).

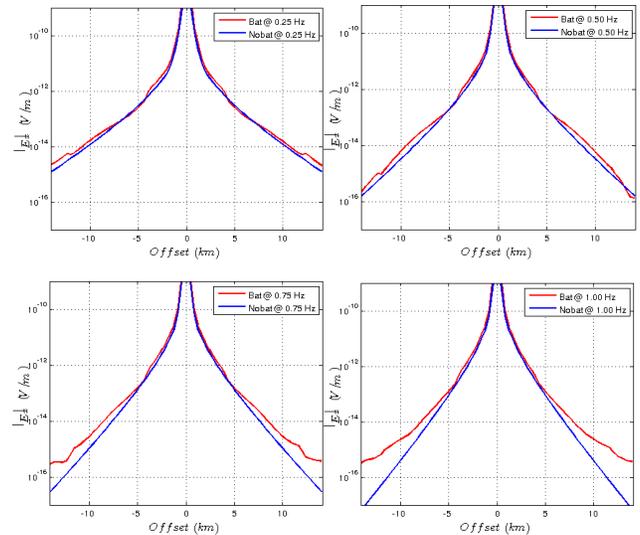


Figura 11 - Amplitude dos campos elétricos para um modelo com batimetria (vermelho) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

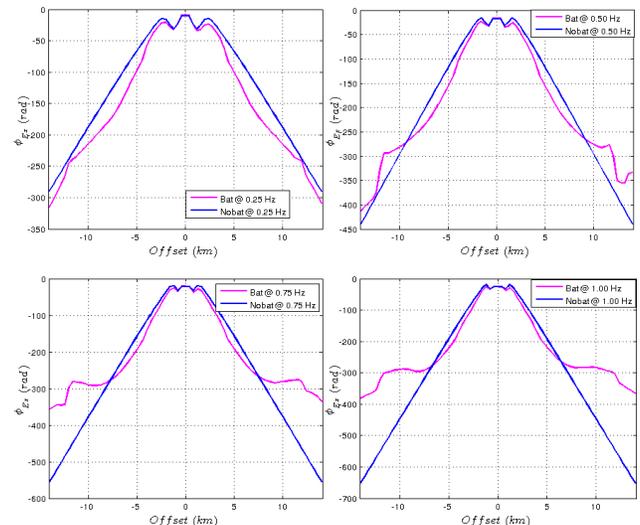


Figura 12 - Fase dos campos elétricos para um modelo com batimetria (magenta) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

Nestas simulações, ocorreram algumas respostas instáveis no final do offset, podendo o erro numérico ser atribuído à discretização da malha de elementos finitos.

Efeito do reservatório na presença de batimetria

Com o objetivo de caracterizar um reservatório na presença de batimetria, tomamos o modelo geoeletrico da Figura 2 e simulamos o reservatório de hidrocarbonetos (Hc) em duas situações na mesma lâmina d'água de 10 km: com batimetria (Bat) e sem batimetria (Nobat). Além disso, para servir de referencial, comparamos com a resposta 1-D (Nohc/Nobat). Os resultados são mostrados tanto para a amplitude quanto para a fase do campo elétrico. Assim, adotaremos as três legendas: Nohc/Nobat (preto), Hc/Nobat (azul) e Hc/Bat (vermelho).

As figuras 13 e 14, que representam a amplitude e a fase do campo elétrico, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição -12 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz. Nos gráficos observamos uma assimetria nas curvas pela posição relativa do reservatório e da batimetria. O efeito é maior com o aumento da frequência, sobressaindo a anomalia gerada pela batimetria junto com o reservatório, quando comparados ao caso 1-D.

Comportamento análogo se dá na fase, de maneira ainda mais evidente quanto à presença do reservatório e da batimetria. Aqui novamente ocorreu instabilidade numérica para grandes offsets.

As figuras 15 e 16, que representam a amplitude do campo e a fase, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição zero. Nos gráficos a assimetria se dá pela posição do reservatório que torna o campo anômalo bem maior no lado esquerdo do transmissor. De maneira geral repete-se o comportamento das curvas com a frequência, onde as curvas diminuem de valor com o aumento da frequência, em um mesmo offset.

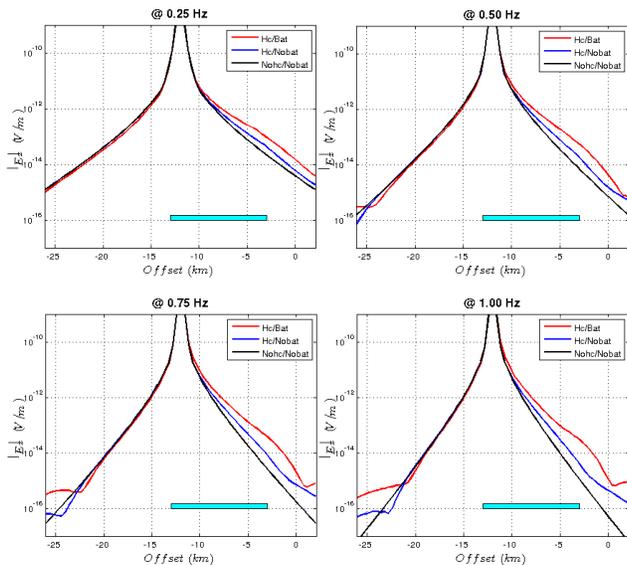


Figura 13 - Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D, e para o reservatório com e sem a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

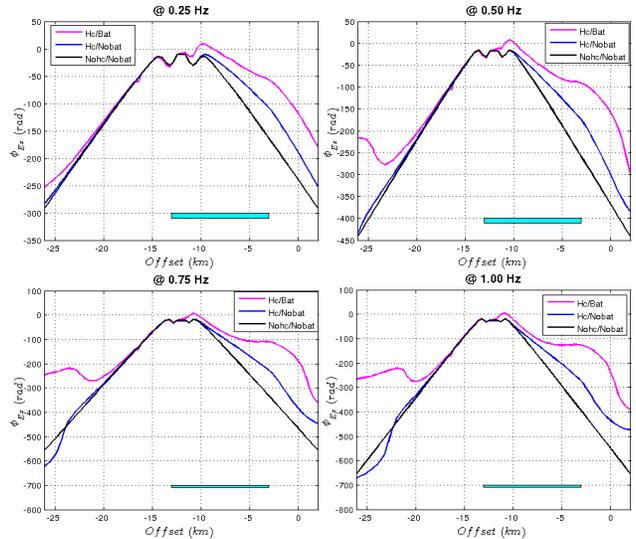


Figura 14 - Fase dos campos elétricos para os casos 1-D, e para o reservatório com e sem a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

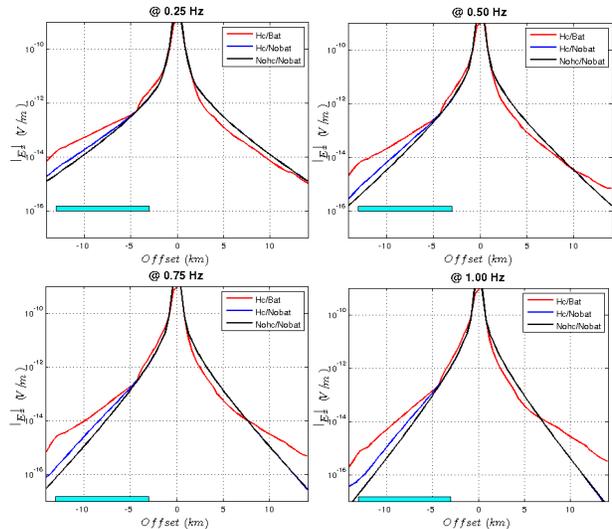


Figura 15 - Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D, e para o reservatório com e sem a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

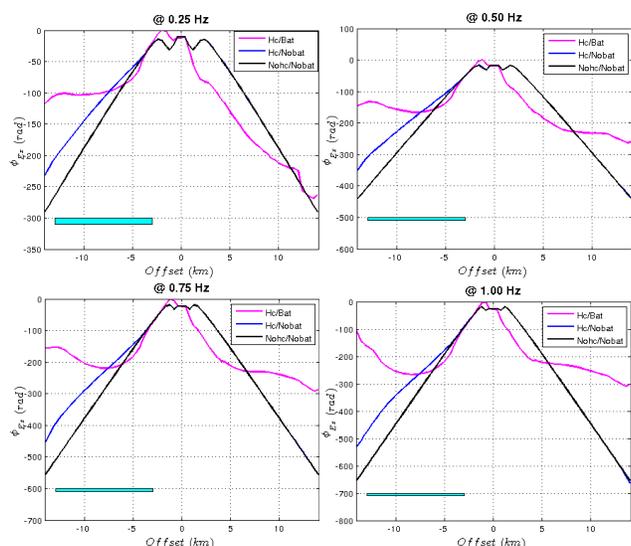


Figura 16 - Fase dos campos elétricos para os casos 1-D, e para o reservatório com e sem a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz.

Conclusões

O método MCSEM tem se mostrado uma ótima ferramenta na detecção e mapeamento de corpos resistivos.

Na variação da frequência para o modelo com a presença da batimetria e do reservatório de hidrocarboneto, podemos notar a diminuição da amplitude e da fase do campo elétrico. Outro ponto importante na variação da frequência para esse modelo foi perceber que em frequências mais altas podemos visualizar melhor as bordas da elevação enquanto que nas frequências mais baixas o efeito do reservatório é mais evidente.

Ao compararmos apenas a influência da batimetria sem o reservatório, observamos ainda mais a delimitação da elevação no topo e na base para todas as frequências. E o efeito que a elevação causa em ambientes sem reservatório aumenta com a frequência.

Na análise do efeito da batimetria em modelos com o reservatório, pudemos observar como a batimetria afeta o dado aumentando a amplitude do campo elétrico. Observamos o mesmo comportamento para a fase.

As frequências mais altas usadas realçam o efeito da batimetria e acabam camuflando o efeito do reservatório o que pode acarretar em interpretações equivocadas a respeito da subsuperfície.

A importância desse estudo faz necessário a sua ampliação considerando outros tipos de batimetrias em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte dado pelas bolsas de pesquisa do projeto "Inversão tridimensional de dados MT e MCSEM *Inline* e *Broadside*", termo de cooperação Petrobras/UFGA/Fapesp número 0050.0088121.13.9 e pelo Programa de Pós-graduação em Geofísica da UFGA pela infraestrutura computacional.

Referências

ANDRÉIS, David; MCGREGOR, Lucy. Controlled-source Electromagnetic Sounding in Shallow Water: Principles and Applications. *Geophysics*, v. 73, n. 1, p. F21 – F32, abr. 2008.

CONSTABLE, Steven; SRNKA, Leonard J. An Introduction to Marine Controlled-source Electromagnetic Methods for Hydrocarbon Exploration. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA3 – WA12, abr.2007.

EDWARDS, N. Marine controlled source electromagnetic principles, methodologies, future commercial applications. *Survey in Geophysics*, v. 26, p. 675-700, 2005.

EIDSMO, T. et al. Sea Bed Logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas. *First Break*, v. 20, p. 144-152, 2002.

SOUZA, V. C. T. Modelagem numérica de dados mCSEM 3D usando computação paralela. 2007. Tese (Curso de pós-graduação em geofísica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém – PA.

STRACK, K. M. future directions of electromagnetic methods for hydrocarbon applications. *Surv Geophys.* v. 35, p. 157-177, Houston, 2012.

UM, E. S.; ALUMBAUGH, D. L. Special Section – Marine controlled-source electromagnetic methods on the physics of the marine controlled-source electromagnetic method. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA13-WA26, Madison, 2007