



Aplicação de redes neurais na otimização do modelo de velocidade com sal estratificado: um estudo de caso na Bacia de Santos – Brasil

Pedro Henrique Coelho^{1*}, Bruno Valle¹, Suzana Ribeiro da Silva¹, Carolina Ribeiro¹, Manuela Silva¹, Marcelo Mendes¹ e Leonardo Borghi¹

¹LAGESED – Laboratório de Geologia Sedimentar (UFRJ)

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th 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 Santos Basin presents a large salt deposit. The movement of the salt in the basin, caused by the weight of the overlapping layers, formed a thick salt layer with complex structuring and stratification. The complex evaporative process that formed this salt deposited is composed mainly halite but also other evaporite-minerals with different densities such as anhydrite, carnallite and other complex salts. During the deformation of the salt, in the late Cretaceous, the more malleable and less dense salt minerals migrated and formed salt domes and walls. In contrast, the evaporitic sequences with higher presence of denser minerals, such as anhydrite, didn't migrate and stayed in the less thick parts of the salt. Thus, the salt at the Santos Basin presents a great lateral heterogeneity of density and velocity. For the seismic interpretation lateral velocity heterogeneity can be a big issue for domain conversion. The purpose of this work is to identify through the neural network tools the seismic facies with different seismic velocities. The methodology applied here consists in (1) creating a seismic facies cube from seismic attributes; (2) comparing seismic facies with velocities generated from the sonic log in 20 wells spread in the area; (3) calculating an average velocity for each facies; (4) resampling the seismic facies cube in a geocellular 3D grid; and (4) assigning the mean velocities to each seismic facies. Four seismic facies were identified with different directional velocity statistical distributions. Seismic facies 1 presents low velocity variation, showing a normal distribution with low variance. This seismic facies is known to present predominance of halite. The seismic facies 2 and 3 present a higher variation in velocity, with the seismic facies 3 showing a higher amount of minerals with higher velocity. In the seismic facies 4, the distribution is bimodal with two velocity peaks, one more significant with velocities around 4500 m/s, and the other with velocities around 6000 m/s, indicating the intercalation of halite and anhydrite.

Introdução

Os reservatórios do pré-sal da Bacia de Santos foram as principais descobertas de grandes acumulações de hidrocarbonetos nas últimas décadas em todo o planeta. Hoje, a produção da Bacia de Santos é a maior produtora de hidrocarbonetos do país, com novos campos ainda a iniciarem sua produção. Na seção do pré-sal, os principais reservatórios são formados por carbonatos das formações Barra Velha e Itapema, localizados em águas ultra profundas sob uma espessa camada de sal da Formação Ariri, a uma profundidade de mais de 5000 metros de profundidade.

As rochas evaporíticas da Bacia de Santos foram depositadas durante a abertura do oceano Atlântico Sul (Aptiano) e cobrem uma extensa área da bacia, chegando a atingir espessuras de centenas a milhares de metros. Durante o Cretáceo Superior e início do Terciário, período marcado por progradações de cunhas terrigenas, se intensificou o processo de movimentação do sal. O peso das camadas sobrejacentes deformou a camada de sal formando diápiros e muralhas ao longo de uma região de aproximadamente 100.000 km² em toda bacia (Mohriak & Szatmari, 2008). Além dos processos envolvidos na deposição do sal, que resultaram na estratificação dos depósitos, os processos tectônicos imprimiram na seção evaporítica uma complexa trama estrutural, cuja evolução ainda é foco de muitos estudos. Os principais minerais que compõem a província salífera da Bacia de Santos são halita, em maior quantidade, e anidrita, carnalita e taquidrita em menor quantidade. Segundo Gamboa et al. (2008), foram identificadas quatro seqüências de sais: (1) seqüência basal com predominância de halita, (2) seqüências com intercalação de halita, anidrita e sais complexos, (3) pacote de halita menos espesso recobrando a seqüência anterior (4) pacote mais delgado de sais estratificados. Rodrigues et al. (2018) também identificou quatro sismofácies na formação Ariri da Bacia de Santos, A fácies A1, que apresenta deformação intensa com refletores caóticos e transparentes, que variam lateralmente e localmente para fácies sísmicas subparalelas e mais contínuas; a fácies A2, que é formada por uma espessa e altamente reflexiva unidade com refletores subparalelos; a fácies A3, que é formada por uma unidade fina caracterizada por refletores contínuos subparalelas; e a fácies A4, que apresenta uma unidade fina de refletores de alta amplitude. De acordo com Gamboa et al. (2008), como a halita apresenta um comportamento mais dúctil em relação a anidrita, durante a movimentação do sal as seqüências predominantes de halita migraram

lateralmente e formaram os diápiros e muralhas de sal. As camadas de anidrita por vezes foram empurradas para dentro das seqüências superiores dando origem a estruturas exóticas. Já as seqüências com intercalações de halita, anidrita e minerais de sal complexos se alojaram nas partes baixas e menos espessas do sal. Desta forma, a Formação Ariri, na Bacia de Santos, apresenta bastante heterogeneidade horizontal de fácies.

Durante o processo de conversão de domínio tempo para profundidade, e na criação do modelo de velocidade, a definição das velocidades intervalares no modelo pode ser um problema, uma vez que o sal não apresenta uma correlação lateral de velocidades e, com isso, impossibilitando a correlação de velocidades entre poços. Trabalhos como Maul et al. (2018) e Fonseca et al. (2017) utilizam diferentes técnicas para diferenciar as velocidades no sal estratificado e separar fácies no sal com presença de minerais mais ou menos densos do que a halita.

Neste trabalho, será demonstrado uma metodologia para criação do modelo de velocidade através do cubo de velocidade intervalar. O fluxo identifica sismofácies do sal através de redes neurais, combinando a sísmica de amplitude e atributos sísmicos. Desta forma é possível atribuir diferentes velocidades para cada tipo de sismofácies e aprimorar o modelo de velocidades.

Metodologia

Como primeira etapa, realizou-se o controle de qualidade dos perfis sônico (DTC) e de densidade (RHOB), que pode ser dividida em três fases principais: (1) correções de profundidade, que visa corrigir problemas gerados durante a aquisição (e.g., tensão no cabo ocasionando inconsistências em profundidades medidas) e fazem perfis apresentarem picos correspondentes em profundidades distintas; (2) junção de curvas de diferentes fases de perfuração; e (3) remoção de defeitos (*spikes*), causados por rugosidade de poço, arrombamento de poço, etc.

A segunda etapa consiste em identificar as principais unidades estratigráficas e interpretar na sísmica de amplitude os refletores que separam estas unidades. O principal critério que foi utilizado para separar estas zonas foram as características físicas das rochas. Nesta etapa foram individualizadas cinco diferentes zonas. Uma vez que se identificou nos poços os limites de cada zona, os mesmos foram ajustados em tempo através da criação de sismogramas sintéticos. Esta etapa é fundamental para se identificar na sísmica os refletores do topo e da base do sal (Figura 1a). Em seguida foram interpretados os horizontes do fundo do mar, o topo do sal, a base do sal e o topo do embasamento na sísmica 3D. A construção do cubo de velocidade intervalar se deu através da criação de um grid geocelular 3D e posteriormente a modelagem de propriedade.

A terceira etapa teve início com a criação de grids 2D (superfícies) que são interpolações dos horizontes interpretados na sísmica. As superfícies são objetos de entrada tanto para o grid geocelular 3D quanto para o modelo de velocidade. Uma vez que as zonas do modelo

geocelular foram criadas, o próximo passo foi a definição das camadas. Este processo depende do nível de detalhe que se deseja obter em cada zona e da capacidade computacional. Neste trabalho, considerando o tamanho da área, a resolução e inclinação dos refletores da sísmica e o tempo de computação foram utilizadas camadas seguindo o topo com espessuras de 10 ms. Por fim, as células do grid 3D na zona do sal ficaram com 50 metros de comprimento e largura e 10 milissegundos de espessura.

A quinta etapa consistiu na definição de sismofácies através da ferramenta de redes neurais do software Petrel®. Para obter as sismofácies, foi usado o método de classificação não supervisionado com quatro classes. O dado foi treinado a partir de 10 traços aleatórios da sísmica. As melhores correlações encontradas para individualizar as sismofácies foram com a interação entre a sísmica de amplitude e os atributos de Sweetness e RMS amplitude do software Petrel® (Tabela 1). Apesar da sísmica de amplitude apresentar baixa correlação com os outros atributos, o resultado final foi satisfatório (Figura 1b).

Tabela 1 - Correlação entre os atributos e a sísmica de amplitude.

	Amplitude	RMS Amplitude	Sweetness
Amplitude	1.0000	0.0162	0.0688
RMS Amplitude	0.0162	1.0000	0.9364
Sweetness	0.0688	0.9364	1.0000
Total	0.1652	0.9346	0.9349

Com o cubo de sismofácies definido, foram extraídos ao longo da trajetória dos poços os valores das sismofácies. Em seguida, as velocidades foram separadas de acordo com as sismofácies, e então foi obtido para cada sismofácies um valor médio de velocidade.

A etapa mais importante na criação do cubo de velocidade intervalar é a população de propriedades no grid geocelular 3D. Para este trabalho serão descritas apenas as velocidades na zona do sal. Nesta camada foi adotado um método de reamostragem da sísmica de sismofácies, produto da rede neural. Para cada célula do grid geocelular 3D se extraiu da sísmica o valor exato da sismofácies mais abundante (Figura 1c). Esta foi uma maneira encontrada de diferenciar as velocidades de cada sismofácies, uma vez que camadas de anidrita, carnalita e outros mineiras complexos são de poucos metros, normalmente fora da resolução sísmica. Os valores médios de velocidade de cada sismofácies foram então assignados às respectivas sismofácies reamostradas da sísmica no grid geocelular 3D.

Uma vez que as velocidades já foram populadas no grid geocelular 3D, a última etapa trata-se da construção do modelo de velocidade com o cubo de velocidade intervalar obtido.

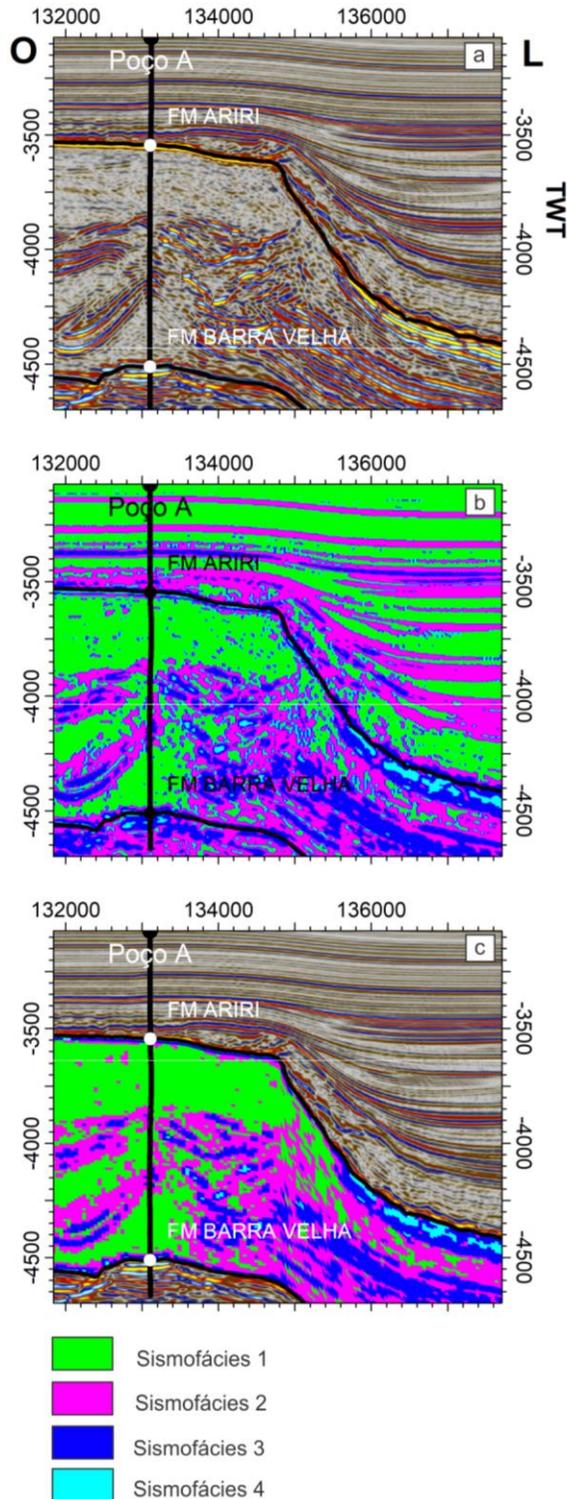


Figura 1 –a) Sísmica de amplitude com interpretação do topo e base do sal. b) Cubo de sismofácies produto da rede neural. c) O grid geocelular 3D com os valores das sismofácies reamostrados.

Resultados e discussões

Na tentativa de individualizar as quatro unidades de sal descritas por Gamboa et al. (2008) e Rodriguez et al. (2018), foram geradas quatro sismofácies que apresentaram as seguintes respostas de fácies sísmicas de velocidade:

A sismofácies 1 (cor verde), é observada principalmente nas partes mais espessas do sal, nos grandes diápiros e muralhas de sal, apresenta uma assinatura sísmica caótica com refletores de baixa amplitude indicando uma sequência homogênea de sal. A curva de velocidade na sismofácies 1 apresentou pouca variação de velocidades com valor médio de 4499 m/s e distribuição normal com variância baixa (Figura 2a). Esta sismofácies pode ser associada a grande abundância de halita. A sismofácies 2 (cor magenta) é encontrada tanto nos diápiros quanto nas partes mais baixas e menos espessas do sal, apresenta uma assinatura sísmica de refletores com amplitude média. A curva de velocidade na sismofácies 2 apresentou relativa variação de velocidades com valor médio de 4535 m/s e variância maior em relação a sismofácies 1 (Figura 2b). Esta sismofácies é associada a halita com pequena presença de outros sais de maior velocidade. As sismofácies 3 e 4 (cores azul e ciano, respectivamente) aparecem principalmente nas áreas mais baixas e menos espessas do sal, assim como na base do sal. São regiões onde o sal é altamente estratificado com assinatura sísmica marcado por amplitudes altas e muito altas respectivamente e, por isso, as velocidades apresentam médias maiores. A sismofácies 3 apresentou velocidade média de 4581 m/s e uma distribuição log-normal (Figura 2c), indicando uma maior presença de sais de maior densidade. A sismofácies 4 apresentou velocidade média de 4700 m/s e uma distribuição bimodal com um segundo pico marcando velocidades próximas 6100 m/s indicando uma maior frequência de intercalações com anidritas (Figura 2d). Segundo Amaral et al. 2015 as anidritas na Bacia de Santos aprestam velocidades próximas a 6100 m/s (Tabela 2).

Tabela 2 - Tabela com as velocidades instantâneas dos minerais de sal na bacia de Santos (Amaral et al., 2015).

Mineral	Velocidade Instantânea (m/s)
Taquidrita	3480
Carnalita	3930
Silvita	4240
Halita	4560
Gipsita	5470
Anidrita	6100

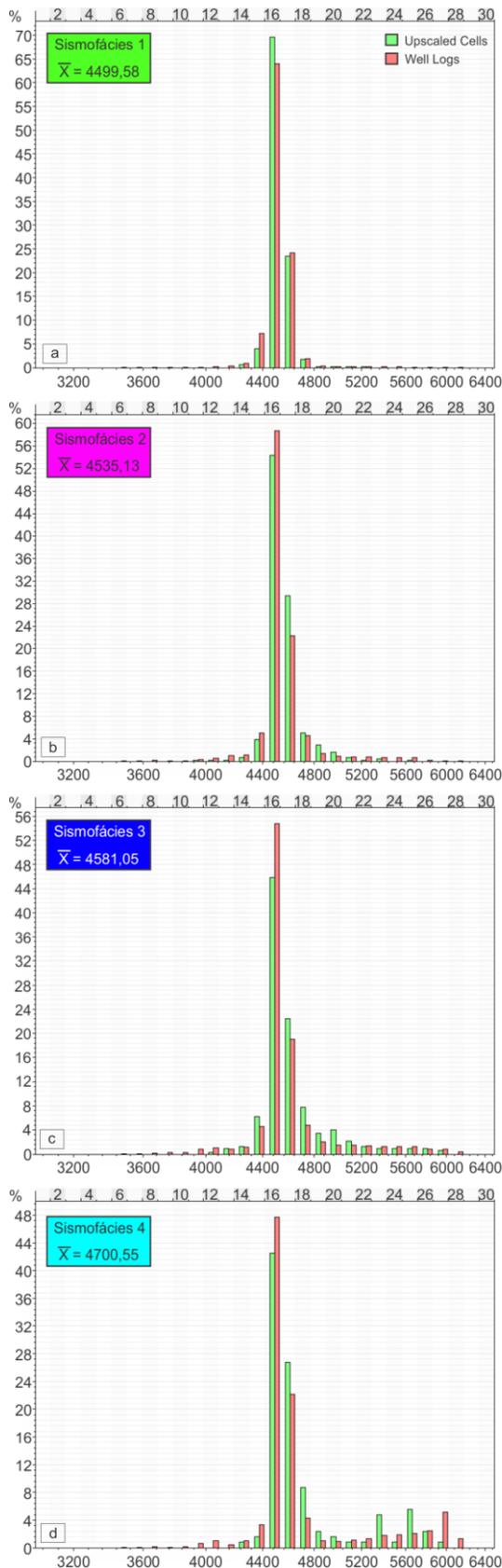


Figura 2 - Histograma de distribuição das velocidades para cada sismofácies.

Um exemplo da relação das sismofácies com as velocidades e a sísmica de amplitude pode ser observada no Poço A (Figura 3). Os intervalos 1 e 2 apresentam intercalação de halita com sais de densidades e velocidades distintas e são correlacionados às sismofácies 2 e 3 (ver figura 1a). A sismofácies 1 é correlacionada a presença de mais de 80% de halita (Gamboa et al., 2008 e Rodriguez et al., 2018), e ocorre na unidade com velocidades mais menos variadas, onde os refletores são de baixa amplitude. A sismofácies 4 neste poço é encontrada na anidrita basal, onde a velocidade aumenta consideravelmente.

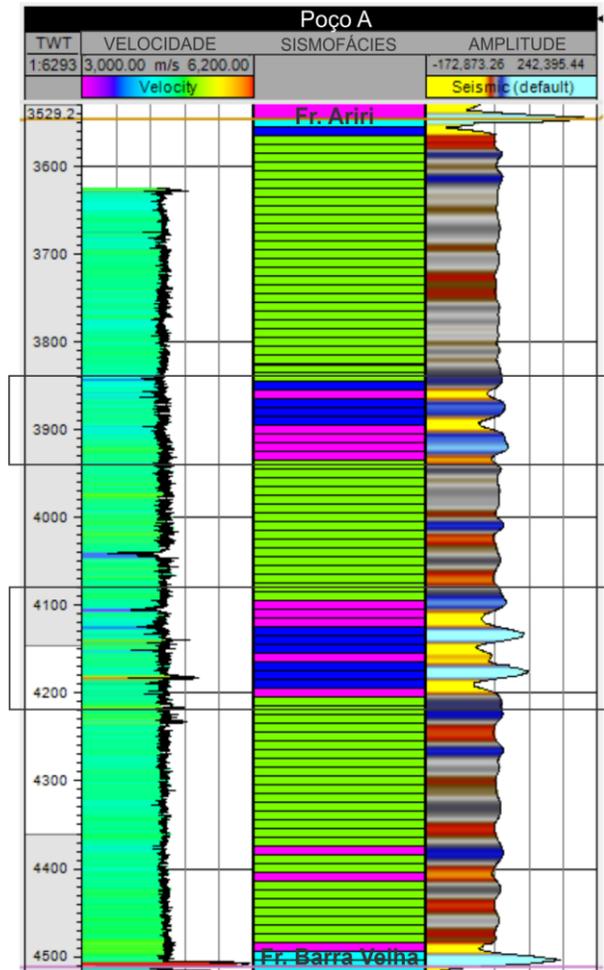


Figura 3 - Poço na Bacia de Santos com o log de velocidade, os valores dos cubos de sismofácies e amplitude extraídos no poço.

Como resultado final, obteve-se um modelo de velocidade mais acurado, apresentando diferenças laterais de velocidade na zona do sal, variando com cada sismofácies (Figura 4). As sismofácies que apresentaram as maiores amplitudes apresentaram também as maiores velocidades. A individualização das velocidades no sal pode tornar o modelo de velocidade mais acurado e corrigir efeitos de sísmica com Pull Up.

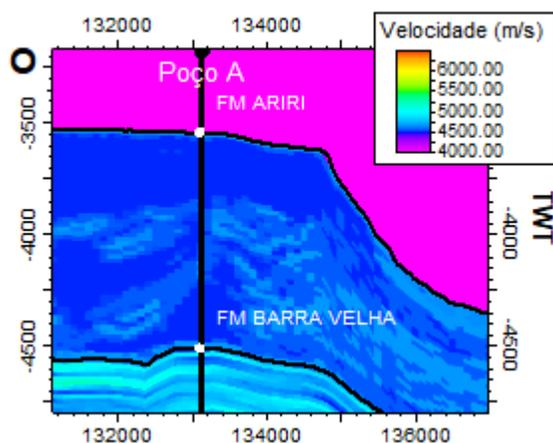


Figura 4 - Cubo de velocidade intervalar com as velocidades ajustadas na Zona do Sal.

Conclusão

As quatro sismofácies identificadas foram correlacionadas com as curvas de velocidade geradas a partir da curva do sônico e quatro diferentes padrões foram encontrados. As velocidades médias da sismofácies 1 a 4 são 4499, 4535, 4581 e 4700 m/s, respectivamente. A rede neural se mostrou uma ferramenta bastante eficaz para identificação de sismofácies no sal estratificado da Bacia de Santos. A individualização das diferentes fácies sísmicas e o cálculo das respectivas velocidades faz com que o modelo de velocidade fique mais acurado e supere a problemática da heterogeneidade lateral do sal, aprimorando a conversão tempo-profundidade e diminuindo o risco exploratório.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP/BDEP por disponibilizar os dados através da política de cessão gratuita de dados públicos para finalidade acadêmica, a Schlumberger por conceder a licença dos softwares utilizados, e a Shell Brasil pelo financiamento do projeto de P&D.

Esta pesquisa foi realizada em associação com o projeto de P&D registrado como ANP 20225-9 (PRESAL - Caracterização geológica de reservatórios carbonáticos do intervalo Pré-sal da Bacia de Santos, correlatos e análogos), financiado pela Shell Brasil como parte do "Compromisso com Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento" da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Referências

Amaral, P.J., Maul, A., Falcão, L., González, M. & González, G., 2015. Estudo Estatístico da Velocidade dos Sais na Camada Evaporítica na Bacia de Santos. International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 14, Rio de Janeiro – RJ.

Fonseca, J., Gobatto, F., Boechat, J., Maul, A., Yamamoto, T., Born, E., Teixeira, L. & González, M. [2017] Dealing with Evaporitic Salts Section in Santos Basin During Geological Seismic Velocity Construction. 15 th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2017 – Rio de Janeiro – RJ, Brazil.

Gamboa, L. A. P., Machado, M. A. P., Silva, D. P., De Freitas, J. T. R. & Silva, S. R. P. 2008. Evaporitos estratificados no Atlântico Sul: interpretação sísmica e controle tectono-estratigráfico na Bacia de Santos. In: Mohriak, W. et al. (eds) Sal: Geologia e Tectônica. São Paulo, Beca Edições, 340–359.

Maul A., Santos M. C. & Silva, C. G. 2018. Few Considerations, Warnings and Benefits for the E&P Industry when Incorporating Stratification inside Salt Section. RBGf – Revista Brasileira de Geofísica, V.36, n.4. doi: 10.22564/rbgf.v36i4.1981.

Mohriak, W. U. & Szatmari, P. 2008b. Tectonica de sal. In: Mohriak, W.; Szatmari, P.; Anjos, S. (ed.) Sal: geologia e tectônica. São Paulo, Becca edições Ltda, 1, 90-163.

Rodriguez, C.R., Jackson, C.A-L., Rotevatn, A., Bell, R.E., and Francis, M., 2018, Dual tectonic-climatic controls on salt giant deposition in the Santos Basin, offshore Brazil: Geosphere, v. 14, no. 1, p. 215–242, doi:10.1130/GES01434.1.