



Estimativa e análise de perfis para inversão sísmica da seção evaporítica: Bacia de Santos

Ciro Clímaco (Petrobras), Josué Fonseca (Petrobras), Alexandre Maul (Petrobras), Pablo Barros (Petrobras), Alvaro Martini (Petrobras) & María González (Emerson-Paradigm)

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18 a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII 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

A seção evaporítica que atua como rocha selante nos reservatórios seção Pré-Sal da Bacia de Santos, Brasil, tem espessuras que podem ser consideradas, em alguns casos, como bem significantes, contendo muitas camadas diferentes minerais, e com substanciais contrastes de impedância, ocasionando diversas reflexões internas desta seção, as chamadas estratificações.

Portanto, uma descrição mais realista das propriedades internas da seção evaporítica, levando-se em consideração as diferentes camadas de minerais, pode reduzir problemas durante o processamento sísmico e, ainda, pode ser um insumo para diversos procedimentos tais como: construir um modelo de velocidade para conversão em tempo-profundidade/calibração profundidade-profundidade, desenhos de novas aquisições sísmicas, futuros reprocessamentos sísmicos, criação de modelos geomecânicos mais realistas e, também, insumos que propiciam melhores expectativas em termo de perfurações, minimizando riscos operacionais.

Este estudo é uma sequência do trabalho realizado por Amaral *et al.* (2015), aplicando a metodologia em desenvolvimento desde 2014 e descrita por Maul *et al.* (2016) que modela, em detalhes, a seção evaporítica, a partir de informações tanto sísmicas quanto baseadas em poços, e entender como essas camadas alteram a velocidade intervalar.

Neste artigo, vamos explorar e analisar uma nova abordagem para estimar perfis na seção evaporítica, onde estes não foram adquiridos, e construir um modelo de velocidade geologicamente mais realista e consistente, ilustrando algumas aplicações em incertezas de modelagem.

Introdução

Os reservatórios *offshore* do Pré-Sal na Bacia de Santos são, atualmente, os de maior interesse para a indústria do petróleo no Brasil. Os reservatórios estão situados em colunas d'água na maioria dos casos maiores que 2000m, e localizados abaixo de cerca 5000m de rochas, incluindo rochas sedimentares, carbonatos albianos e uma seção evaporítica (sal) variando de poucos metros a mais de 2000m de espessura, nas regiões com domos/diápiro de sal.

Ao longo dos últimos anos, especialmente desde 2014, observamos uma grande melhoria nas chamadas modelagens de velocidades para muitos propósitos na indústria de petróleo em geofísica, tais como: estudos de iluminação sísmica, reprocessamento sísmico, resposta e posicionamento de qualidade de amplitudes sísmicas, análise geomecânica, construção de poços etc.

O aumento do poder computacional, evolução de algoritmos de migração, conceitos de anisotropia e assim por diante, vem contribuindo para a evolução do processamento sísmico. O modelo de velocidade é um aspecto chave a ser observado para se obter melhores imagens sísmicas de reservatórios, permitindo mais confiança em termos interpretação sísmica.

A metodologia proposta neste trabalho visa melhor controlar/estimar os perfis que servirão de base para o modelo de impedância da seção evaporítica, fornecendo insumos robustos para estudos de inversão sísmica. Conseqüentemente, utilizar esta informação da inversão sísmica para posicionar corretamente as diferentes estratificações existentes dentro desta seção. Além disso, permite atribuir velocidades intervalares mais confiáveis a essas estratificações, fornecendo mais conteúdo de geologia no modelo de velocidade, conforme necessário para se realizar migrações em profundidade. O mesmo modelo de velocidade poderia ser utilizado, ainda, como modelo *a priori* em uma nova rodada de inversão sísmica.

Em relação às análises 3D, é possível mencionar os trabalhos realizados por Maul *et al.* (2015), Oliveira *et al.* (2015), Borges *et al.* (2015), Jardim *et al.* (2015), Meneguim *et al.* (2015), González *et al.* (2016), Borges (2016), Meneguim *et al.* (2016), Gobatto *et al.* (2016) e Yamamoto *et al.* (2016) Barros *et al.* (2017), Fonseca *et al.* (2018) para construir esse tipo de modelo de velocidade geológica. Toda a análise 3D é apoiada por análises 1D bem estatísticas, conforme descrito por Amaral *et al.* (2015) e Yamamoto *et al.* (2016).

Método

A metodologia proposta por Maul *et al.* (2016) e apresentado em González *et al.* (2016) e Gobatto *et al.* (2016) sugere uma abordagem recursiva para a construção de modelos de velocidade. Para se obter um modelo de velocidade mais confiável para a seção de evaporítica, estes autores sugerem a combinação de informações de poços, como perfis e testemunhos, com qualquer resposta sísmica para atualizar um modelo de velocidade inicial. A inversão sísmica é um atributo que responde muito bem a estratificação do sal. Existem diferentes tipos de minerais já descritos para esta seção, tais como halita, anidrita, gipsita, carnalita, taquidita, silvita, além de ocorrências pontuais de carbonatos,

sedimentos e rochas ígneas. A halita é o mineral mais abundante, correspondendo na maioria dos casos a mais de 80% dos minerais existentes. Esta afirmação é amplamente conhecida da literatura, e confirmado nos mais diversos poços analisados por este grupo.

Como a entrada para inversão, perfis sônicos e de densidade são necessários. Quando apenas um desses perfis existe, precisamos usar uma correlação cruzada (*cross-plot*) entre eles para gerar o outro perfil. Na maioria dos casos dentro da seção de evaporítica, não está disponível o perfil de densidade, mesmo quando existe o perfil sônico. Para se obter, então, perfis de pseudo-densidade onde não foram adquiridos, usamos um *cross-plot* entre o perfil sônico e densidade, estabelecendo-se leis de conversão entre os mesmos.

É importante mencionar que preservamos o comportamento entre o sônico e a densidade usando informações onde ambos os perfis foram adquiridos, apenas complementando a informação onde esta não fora adquirida. Neste projeto, obteve-se um ajuste polinomial de 3º grau a partir deste *cross-plot* (Figura 1).

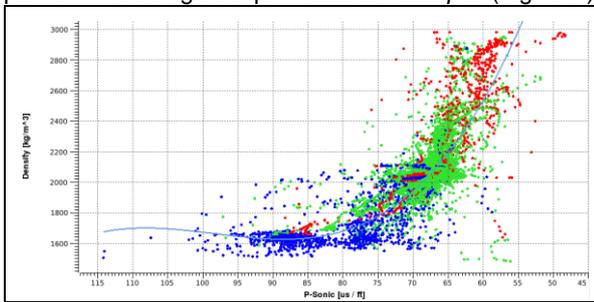


Figure 1: *Cross-plot* entre densidade e P-Sonic, calculada nos poços onde temos registros completos. Os pontos azul, verde e vermelho representam sais de baixa velocidade, halita e sais de alta velocidade, respectivamente. A curva azul é um polinômio de 3º grau ajustado a todos os dados.

A figura 2 mostra o histograma dos perfis de densidade perfilados nos poços na seção evaporítica e o histograma dos perfis de poços calculados a partir do perfil sônico. Os histogramas são muito parecidos excluindo-se a parte onde foi calculado um grande número de minerais de alta densidade (anidrita). A anidrita é um mineral que está, sempre, presente no topo e na base da seção de evaporítica, regiões onde, por segurança operacional, são situadas as sapatas de mudança de fase na perfuração dos poços (cimentos) onde, consequentemente, não faz muito sentido se adquirir perfis.

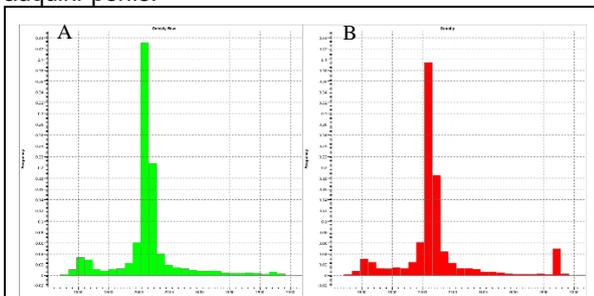


Figure 2: (A) Histograma da densidade perfilada nos poços e (B) Histograma da densidade calculada a partir do sônico.

No entanto, a maioria dos poços não tem perfis dentro da seção evaporítica, principalmente na fase de desenvolvimento dos campos. As principais razões para a falta de informações necessárias (perfis) são as mudanças de fases na perfuração e a econômica.

Para contornar esse problema, usamos as litologias interpretadas (Amaral *et al.*, 2015 e Yamamoto *et al.*, 2016) e geramos pseudo-perfis usando correlações conhecidas. O primeiro passo é interpretar a litologia de toda a seção evaporítica em cada poço. Nós agrupamos os tipos de sal interpretados em três pseudo-fácies: sais de baixa velocidade (carnalita, taquidrita, silvita) ou “LVS” (em inglês *Low Velocity Salts*), halita e sais de alta velocidade (anidrita, gipsita) ou “HVS” (em inglês *High Velocity Salts*).

O cálculo dos valores médios da velocidade intervalar para cada mineral na Bacia de Santos pode ser inferido, conforme sugestões apresentadas por em Meneguim *et al.* (2015). Amaral *et al.* (2015), além de calcular estes valores para sua área, também citam vários outros autores e suas respectivas tabelas para essas velocidades. Essas velocidades são convertidas em valores de vagarosidade e aplicadas às regiões onde o registro sônico não foi adquirido.

Todos os procedimentos descritos levarão aos valores que computamos de densidade a partir do perfil sônico, de modo que teremos regiões onde ambos os perfis serão convertidos para valores discretos. Esse procedimento não é tão preciso quanto a perfilagem real, mas é o máximo de informações que podemos extrair dos poços; e ajudará em todo o processo de inversão sísmica. A Figura 3 resume todos os passos descritos acima.

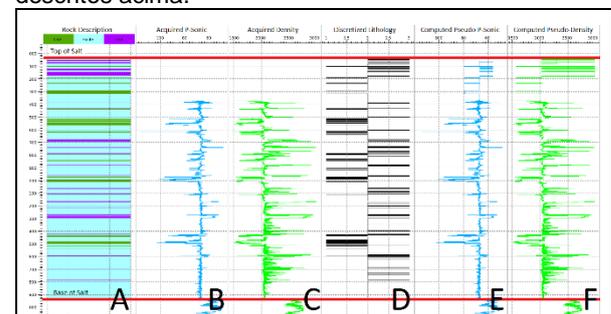


Figure 3: (A) descrições de rochas. (B) Perfil sônico adquirido para um determinado poço, com falta de informação em parte da seção evaporítica. (C) Perfil de densidade conforme adquirido, também com informações ausentes. (D) Registro de pseudo-fácies discreto, discriminando entre “LVS”, halita e “HVS”, obtidos a partir da interpretação de rochas dentro da seção de evaporítica baseada em “A”. (E) Todo o registro sônico/pseudo-sônico, gerado pela conclusão da parte ausente do registro adquirido em “B” com valores sônicos para cada classe, como visto em “D”. (F) Registro inteiro de densidade/pseudo-densidade, criado pela conclusão da parte ausente do registro em “C”, aplicando a correlação da figura 3 ao registro sônico/pseudo-sônico de “E”. Adaptado de Barros *et al.* (2017).

Exemplos e Aplicações

Os principais exemplos que apresentaremos são resultados de dois aspectos que mencionamos anteriormente neste artigo.

Na figura 4, podemos ver como a estratificação da amplitude sísmica corresponde às mudanças litológicas identificadas nos poços, e a distribuição de sais em diferentes poços. A seção evaporítica é composta principalmente de halita, com menores percentuais de anidrita, carnalita, taquidrita, silvinita e outros minerais e rochas.

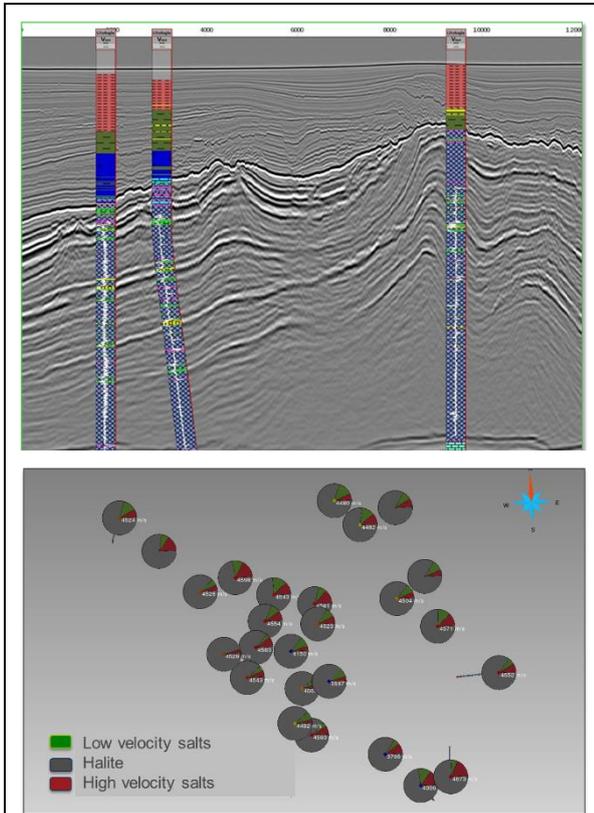


Figure 4: (A) Litologia do poço vista sobre os dados de amplitude sísmica, ilustrando a correspondência entre a sísmica e a estratificação observada nos poços; (B) Distribuição de diferentes tipos de minerais na seção evaporítica para cada poço em uma única área de estudo. Adaptado de Amaral et al., (2015).

A Figura 5 ilustra quantas informações podemos adicionar ao modelo de velocidade a partir de uma inversão sísmica acústica. A impedância P é usada para distinguir entre os diferentes tipos de evaporitos, que por sua vez são utilizados para substituir a velocidade intervalar de onda P (V_p) do modelo original para valores mais realistas em termos de velocidade, conforme preconizado pela geologia existente e amplamente discutida na literatura consultada e abordada neste artigo.

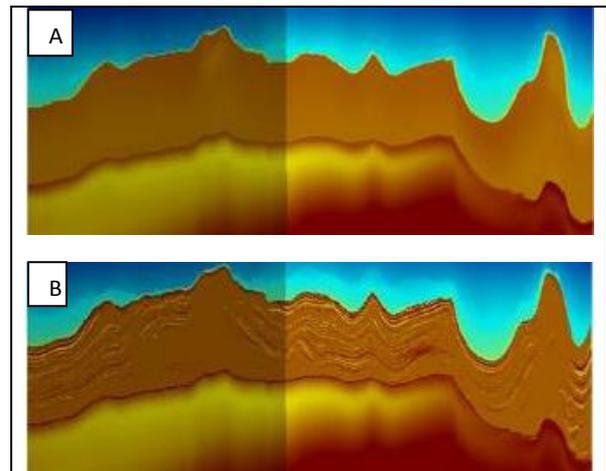


Figura 5: (A) Modelo original da velocidade da seção evaporítica sem estratificação; (B) Modelo de velocidades da mesma seção obtido a partir dos resultados de um estudo de inversão acústica. Adaptado de Teixeira et al. (2016).

Conclusões

Como discutido anteriormente, O estudo de reservatórios da seção Pré-Sal na Bacia de Santos é uma tarefa complexa, devido não só ao tipo de rochas reservatório, mas também à heterogeneidade das rochas sobrepostas, aspectos estruturais, e à confiabilidade das imagens sísmicas geradas.

Como apresentado neste trabalho existem várias formas de lidar com esses problemas e exploramos os principais aspectos a serem considerados quando se pretende realizar um estudo de inversão sísmica na seção de evaporítica, visando gerar *inputs* mais confiáveis em termos de características geológicas observadas e calibradas às informações de poços já perfurados, para diversas aplicações.

Apesar de todas as imprecisões, ou mesmo imperfeições do método aqui proposto, acreditamos que estes insumos são de extrema relevância, para os estudos de inversão. Acreditamos, ainda, que a inversão é o caminho, mais simples e realista, a ser seguido para minimizar, ou mesmo resolver, problemas e questões relacionadas à resolução, classificação de rochas, incertezas e assim por diante. Desta forma, a abordagem aqui proposta tende a ser uma nova área de pesquisa a ser explorada.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Petrobras e à Emerson-Paradigm por darem o suporte, tempo e dados para esta pesquisa, bem como por permitir a publicação.

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. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ, Brazil. doi: 10.1190/sbgf2015-131.

- Araújo, S., Falcão, L., Oliveira, L., Rosseto, J., Maul, A., Gobatto, F. & González, M.**, 2016. Melhoria da Imagem no Pré-Sal, a partir de Atualizações de Velocidade de Alta Resolução no Pós-Sal e da Incorporação de Estratificações Dentro da Seção Evaporítica. (XV SIMGEF – Simpósio de Geofísica de Petrobras – Petrobras Internal Publication). Rio de Janeiro – RJ, Brazil.
- Barros, P., Amaral, P., Girard T., Martini, A., Maul, A., & González, M.**, 2017. Inversion in the Santos Salt-Focused Basin (15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2017). Rio de Janeiro – RJ, Brazil. doi:10.1190/sbgf2017-223.
- Borges, F., Apoluceno, D., Selbach, H., Maul, A. & Lima, G.**, 2015. Thickness-Based Approach for Evaporites Seismic Velocities in Campos Basin. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ, Brazil.
- Borges, F.**, 2016. Combining Seismic and Well Data to Achieve Better Depth Prediction: a Case Study in Campos Basin, Brazil. 57th. SPWLA (The Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts Annual Symposium). Reykjavik, Iceland.
- Fonseca, J., Teixeira, L., Maul, A., Barros, P., Boechat, J. & González, M.** 2018. Modelling Geological Layers into new Velocity Models for Seismic Migration Process: A Brazilian pre-Salt Case. (First EAGE/PESGB Workshop on Velocities). London, United Kingdom. doi: 10.3997/2214-4609.201800010.
- Gobatto, F., Maul, A., Falcão, L., Teixeira, L., Boechat, J.B., González, M. & González, G.**, 2016. Refining Velocity Model within the Salt Section in Santos Basin: an Innovative Workflow to include the Existing Stratification and its Considerations. (SEG – Society of Exploration Geophysicist – 2016) – Dallas – TX, USA. doi: 10.1190/segam2016-13685489.1.
- González, M., Gobatto, F., Maul, A., Falcão, L., González, G., Oliveira, L., Meneguim, T. & Amaral, P.J.**, 2016. Proposed Workflow to Incorporate Stratification within Salt Section using Velocity and Seismic Attributes – (Third EAGE/SBGf Workshop on Quantitative Seismic Interpretation of Lacustrine Carbonates). Rio de Janeiro – RJ, Brazil. doi: 10.3997/2214-4609.201600050.
- Jardim, F., Maul, A., Falcão, L., & González, G.**, 2015. Estimating Amplitude Uncertainties through Illumination Studies for a Pre-Salt Reservoir. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ, Brazil. doi:10.1190/sbgf2015-160.
- Maul, A., Falcão, L., Gobatto, F., Novellino, V., Jardim, F., Oliveira, L., Meneguim, T., Amaral, P.J., Borges, F., Teixeira, L., Monteiro R.C., González, G. & González, M.**, 2016. Incorporação de Estratificações dentro da Seção Evaporítica Utilizando Velocidades e Atributos Sísmicos – (Informe Geofísico da Petrobras – IGP-152 – Petrobras Internal Publication).
- Maul, A., Jardim, F., Falcão, L., & González, G.**, 2015. Observing Amplitude Uncertainties for a Pre-Salt Reservoir Using Illumination Study (Hit-Maps). (77th EAGE Conference & Exhibition 2015) – Madrid, Spain. doi: 10.3997/2214-4609.201412921.
- Meneguim, T., Mendes, S.C., Maul, A., Falcão, L., González, M. & González, G.**, 2015. Combining Seismic Facies Analysis and Well Information to Guide New Interval Velocity Models for a Pre-Salt Study, Santos Basin, Brazil. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ, Brazil. doi:10.1190/sbgf2015-271
- Meneguim, T., Mendes, S.C., Maul, A., Falcão, L., González, M. & González, G.**, 2016. Refinamento do Modelo de Reservatórios a partir da Caracterização das Estratificações Salíferas Baseada em Atributos Sísmicos, Pólo Pré-Sal da Bacia de Santos. (48^o Congresso Brasileiro de Geologia). Porto Alegre – RS, Brazil.
- Oliveira, L.C., Falcão, L., Maul, A., Rosseto, J.A., González, M. & González, G.**, 2015. Geological Velocity Approach in Order to Obtain a Detailed Velocity Model for the Evaporitic Section, Santos Basin. (14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 2015) – Rio de Janeiro – RJ, Brazil. doi:10.1190/sbgf2015-273.
- Teixeira, L., Gobatto, F., Maul, A., Cruz, N., Gonçalves, C., Laquini, J.**, 2016. Aplicação da Inversão Sísmica para Modelagem de Velocidades, Fácies e Geomecânica na Seção Evaporítica do Campo de Lula. (XV SIMGEF – Simpósio de Geofísica de Petrobras – Petrobras Internal Publication). Rio de Janeiro – RJ, Brazil.
- Yamamoto, T., Maul, A., Born, E., Gobatto, F., Campos, M.T. & González, M.**, 2016. Incorporação de Estratificações Salíferas Através do Modelo de Velocidade em um Projeto da Bacia de Santos (VII Simpósio Brasileiro de Geofísica – 2016). Ouro Preto – MG, Brazil.