



NOVOS DADOS DE BATIMETRIA E PERFILADOR DE SUBFUNDO SOBRE UM GRANDE CAMPO DE POCKMARKS NA REGIÃO DA BACIA DE SANTOS, PORÇÃO SUDESTE DA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA.

***Autores: 1º Ten (T) Fernanda Monteiro Passamani¹
CT Eduardo Pontual Dubeux²***

RESUMO

O levantamento realizado pelo Navio de Pesquisa Hidroceanoográfico “Vital de Oliveira” na região da bacia de Santos permitiu a descrição de pockmarks normais e gigantes (diâmetros de até 893 m) em superfície batimétrica multifeixe. O alinhamento de pockmarks e zonas de transparência acústica em perfis sísmicos de subfundo sugerem a canalização e migração de fluidos através de zonas de falhas geológicas subverticais.

Palavras-chave:

Batimetria multifeixe. Migração de fluidos. Óleo e gás

ABSTRACT

The survey conducted by the “Vital de Oliveira” Hydroceanographic Research Vessel in the Santos basin region has allowed the description of normal and giant pockmarks (diameters up to 893 m) within the multibeam bathymetry surface data. Pockmarks strings and acoustic blanking in seismic sub-bottom profilers suggest channeling and fluid migration along subvertical geologic fault zones.

Keywords:

Multibeam bathymetry, fluid migration, oil and gas

¹ Ajudante da Seção de Bancos de Dados Hidrográficos do CHM, Geóloga pela UFRJ, MSc em Ciências (Geologia) pela UFRJ;

² Hidrógrafo. Encarregado da Divisão de Hidrografia do NPqHo “Vital de Oliveira”, Engenheiro Mecânico pela UFPE.

1. INTRODUÇÃO

Pockmarks podem ser descritos como depressões ou crateras que ocorrem na superfície de fundo de ambientes marinhos, oceânicos e lacustres. A origem e distribuição destas feições têm sido amplamente discutidas na literatura e sua ocorrência associada ao escape de fluidos (líquidos ou gases). Os fluidos podem ser originados em ambientes rasos ou profundos e então, migrar através de conduítes (ex. falhas e fraturas geológicas) ou através de sedimentos porosos na coluna sedimentar (ex. Hovland e Judd, 1988, Hovland et al., 2002, Plaza-Faverola et al., 2011). O desenvolvimento das técnicas de imageamento de feições submarinas tem permitido a descoberta de novos campos de *pockmarks* em diversos tipos de ambientes geológicos distribuídos por todo o mundo. Como recentemente resumido por Spina (2018), o estudo destas feições vem sendo intensificado

à medida que sistemas ativos de migração de hidrocarbonetos são descobertos associados aos campos de *pockmarks*. A emissão espontânea do metano pode indicar a existência de uma reserva de hidrocarbonetos pesados próxima a uma reserva de gases, e neste caso, os *pockmarks* seriam indicadores de existência de petróleo. Por esta razão, os estudos sobre a gênese destas feições são realizados majoritariamente pela indústria de óleo e gás.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está localizada na porção sudeste da margem continental brasileira, na região da bacia de Santos (Figura 1). A bacia de Santos é um dos maiores campos de petróleo do Atlântico Sul e, por esta razão, a maioria das pesquisas realizadas na região são conduzidas pela Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

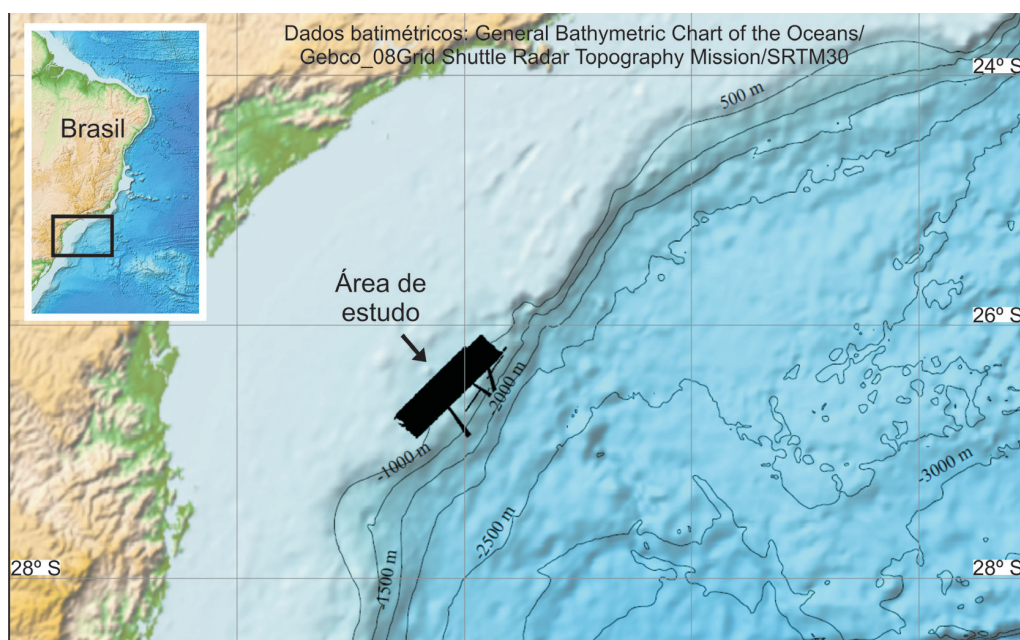


Figura 1 - Localização da área de estudo na região da bacia de Santos, porção sudeste da margem continental brasileira (detalhe).



(ANP) e por outras empresas e pesquisadores envolvidos em projetos ligados ao ramo petrolífero.

A geomorfologia da bacia de Santos e a ocorrência de pockmarks em regiões próximas à área de estudo têm sido discutidas por alguns autores. Calder et al. (2002) analisaram dados detalhados de batimetria multifeixe e perfis de reflexão sísmica multicanal em uma região de profundidades entre 600 e 2300 m. Estes autores descreveram diversas depressões alinhadas a planos de falhas geológicas, paralelas ou perpendiculares à quebra da plataforma. Foram observados diversos pockmarks com diâmetros de aproximadamente 350 m e um menor número de depressões maiores, com diâmetros próximos a 2.500 m. Estas últimas ocorrem preenchidas com sedimentos, indicando sua inatividade. Os referidos autores concluem que o alinhamento das feições aos planos de falhas sugere que houve uma migração preferencial dos fluidos. Os perfis sísmicos mostraram que estas falhas estão associadas a domos de sal em subsuperfície.

A observação e descrição das ocorrências de pockmarks na área de estudo foi publicada primeiramente por Schattner et al. (2016) e posteriormente por Mahiques et al. (2017). Estes autores analisaram os dados de batimetria multifeixe coletados em 2011 pelo Navio Hidrográfico (NHi) “Sirius”, que ensonificou uma área de 2.864 km² entre 285 e 865 m de profundidade, juntamente a perfis de reflexão sísmica multicanal cedidos pela ANP. A partir destes dados, foi observado um campo de pockmarks entre as isóbatas de 353 e 865 m, e identificadas um total de 984 crateras. As feições descritas possuem diâmetros de até 230 m e são, em sua maioria, elípticas e assimétricas. A partir dos perfis sísmicos, os autores observaram a ocorrência

de diápiros de sal e planos de falha. As falhas presentes nos perfis foram relacionadas aos movimentos ascendentes destes corpos rochosos menos densos.

Mahiques et al. (2017) sugerem que a migração canalizada de fluidos nesta região estaria associada às falhas geradas em eventos diapíricos. Os autores também observaram a presença de anomalias acústicas nos perfis, marcadas pela descontinuidade lateral dos refletores acústicos, gerando zonas de registros “caóticos”. Essas evidências sísmicas foram previamente descritas por Hovland e Judd (1988) e associadas às zonas de escape de gases. A presença de gás nos sedimentos mascara as reflexões existentes devido ao aumento da dispersão da energia acústica, e gera zonas de turbidez acústica ou transparência acústica (onde não são observados os refletores sísmicos), termos comumente descritos na literatura como acoustic blanking.

3. METODOLOGIA

3.1. Aquisição e Processamento

No presente estudo foram analisados dados de batimetria multifeixe e de perfilador de subfundo coletados pelo Navio de Pesquisa Hidroceanográfico (NPqHo) “Vital de Oliveira” em comissão realizada no período de abril a junho de 2018. O navio utiliza dois sistemas de posicionamento Seapath 300, os quais fornecem informação de posição e proa (*heading*). Estes sistemas recebem sinal de correção diferencial DGNSS com precisão submétrica. Os dados de atitude (roll, pitch e heave) foram obtidos por meio de uma MRU-5 (*Motion Reference Unit*), a qual faz parte do sistema Seapath, da empresa Kongsberg Maritime. Essas informações são enviadas aos diversos





equipamentos em operação, permitindo o georreferenciamento dos dados compensados da atitude do navio.

Para que os diferentes equipamentos acústicos empregados na comissão emitissem os sinais de maneira ordenada, foi utilizado um sistema de sincronismo K-Sync, da mesma fabricante. Este sistema aloca uma janela de tempo suficiente para ocorrerem a transmissão e a recepção do sinal acústico de cada equipamento. A utilização do K-Sync contribuiu para a qualidade do dado adquirido, ao passo que não permitiu a interferência entre os sinais acústicos emitidos.

A batimetria foi adquirida utilizando um ecobatímetro multifeixe EM 122, também da Kongsberg, que opera na faixa de frequência de 12 kHz. A aquisição foi realizada utilizando o software SIS 4.1.5, e com ângulo de abertura de 60° para cada bordo. O equipamento recebe a informação de velocidade do som na face do transdutor em tempo real por meio de um smart sensor instalado na gôndola do navio. Já os perfis verticais de velocidade do som eram atualizados rotineiramente por dados obtidos nas estações oceanográficas e por meio de lançamentos de XBT. O processamento dos dados hidrográficos, incluindo os dados de navegação e atitude, foi realizado no software Hips and Sips 9.1, da Teledyne CARIS, tendo como resultado uma superfície CUBE (*Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*) com resolução de 20 m.

A aquisição dos dados sísmicos foi realizada utilizando o perfilador de subfundo SBP 120 e o software de aquisição KM SBP OPU 1.5.3, ambos da Kongsberg. O equipamento operou com pulso do tipo linear chirp-up na faixa de frequência de 2,5 a 6,5 kHz. Os ajustes de largura de pulso e de atenuação da potência eram realizados conforme a

variação de profundidade local. Os valores utilizados variaram entre 5 e 50 ms para o pulso e entre -30 e 0 db, para o ajuste de potência. Pelo seu princípio de funcionamento, o perfilador de subfundo não necessita de um perfil vertical de velocidade do som na água como o multifeixe, bastando apenas a informação da velocidade do som na face do transdutor, da velocidade média ao longo da coluna d'água e da velocidade do som na profundidade onde o fundo foi detectado. Essas e outras informações chegam ao equipamento por meio do SRV datagram, que é enviado pelo ecobatímetro multifeixe.

3.2. Descrição e classificação dos pockmarks

Os *pockmarks* observados foram descritos e classificados conforme as definições de Hovland e Judd (1988) e Hovland et al. (2002). Estas depressões podem ocorrer de tamanhos e formatos variados e são subdivididas em diferentes classes morfológicas. As feições definidas como “unitárias” são pequenas depressões, tipicamente entre 1 e 10 m de diâmetro e até 0,5 m de altura, sendo cada feição o provável resultado de um único evento de escape de fluido. As feições de ocorrência mais comum são descritas como *pockmarks* “normais”, que são geralmente circulares ou semicirculares, com diâmetro variando entre 10 e 700 m e altura entre 1 e 45 m. A geometria destas feições pode ser subdividida em regular, quando o relevo do fundo possui baixo ângulo, similar a fundo de bacia; ou assimétrica, quando se tem uma maior inclinação em um dos lados da feição. Quando os *pockmarks* possuem um eixo maior em certa direção estas feições são ditas alongadas. Esta classe ocorre em geral em taludes e áreas com fortes correntes de fundo.



Ainda de acordo com os autores supracitados, as depressões podem ser encontradas de forma isolada ou como um aglomerado de feições. Neste último caso, o termo utilizado é “complexo” de *pockmarks*. As feições que ocorrem em algum alinhamento preferencial são comumente resultado da migração concentrada de fluidos (líquidos ou gases) através de zonas preferenciais, como planos de falhas sub-verticais, litologias porosas, ou outras zonas de fraqueza encontradas em subsuperfície. As feições resultantes são denominadas de *pockmarks* em corda ou string.

Pockmarks com diâmetros maiores que 250 m foram classificados por Foland et al. (1999) como “gigantes” (*giant pockmarks*). Enquanto o termo *mega-pockmarks* foi introduzido por Pilcher e Argent (2007) para descrever as feições com mais de 1000 m de diâmetro, observadas por estes autores na margem continental oeste do continente africano. Considerando estas classificações, em conjunto com as descrições de Hovland et al. (2002), consideraremos como gigantes aquelas feições que tenham diâmetros entre 700 e 1000 m.

3.3. Comparação com os dados do CHM

Os *pockmarks* foram observados durante a aquisição dos dados batimétricos e, simultaneamente, também eram notadas anomalias acústicas nos perfis de sub-superfície adquiridos com o perfilador de subfundo. Após o processamento dos dados batimétricos, conforme os procedimentos descritos anteriormente, a superfície gerada permitiu uma descrição e classificação detalhada das feições. Posteriormente, foi realizada uma busca no Banco de Dados Batimétricos do Centro de Hidrografia da Marinha

(CHM), a fim de verificar a ocorrência destas feições em sondagens multifeixe realizadas previamente na área de estudo. Verificou-se a ocorrência destas feições em levantamentos realizados entre os anos 2009 e 2015. Os resultados apresentados partem da descrição das feições coletadas com o NPqHo “Vital de Oliveira” e sua comparação com os dados pré-existentes na área de estudo.

4. RESULTADOS

Os dados de batimetria multifeixe coletados pelo NPqHo “Vital de Oliveira” revelaram um campo de *pockmarks* entre 300 e 1100 m de profundidade, cobrindo uma área de aproximadamente 100 km², onde foram observadas 68 feições (Figura 2A). A superfície de alta resolução gerada a partir destes dados foi associada a outros quatro levantamentos de batimetria multifeixe presentes no banco de dados do CHM, realizados pelo Navio Polar (NPO) “Almirante Maximiano”, em 2015, pelo NHi “Sirius”, em 2011, e pelo Navio de Pesquisa “Sea Surveyor”, em 2009 e 2010. (Figura 2B, linhas a – e). A partir da integração destes dados, observa-se um grande campo de *pockmarks* com uma área total ensonificada de aproximadamente 3300 km² e uma área total inferida de aproximadamente 4200 km², com direção preferencial NE-SW, e um total de 1120 crateras observadas.

Para uma melhor observação das feições, foram realizados perfis verticais sobre cada um dos 68 *pockmarks* identificados na linha “a” (Figura 3). As feições observadas são majoritariamente semi-circulares a circulares e sua geometria varia de regular a assimétrica. A maior parte dos *pockmarks* foi classificada como normal (diâmetros até 700 m), mas alguns gigantes também foram observados, chegando a aproximadamente 100





m de altura e diâmetros de até 893 m. Os pockmarks descritos podem ser encontrados como feições isoladas ou em complexos. Foram observados alinhamentos de pockmarks, que podem chegar a alguns quilômetros de extensão, entretanto não foi possível definir um sentido preferencial para este grupo de feições.

Durante a aquisição, simultaneamente à observação das feições na batimetria, foram registradas anomalias

acústicas nos dados de perfilador de subfundo. Os perfis registraram um substrato sedimentar e algumas feições observadas foram interpretadas como estruturas de deformação (dobras e falhas). Nas áreas imediatamente abaixo de cada pockmark ensonificado, por vezes puderam ser observadas interrupções do registro sísmico, gerando zonas de transparência ou turbidez acústica (acoustic blanking) subverticais (Figura 4).

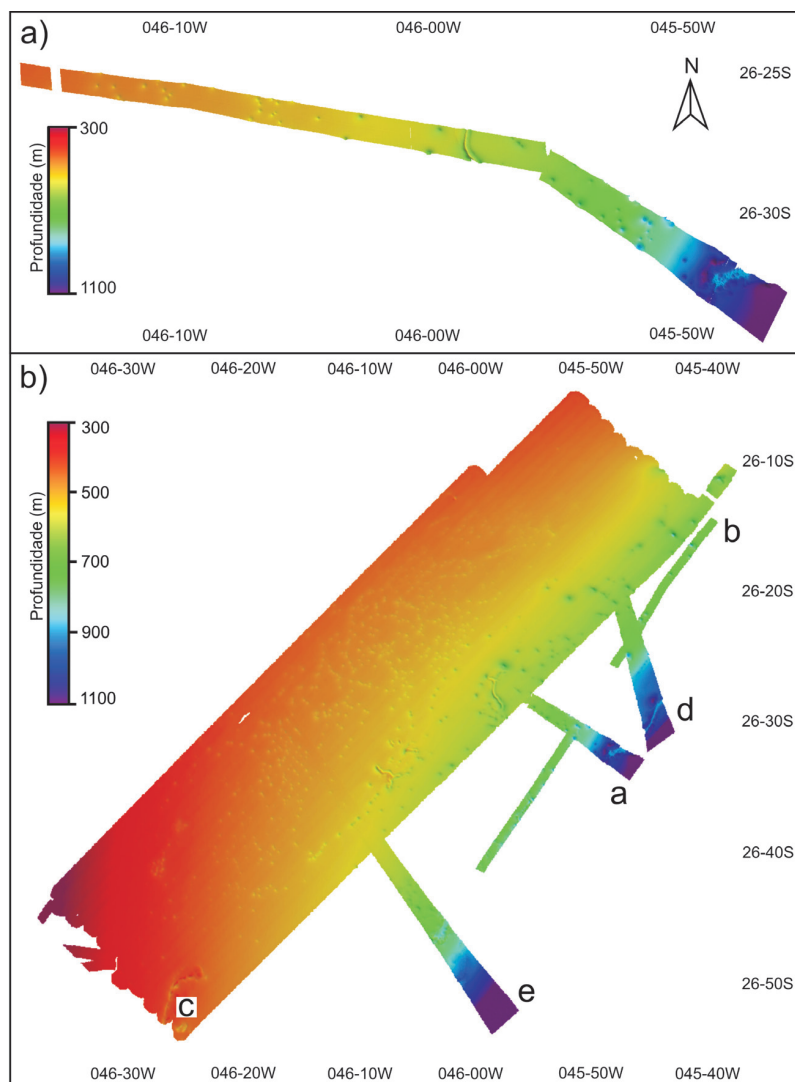


Figura 2 – A) Superfície batimétrica multifeixe gerada a partir de aquisição com NPqHo “Vital de Oliveira”. B) Integração dos novos dados de batimetria (a) com os dados de batimetria multifeixe selecionados a partir do banco de dados do Centro de Hidrografia da Marinha: (b) – NPo “Almirante Maximiano”, 2015; (c) – NHi “Sirius”, 2011; (d)/(e) – Sea Surveyor, 2010 and 2009.

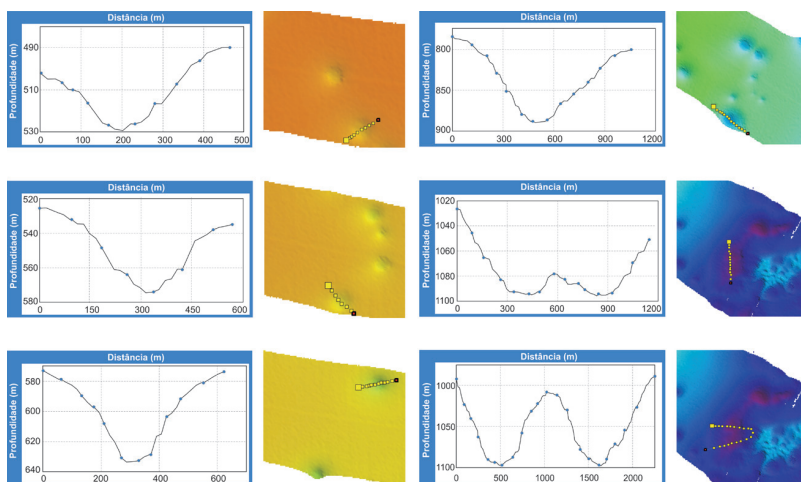


Figura 3 – Perfis sobre alguns dos pockmarks identificados na linha de aquisição “a”, do NPqHo “Vital de Oliveira”. Nestes perfis podem ser observadas feições de geometria simétrica e assimétrica, com diâmetros e profundidades variadas, isoladas e em complexos.

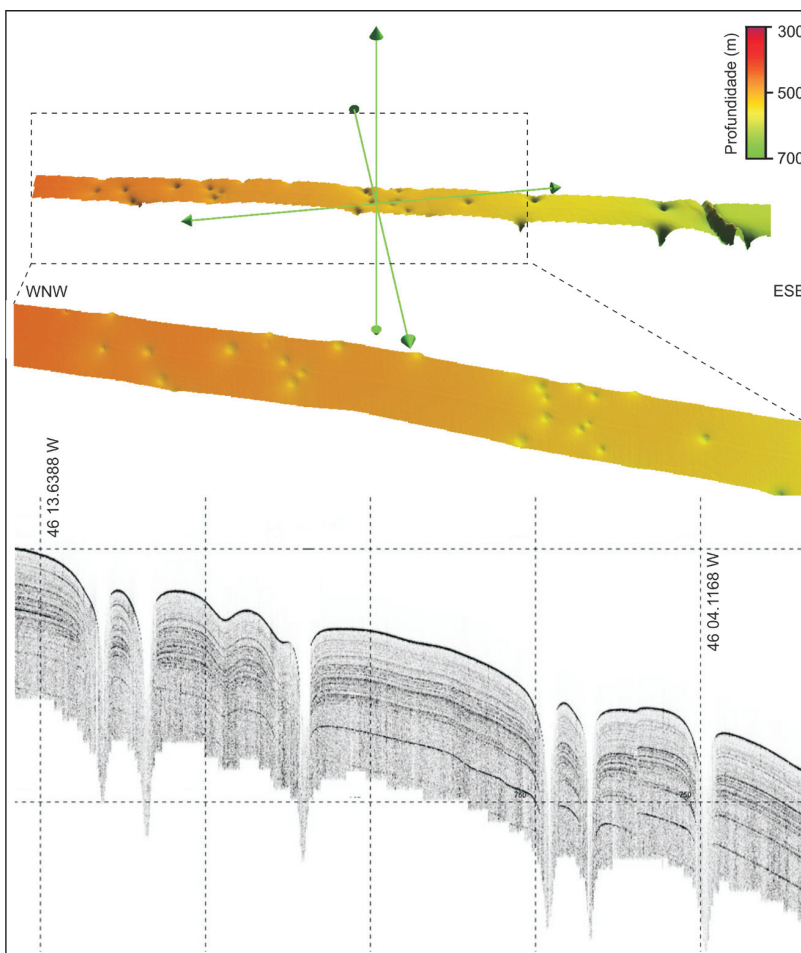


Figura 4 – Dados de batimetria multifeixe comparados ao perfil de subfundo, onde são verificadas anomalias acústicas nas áreas exatamente abaixo das feições em superfície.





5. CONCLUSÕES

Novos dados de batimetria multi-feixe e perfilador de subfundo, coletados pelo NPqHo “Vital de Oliveira” em 2018, permitiram agregar informações sobre a ocorrência de *pockmarks* na região da bacia de Santos. A partir da superfície gerada, foram observadas e descritas 68 feições, majoritariamente classificadas como *pockmarks* normais, e alguns *pockmarks* gigantes, com diâmetros chegando a 893 m e alturas de aproximadamente 100 m. A comparação dos novos dados com outras superfícies multifeixe do banco de dados do CHM possibilitou a observação de um grande campo de *pockmarks* nesta região, entre as isóbatas de 300 e 1100 m. O campo observado possui direção preferencial NE-SW, uma área total inferida de aproximadamente 4.200 km² e um total de 1120 crateras identificadas. A origem destas feições, apesar de ser amplamente discutida na literatura, ainda carece de informações na região de estudo. A presença de *pockmarks* em corda (strings) sugere que houve migração concentrada de fluidos

através de zonas preferenciais de fraqueza. As zonas de transparência ou turbidez acústica observadas nos registros de perfilador de subfundo sugerem a presença de gás nos sedimentos de superfície a partir da migração canalizada deste gás através de estruturas sub-verticais. Parte das feições observadas neste trabalho já havia sido descrita por Schattner et al. (2016) e Mahiques et al. (2017). Estes autores relacionaram a canalização da migração de fluidos à ocorrência de falhas geradas a partir de movimentos diapíricos (estruturas dômicas geradas pela ascensão de camadas menos densas, por exemplo, de sal). Em outras regiões da bacia de Santos, como descrito por Calder et al. (2002), os *pockmarks* também encontram-se associados à estruturas em subsuperfície relacionadas a eventos de ascendência dos diápiros de sal.

À medida que novos levantamentos sejam realizados nesta região, novas feições de fundo poderão ser observadas e descritas, permitindo a extensão e um maior entendimento sobre a gênese deste campo de *pockmarks*.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALDER, B., FONSECA, L., FRANCOLIN, J. Automatic estimation of the seafloor geomorphology of the Santos Basin, Brazil. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*, p. 301, 2002.
- FOLAND, S.S., MAHER, N., YUN, J.W. Pockmarks along the California Continental Margin: implications for fluid flow. *Abstract. AAPG Bull.* 83, 681–706, 1999.
- HOVLAND, M., GARDNER, J. V., JUDD, A. G. The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, v. 2, 127–136, 2002.
- HOVLAND, M. e JUDD, A. G. *Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Graham & Trotman, London, 1988.



MAHIQUES, M. M., SCHATNER, U., LAZAR, M., SUMIDA, P. Y. G., SOUZA, L. A. P. An extensive pockmark field on the upper Atlantic margin of Southeast Brazil: spatial analysis and its relationship with salt diapirism. *Science Direct*, v. 3(2), e00257, 2017.

PILCHER, R. e ARGENT, J. Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin. *Marine Geology*, 244, 15–32, 2007.

PLAZA-FAVEROLA, A., BUNZ, S., MIENERT, J. Repeated fluid expulsion through sub-sea-bed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 305, 297–308, 2011.

SCHATNER, U., LAZAR, M., SOUZA, L. A. P., BRINK, Q. T. Pockmark asymmetry and seafloor currents in the Santos Basin offshore Brazil. *Geo-Marine Letters*, 2016.

SPINA, R. Pockmarks as indicators to decipher some natural phenomena in the field of geology and beyond: state of knowledge and its implications. *Journal of Environmental Geology*, v. 2 (s1), p. 1–2, 2018.

