

O controle das estruturas de sal no escape de fluidos na Bacia de Santos

Dutra, I., UFF; Ferrari, A.L., UFF; Mepen, M., Petrogal; Gambôa, L.A.P., UFF

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX 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

Na Bacia de Santos, uma vasta província petrolífera representada por reservatórios carbonáticos está recoberta por uma sequência salífera, que representa um selo muito efetivo. Os reservatórios presentes nesta província apresentam acumulações significativas de hidrocarbonetos gasosos. A geometria estrutural da bacia relacionada à intensa halocinese proporciona eficazes vias de migração de fluidos para o fundo do mar. Estruturas geradas pelo escape destes fluidos no fundo do mar foram definidas para uma porção da Bacia de Santos a partir do mapeamento integrado de dados 3D. As depressões e *pockmarks* detectados arranjam-se acima de diápiros de sal seguindo a deformação do sal. Observou-se nas seções sísmicas que a migração dos fluidos acontece de forma canalizada através de chaminés, horizontes estratigráficos e, principalmente, falhas. Correntes de fundo talvez tenham contribuído para o tamanho excessivo de gigantes e mega-*pockmarks*.

Introdução

A migração de fluidos acontece por meio de fraturas, falhas geológicas, superfícies estratigráficas e chaminés soterradas. O fluido pode se originar de qualquer profundidade abaixo da superfície e de uma grande variedade de ambientes (HOVLAND; GARDNER; JUDD, 2002). Os eventos de expulsão de fluidos para a superfície, tal como sedimentos fluidizados, hidrocarbonetos, água de formação e gases da subsuperfície, criam uma variedade morfológica de estruturas geológicas no fundo do mar. Este processo pode ser revelado pela formação de depressões (e.g., *pockmarks*), vulcões de lama e montes carbonáticos.

Estudos na Bacia de Santos associam a existência de *pockmarks* com o diapirismo intenso da região. Na bacia, a ascensão do sal atua na promoção de falhas distensivas e zonas de permeabilidade que direcionam os fluidos às seqüências superiores (MAHIQUES et al., 2017; PIAUILINO, 2002; RAMOS et al., 2019; SCHATTNER et al., 2018). Bacias controladas pela tectônica do sal englobam alguns dos principais reservatórios de hidrocarbonetos do mundo. O potencial exploratório delas é determinado pelas complexas interações entre as rochas encaixantes e a geometria estrutural relacionada à mobilidade do sal. As zonas que ocorrem dentro dos sistemas de falhas são de particular interesse para a indústria.

Vista a relevância do assunto, este trabalho propõe avaliar a influência de estruturas profundas, especificamente os diápiros de sal, na migração de fluidos para o fundo do mar na Bacia de Santos. A área de estudo compreende o prospecto de Júpiter, localizado no polígono do pré-sal. A porção mapeada estende-se entre as isóbatas 2000 m e 2700 m do Platô de São Paulo, a 250 Km da costa do Rio de Janeiro (Fig. 1).

No prospecto de Júpiter são reportadas uma das maiores concentrações de CO₂ nos reservatórios do pré-sal. A partir de análises geofísicas e isotópicas, comprovou-se que este gás tem sua origem do manto da Terra (FERRAZ et al., 2019; GAMBOA et al., 2019; SANTOS NETO; CERQUEIRA; PRINZHOFER, 2012). É difícil estimar a distribuição do CO₂ dentro da bacia. Porém, sabe-se que um gás originado do manto pode atingir os níveis mais rasos (COOPER et al., 1997).

Hoje, apesar da compreensão da origem deste gás, todas as variáveis que controlaram sua migração e a repercussão dele em níveis mais rasos do substrato, como o pós-sal, ainda são desconhecidas. Este trabalho buscou fornecer uma previsão confiável dos potenciais locais de escape de fluidos no fundo do mar na região do prospecto de Júpiter. Os resultados do estudo podem complementar o entendimento do papel de estruturas profundas em sedimentos mais recentes, além de beneficiar atividades de avaliação de riscos geológicos e de captura e armazenamento de CO₂.

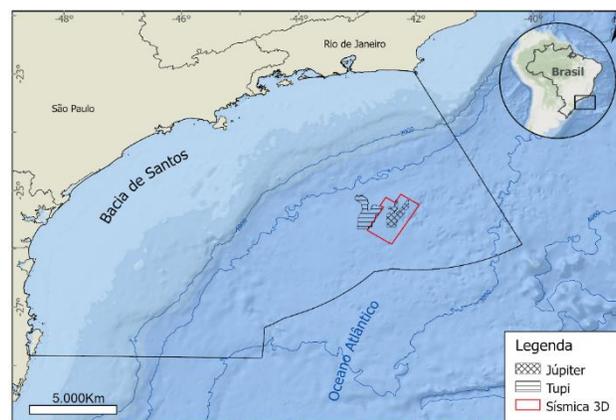


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. O prospecto de Júpiter encontra-se compreendido pelo dado sísmico 3D.

Dados e Métodos

O mapeamento das feições de escape de fluidos foi baseado na interpretação de dados sísmicos de reflexão 3D. O dado 3D cobre uma área de até 4300 Km² da Bacia de Santos, possui espaçamento de 12,5m x 12,5m para *inlines* e *crosslines* (i.e., resolução horizontal), intervalo de

amostragem de 5 ms e está apresentado no domínio da profundidade. Considerada a frequência dominante entre 40 e 60 Hz e a velocidade de 1800 m/s para os sedimentos próximos ao fundo do mar, a resolução vertical foi estimada entre 11,25 m e 7,5 m. O volume sísmico foi manipulado dentro da interface do programa DecisionSpace® Geosciences (Landmark).

A expressão de estruturas no fundo do mar indicativas de escape de fluidos (*pockmarks*, vulcões, corais) foram usadas como ponto de partida para o estudo da dinâmica dos fluidos na área. A primeira etapa do mapeamento consistiu na extração do horizonte sísmico do fundo do mar. As coordenadas X, Y e Z da batimetria foram extraídas para formato grid com tamanhos de célula de 13,5 m, a fim de uniformizá-las. O grid foi exportado para a plataforma do ArcGis Pro®, onde realizou-se o cálculo do Índice de Posição Batimétrica (*Bathymetric Position Index – BPI*; e.g., LUNDBLAD et al., 2006) do fundo do mar. Este índice permite a discriminação de depressões e altos topográficos dentro de um raio de procura determinado. Para o estudo foi utilizado um raio de 400m.

O passo seguinte do estudo dedicou-se em conferir as feições do relevo do fundo do mar na visão transversal, em seções sísmicas. Deste modo, buscou-se investigar o mecanismo de formação para cada feição, a influência de estruturas profundas e a presença de gás. A extração do horizonte do sal e de mapas estruturais complementou as interpretações.

Resultados

O dado revelou uma batimetria marcada por diversas minibacias de sal, escarpas erodidas, diápiros quase aflorantes e numerosas depressões circulares, alongadas e semi-circulares (Fig. 2). As depressões detectadas são bem variadas e de proporções consideráveis (90 m a 7 Km de comprimento).

O Horizonte do topo do sal e mapas estruturais revelaram uma relação positiva dos diápiros e falhas distensivas associadas com as depressões mapeadas (Fig. 2). Os diápiros e as falhas possuem três direções preferenciais: N-S, WNW-ESE e NNE-SSW. Em sua maioria, as depressões são encontradas aglomeradas e alinhadas nas mesmas direções acima dessas estruturas. Estudos pretéritos sobre a orientação dos eixos de *pockmarks* na Bacia de Santos, como o de Mahiques et al. (2017), obtiveram resultados semelhantes.

Algumas das depressões alongadas foram interpretadas como estruturas de colapso devido à intensa halocinese da região. Elas ocorrem ao longo de falhas, paralelas às bordas de diápiros quase expostos e escarpas erodidas. O processo de colapso pode ser o resultado do progressivo escape de fluidos, intensificado através de vias criadas pela atividade do sal em ambientes distensivos (LEÓN et al., 2010).

Pockmarks circulares à elípticos estão distribuídos adjacentes ou internos a estruturas de colapso, em estreitas depressões e alinhados a falhas.

Ocasionalmente, depósitos montiformes, adelgaçados em direção às depressões, são observados nos flancos.

Em regiões que registram menor inflação do sal, feições lineares, registradas pelo mapa BPI, são observadas seguindo a direção de chaminés soterradas. As chaminés originam-se de horizontes interceptados por falhas enraizadas em diápiros. A subida de gás e fluidos através dessas chaminés favoreceu a geração de *pockmarks*. *Pockmarks* que acompanhavam as feições retilíneas, ao longo do tempo, persistiram ou foram modificadas pela erosão de correntes de fundo. Alguns evoluíram para os atuais mega-*pockmarks* e feições do tipo *furrows* (e.g., KILHAMS et al., 2011).

Para quase todas as depressões, o mapa BPI registrou estruturas positivas circundantes (Fig. 2). Algumas em particular manifestam-se com forma cônica, ou topo plano e flancos erodidos, sobrejacentes a falhas. O aspecto singular assemelha-se a vulcões e montes de lama resultantes da emissão de material argiloso para a superfície do fundo do mar.

A análise de detalhe da subsuperfície revelou diversas zonas opacas e refletores de forte amplitude próximos às depressões e montes descritos no fundo do mar (Fig. 3). Na maioria dos casos, essas feições estão localizadas no topo e nas vizinhanças de falhas.

Nessas zonas, os refletores aparecem côncavos em direções opostas, ou para cima (*pull-up*), ou pra baixo (*pull-down*). Este seria um efeito típico da diferença de velocidade sísmica entre estratos causada por processos associados à presença de fluidos, como a cimentação de carbonatos ou a presença de chaminés de gás (GAY et al., 2007).

No topo e na base da sequência sísmica anterior, *paleo-pockmarks* são identificados por refletores descontínuos e chaminés de gás na periferia de falhas e depressões atuais (Fig. 3). Sem a presença de falhas, isoladamente, as anomalias de alta amplitude nas minibacias de sal associadas a *pockmarks* são raras. Elas aparecem relacionadas a unidades sísmicas caóticas, base de canais e, frequentemente, refletores contínuos e concordantes.

Discussão e Conclusões

O mapeamento sísmico e GIS tornou possível a identificação dos prováveis locais de escape de fluidos no fundo do mar de forma eficaz, precisa e rápida. Os resultados podem servir como indicadores na procura de “janelas” de expulsão de fluidos dos reservatórios.

A distribuição dos *pockmarks* não é aleatória. Eles concentram-se acima de diápiros e com direções compatíveis à deformação do sal na Bacia de Santos. A ocorrência de *pockmarks* acima de uma série de diápiros de sal e de uma vasta província petrolífera nos possibilita explorar as eventuais conexões entre estes elementos. A presença de reservatórios de hidrocarbonetos sub- e supra-sal representam potenciais fontes de gás. Enquanto

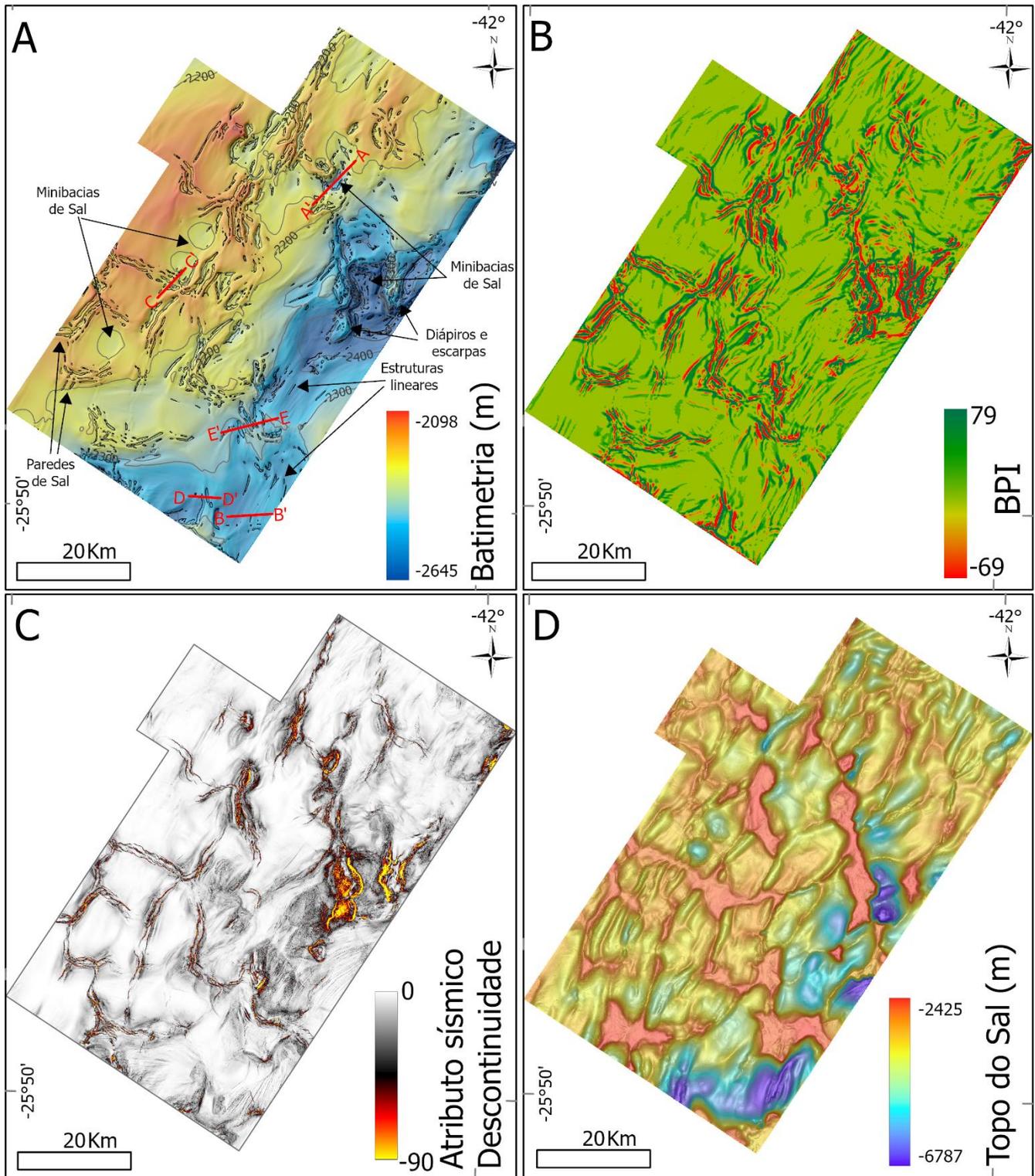


Figura 2 - (A) Geomorfologia interpretada da superfície do fundo do mar, extraída dos dados sísmicos 3D. Polígonos com contorno preto correspondem a baixos topográficos indicados pelos valores negativos do Índice de Posição Batimétrica. Linhas vermelhas apontam a localização dos perfis sísmicos da Figura 3. (B) Mapa com os valores do Índice de Posição Batimétrica, valores negativos (amarelo a vermelho) indicam depressões, e valores positivos (verde escuro) representam altos topográficos. (C) Atributo Sísmico Descontinuidade calculado para o volume entre um horizonte arbitrário próximo ao fundo do mar e a superfície marinha. (D) Horizonte do topo do sal, profundidades mais rasas correspondem a estruturas formadas pela ascensão do sal.

diápiros e falhas associadas promovem excelentes vias de migração até o fundo do mar.

Nos perfis sísmicos, as depressões estão geralmente relacionadas a quatro tipos de vias de escape de fluidos: chaminés, estruturas inclinadas geradas pelo processo de colapso, horizontes estratigráficos e, principalmente, falhas. Geralmente, as três primeiras vias ocorrem associadas à última. Isto sugere claramente que a migração de fluidos na região acontece de forma canalizada predominantemente por falhas. *Pockmarks* que se formaram pontualmente e longe de diápiros também tiveram a influência de falhas, porém se concretizaram por vias secundárias (chaminés, horizontes).

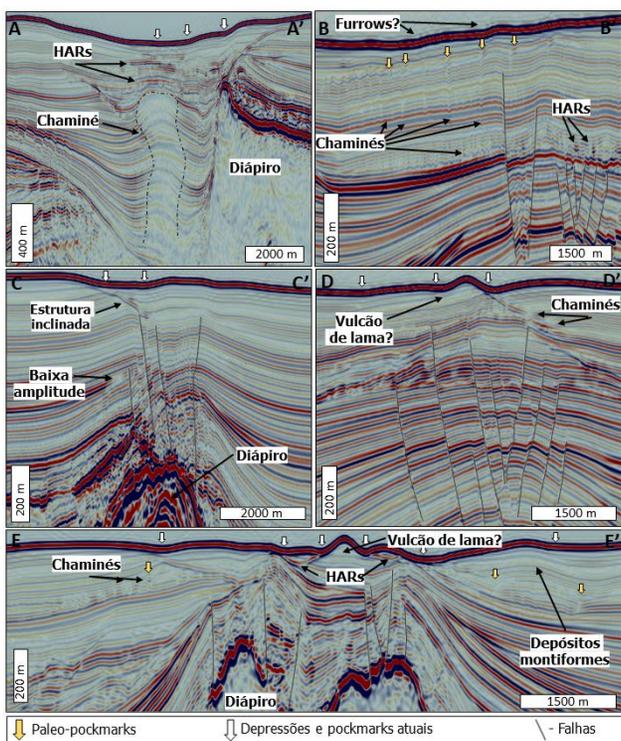


Figura 3 - Cinco seções retiras do dado sísmico 3D que atravessam diápiros. Localização dos perfis estão indicados na Figura 2A. As seções exibem falhas relacionadas ao diapirismo. Assinaturas sísmicas características da presença de fluidos estão apontadas pelas setas pretas. Setas brancas indicam depressões e *pockmarks* modernos. Setas amarelas indicam paleo-*pockmarks*. HARs: High Amplitude Reflectors (Refletores de Alta Amplitude).

Uma provável explicação para nossas observações é a de que o diapirismo na Bacia de Santos acentuou o acúmulo de gás e outros fluidos ao longo da superfície da camada de sal. Devido à extensão progressiva das camadas superiores, induzida pela subida do sal, o desenvolvimento de falhas acima e nos flancos de diápiros acarretou a migração do gás rumo ao fundo do mar.

Os tamanhos dos *pockmarks* na área de estudo são muito grandes, o que é um caso bem raro. Facilmente

encontraram-se *pockmarks* com mais de 1Km de diâmetro dentro de depressões quilométricas. O dado sísmico indicou que correntes de fundo podem ter colaborado para a extensão e manutenção dos *pockmarks*. O escape de fluidos pelos *pockmarks* suspende e torna mais fácil a mobilização de sedimentos por correntes de fundo (CATHLÉS; SU; CHEN, 2010; GAY et al., 2007). Acredita-se que a erosão persistente dos flancos dos *pockmarks* pelas correntes de fundo levou ao aumento das feições, ao mesmo tempo que a direção e intensidade do fluxo dessas correntes foram controladas pela morfologia do fundo do mar.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto PD&I "Compreendendo as Acumulações de CO₂ na Bacia de Santos/Platô de São Paulo no Contexto da abertura do Atlântico Sul" financiado pela Petrogal Brasil S.A., sob a regularização da ANP. Os autores gostariam de agradecer a Petrogal Brasil S.A., a ANP e Halliburton pelo suporte, e a Eugenio Santos Neto pelas considerações.

Referências

CATHLÉS, L. M.; SU, Z.; CHEN, D. The physics of gas chimney and *pockmark* formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, v. 27, n. 1, p. 82–91, 2010.

COOPER, B. A.; RAVEN, M. J.; SAMUEL, L.; HARDJONO; SATOTO, W. Origin and geological controls on subsurface CO₂ distribution with examples from western Indonesia. 1997, [S.l.: s.n.], 1997. p. 16.

FERRAZ, A.; GAMBOA, L.; SANTOS NETO, E. V.; BAPTISTA, R. Crustal structure and CO₂ occurrences in the Brazilian basins. *Interpretation*, v. 7, n. 4, p. SL37–SL45, 2019.

GAMBOA, L.; FERRAZ, A.; BAPTISTA, R.; SANTOS NETO; E. V. Geotectonic controls on CO₂ formation and distribution processes in the Brazilian pre-salt basins. *Geosciences (Switzerland)*, v. 9, n. 6, p. 1–14, 2019.

GAY, A.; LOPEZ, M.; BERNDT, C.; SÉRANNE, M. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin. *Marine Geology*, v. 244, n. 1–4, p. 68–92, 2007.

HOVLAND, M.; GARDNER, J. V.; JUDD, A. G. The significance of *pockmarks* to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, v. 2, n. 2, p. 127–136, 2002.

KILHAMS, B.; MCARTHUR, A.; HUUSE, M. Enigmatic large-scale furrows of Miocene to Pliocene age from the central North Sea: Current-scoured *pockmarks*? *Geo-Marine Letters*, v. 31, n. 5–6, p. 437–449, 2011.

LEÓN, R.; SOMOZA, L.; MEDIALDEA, T.; HERNÁNDEZ-MOLINA, F. J.; VÁZQUEZ, J. T.; DÍAZ-DEL-RIO, V.; GONZÁLEZ, F. J. Pockmarks, collapses and blind valleys in the Gulf of Cádiz. **Geo-Marine Letters**, v. 30, n. 3–4, p. 231–247, 2010.

LUNDBLAD, E. R.; WRIGHT, D. J.; MILLER, J.; LARKIN, E. M.; RINEHART, R.; NAAR, D. F.; DONAHUE, B. T.; ANDERSON, S. M.; BATTISTA, T. A benthic terrain classification scheme for American Samoa. **Marine Geodesy**, v. 29, n. 2, p. 89–111, 2006.

MAHIQUES, M. M.; SCHATTNER, 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. **Heliyon**, v. 3, n. 2, 2017.

PIAUILINO, P. O. V. **A origem dos pockmarks no sudoeste da bacia de Santos**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica) - Universidade Federal Fluminense, 2002.

RAMOS, R. B.; SANTOS, R. F.; SCHATTNER, U.; FIGUEIRA, R. C. L.; BÍCEGO, M. C.; LOBO, F. J.; MAHIQUES, M. M. Deep pockmarks as natural sediment traps: a case study from southern Santos Basin (SW Atlantic upper slope). **Geo-Marine Letters**, v. 40, n. 6, p. 989–999, 29 nov. 2019.

SANTOS NETO, E. V.; CERQUEIRA, J. R.; PRINZHOFER, A. **Origin of CO₂ in Brazilian Basins**. **AAPG Annual Convention and Exhibition**. Long Beach, CA: [s.n.], 2012

SCHATTNER, U.; LOBO, F. J.; GARCÍA, M.; KANARI, M.; RAMOS, R. B.; MAHIQUES, M. M. A detailed look at diapir piercement onto the ocean floor: New evidence from Santos Basin, offshore Brazil. **Marine Geology**, v. 406, n. September, p. 98–108, 2018.