

## Caracterização e restauração estrutural de uma área do Pré-sal da Bacia de Santos e o impacto da paleogeografia no controle da deposição das fácies no reservatório

*Characterization and structural restoration of a Pre-salt area of the Santos Basin and the impact of paleogeography on the control of facies deposition in the reservoir*

Renato Kramberger Carvalho<sup>1</sup> , Claudio Limeira Mello<sup>2</sup> , Olinto Gomes de Souza Junior<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Petrobras S.A., Centro Empresarial Senado, Av. Henrique Valadares, 28, 7º andar, Torre B, CEP: 20231-030, Centro, Rio de Janeiro, RJ, BR. (renatokcarvalho@petrobras.com.br; olinto@petrobras.com.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro, RJ, BR (limeira@geologia.ufrj.br)

Recebido em 28 de setembro de 2022; aceito em 18 de dezembro de 2023.

### RESUMO

O forte controle estrutural exercido sobre a deposição dos carbonatos da Formação Barra Velha (Aptiano), Pré-sal da Bacia de Santos, durante as fases rifte e *sag* condicionou os processos estratigráficos e sedimentológicos que controlaram a distribuição e a qualidade desses reservatórios. O entendimento de como e com que intensidade a evolução estrutural impactou a distribuição das fácies carbonáticas é crucial para se fazer um mapeamento preditivo dos reservatórios. O presente estudo foi desenvolvido na área de Iracema, campo de Tupi, onde foram mapeados cinco horizontes sísmicos e 74 falhas objetivando a caracterização e restauração estrutural e a reconstrução da paleogeografia dos reservatórios à época da deposição da Formação Barra Velha, se restringindo ao intervalo depositado durante a fase *sag* da bacia. Foi construída uma superfície de paleobatimetria para os horizontes restaurados referentes aos limites basais dos intervalos *sag* inferior e *sag* superior, considerando as profundidades de deposição dos carbonatos com base em depósitos análogos recentes, de acordo com estudos anteriores realizados na própria bacia. Para exemplificar a aplicação da análise paleobatimétrica realizada, foi conduzida uma modelagem de processos estratigráficos e sedimentológicos no intervalo superior da fase *sag*, permitindo reproduzir cenários da arquitetura interna da plataforma carbonática. Os resultados demonstram que a restauração realizada apresenta uma melhor e preditiva caracterização faciológica do reservatório, que irá orientar a definição da distribuição de porosidade e permeabilidade em trabalhos de caracterização 3D do reservatório.

**Palavras-chave:** Formação Barra Velha; Carbonatos; Arcabouço estrutural; Paleobatimetria; Modelagem de processos.

### ABSTRACT

The strong structural control exerted on the deposition of carbonates from the Barra Velha Formation (Aptian), pre-salt of the Santos Basin, during the rift and *sag* phases conditioned the stratigraphic and sedimentological processes that controlled the distribution and quality of these reservoirs. The understanding of how and with what intensity the structural evolution impacted the distribution of carbonate facies is crucial to carry out a predictive mapping of the reservoirs. The present study was conducted in the Iracema area, Tupi field, where 5 seismic horizons and 74 faults were mapped with the objective of characterizing and restoring the structural framework and reconstructing the paleogeography of the reservoirs during the deposition of the Barra Velha Formation. The study focuses on the interval deposited during the *sag* phase of the basin. A paleobathymetry surface was constructed for the restored horizons referring to the basal limits of the lower and upper *sag* intervals, considering the carbonate deposition depths based on recent analogous deposits and in accordance with previous studies carried out in the basin. To exemplify the application of this paleobathymetric analysis, a stratigraphic-sedimentological forward modeling was executed in the upper interval of the *sag* phase, allowing to reproduce scenarios of the internal architecture of the carbonate platform. The results demonstrate that the restored surface presents a better and predictive faciological characterization of the reservoir, which will condition the definition of the porosity and permeability distribution in 3D reservoir characterization works.

**Keywords:** Barra Velha Formation; Carbonates; Structural framework; Paleobathymetry; Forward modeling.

## INTRODUÇÃO

A história exploratória da Bacia de Santos, sem grande importância na produção nacional até o início dos anos 2000, começou a ganhar destaque e relevância com as novas descobertas do Pré-sal. Neste contexto se deu a descoberta da área de Tupi (hoje denominado campo de Tupi), em 2006, no alto externo da Bacia de Santos. Os reservatórios nesta área são compostos por depósitos carbonáticos das fases rifte e pós-rifte (está também denominada de fase sag, termo que será utilizado neste trabalho), constituindo a chamada seção Pré-sal, representando um novo *play* de classe mundial, descoberto na margem continental brasileira (Chang et al., 2008; Artagão, 2018). Dada a relevância econômica destas descobertas, muitos trabalhos estão sendo realizados na avaliação regional e na análise estratigráfica e de fácies destes depósitos carbonáticos. Entretanto, a caracterização de detalhe dos reservatórios do Pré-sal ainda é um desafio, principalmente quanto à previsibilidade da qualidade do reservatório, que é controlada pela distribuição de fácies. Uma adequada caracterização estrutural e a reconstrução da paleogeografia dos reservatórios à época da deposição, o que constitui a proposta central do estudo aqui apresentado, é fundamental para melhorar a previsibilidade das fácies dos reservatórios carbonáticos existentes na Bacia de Santos (Dias et al., 1988; Wright e Barnett, 2015).

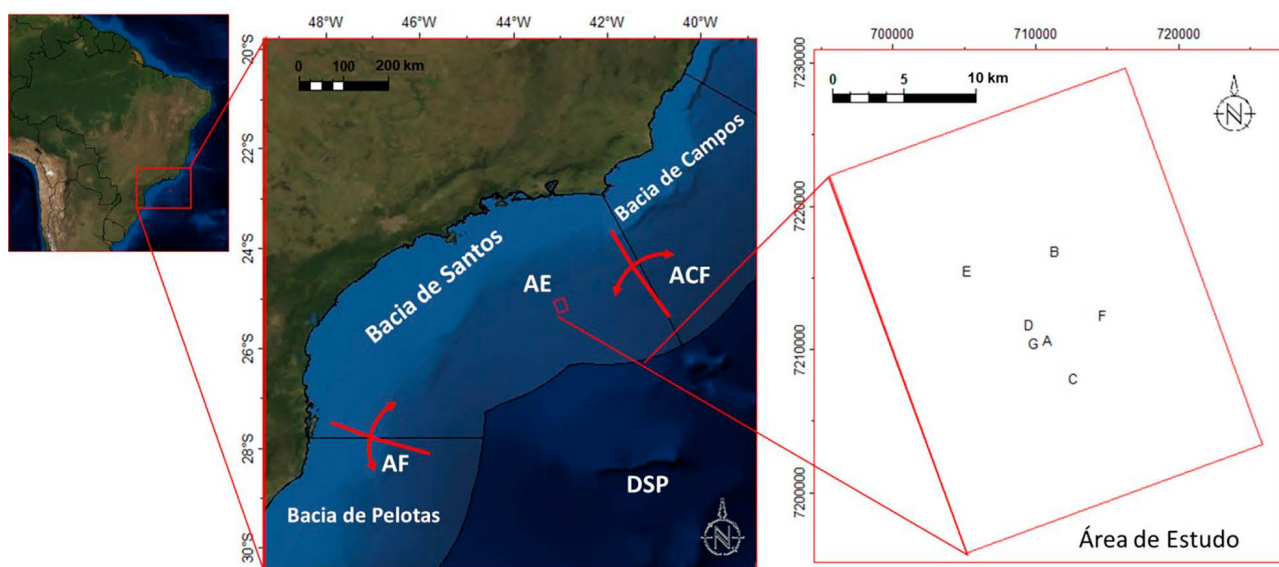
A área de Iracema (Figura 1), localizada dentro dos limites do campo de Tupi, foi selecionada para este estudo por estar em um contexto estrutural distinto no alto externo da Bacia de Santos, apresentando uma orientação estrutural NW-SE em uma região com orientação estrutural predominante NE-SW, possivelmente influenciada pelo

denominado lineamento Iracema (Magnavita et al., 2010). A este lineamento é atribuído um importante papel nas reativações das falhas rifte durante a deposição dos carbonatos da fase sag. A tectônica ativa durante a fase sag implica em um forte controle estrutural na deposição das fácies carbonáticas, que será discutido no decorrer do trabalho.

Uma incerteza crítica nos modelos de subsuperfície é a geometria estrutural e a cinemática dos eventos. A restauração estrutural pode ser a única maneira prática para validar um modelo estrutural e entender a sequência de eventos e suas incertezas. Neste contexto de incertezas e considerando-se reservatórios mais complexos e com menor acesso à coleta de dados, que apresentam alto custo e dependem tempo na implantação dos projetos, as restaurações podem ter um valor agregado enorme para os planos de desenvolvimento da produção (Groshong Jr. et al., 2012).

Buscando-se representar melhor os padrões de deformação associados a falhas, além da modelagem mecânica de falhas e sistemas de falhas, a indústria e a academia têm desenvolvido o conceito de restauração 2D (Dunbar e Cook, 2003; Maerten e Maerten, 2006) e 3D (Maerten, 2007). O desenvolvimento destas ferramentas tem o intuito de melhor prever os condicionantes de sistemas petrolíferos 3D de áreas de interesse, construir superfícies de paleo-relevo para serem usadas no controle de deposição dos sedimentos, prever as condições de variação de esforços e, com isso, prever o modelo de fraturas, além de serem utilizados para validar interpretações estruturais.

No presente estudo foi realizada a caracterização estrutural e a reconstrução da paleogeografia à época da deposição do intervalo sag dos reservatórios carbonáticos da Formação Barra Velha, que se depositaram em uma condição de reativações de falhas que condicionaram a pa-



ACF – Alto de Cabo Frio; AF – Plataforma de Florianópolis; DSP – Dorsal de São Paulo.

**Figura 1.** Localização da área de estudo (AE) e poços selecionados na área (A a G). O retângulo vermelho corresponde à área interpretada no dado sísmico.

leogeografia e por consequência a distribuição das fácies. Através da técnica da restauração 2D de multi-seções, é possível restaurar estas geometrias das superfícies a fim de melhorar a previsibilidade da distribuição das fácies carbonáticas existentes na área de interesse.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia de Santos situa-se na margem continental sudeste do Brasil, entre os paralelos 23° e 28° sul, abrangendo os litorais dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Ocupa uma área de cerca de 350.000 km<sup>2</sup> até a cota batimétrica de 3.000 m, sendo limitada geograficamente da Bacia de Campos, ao norte, pelo Alto de Cabo Frio e da Bacia de Pelotas, ao sul, pela Plataforma de Florianópolis (Figura 1).

O embasamento da bacia é representado pelo Sistema Orogênico da Mantiqueira, correspondendo a terrenos metamórficos e ígneos com estruturação predominantemente NE-SW, formados durante a amalgamação da porção oeste do Gondwana durante o processo orogênico conhecido como evento Brasileiro no Neoproterozoico (Almeida et al., 1981; Heilbron et al., 2004; Almeida et al., 2013).

A bacia foi formada em um regime tectônico distensivo durante a fragmentação do supercontinente Gondwana Ocidental, iniciada no Eocretáceo, que culminou com a separação entre o Brasil e a África e a abertura do Atlântico Sul, sendo classificada como uma típica bacia de margem distensiva (Milani et al., 2007).

Os processos de rifteamento que originaram a Bacia de Santos nuclearam-se ao longo de estruturas preexistentes do embasamento, que governaram a arquitetura das principais feições do sistema rifte, com as principais falhas normais herdando a direção NE-SW. Esta direção é predominante em uma estrutura conhecida como “Alto Externo da Bacia de Santos” (Gomes et al., 2008 e 2012), onde está localizada a área do presente estudo. Esta direção predominante do embasamento é oblíqua a direção de abertura do rifte (E-W) resultando em regime tectônico geral de transensão sinistral durante a abertura da bacia (Macedo, 1990; Meisling et al., 2001; Milani et al., 2005).

Os estudos de Dehler et al. (2016) identificaram um lineamento magnético denominado Helmut, que é o limite entre o Rifte Inferior e o Exterior (Rigoti, 2015), que possui direção NE-SW na Bacia de Santos e que sofre uma inflexão para a direção N-S na Bacia de Campos. Este lineamento traz consigo a mesma direção das zonas de cisalhamento neoproterozoicas e possui uma extensão aproximada de 1000 km. Conforme interpretado a partir de mapas magnéticos e gravimétricos, o lineamento Helmut, conecta estruturalmente às estruturas NNE das Bacias de Campos e Santos, por meio de uma zona de cisalhamento frágil, oblíqua à estrutura do rifte da Bacia de Santos, atuando como uma grande zona de transferência. No Aptiano tardio esta estrutura atuou como uma zona de cisalhamento sinistral transtativa, que perturba a direção das falhas NNE

na direção NE próximo à zona de falha, e reativa falhas do rifte, desorganizando a bacia evaporítica do Atlântico Sul, promovendo a movimentação do sal e gerando domos principalmente de halita.

Estruturas de menor expressão ocorrem nas direções ENE-WSW e E-W (Zalán e Oliveira, 2005), sendo também observadas zonas de transferência com orientação NW-SE, induzidas pela abertura oblíqua da Bacia de Santos (Meisling et al., 2001), afetando tanto o embasamento como unidades mais novas, até o Eoceno, ao ponto de remarcar domínios diferenciados da tectônica salífera, condicionando a estruturação dos domos salinos (Souza, 2008; Rigoti, 2015). Segundo Meisling et al. (2001) estas estruturas NW progressivamente mudam para a direção E-W perto da zona de transição continente-crosta oceânica.

Magnavita et al. (2010), analisando as falhas e mapas de contorno estrutural da Bacia de Santos na seção Pré-sal, ao norte da área de estudo, identificaram uma importante feição, denominada de “S” de Santos, que marca a mudança do arcabouço estrutural. Esta feição está relacionada à mudança da orientação das falhas de direção NE-SW para as direções NW-SE e N-S, influenciada pela presença de zonas de transferência regionais NW-SE. Uma destas zonas de transferência, denominada de Iracema (Magnavita et al., 2010), é de especial interesse para a área investigada no presente estudo devido a sua proximidade, modificando a direção das estruturas presentes na área de Iracema, impondo às falhas uma orientação principal NW-SE.

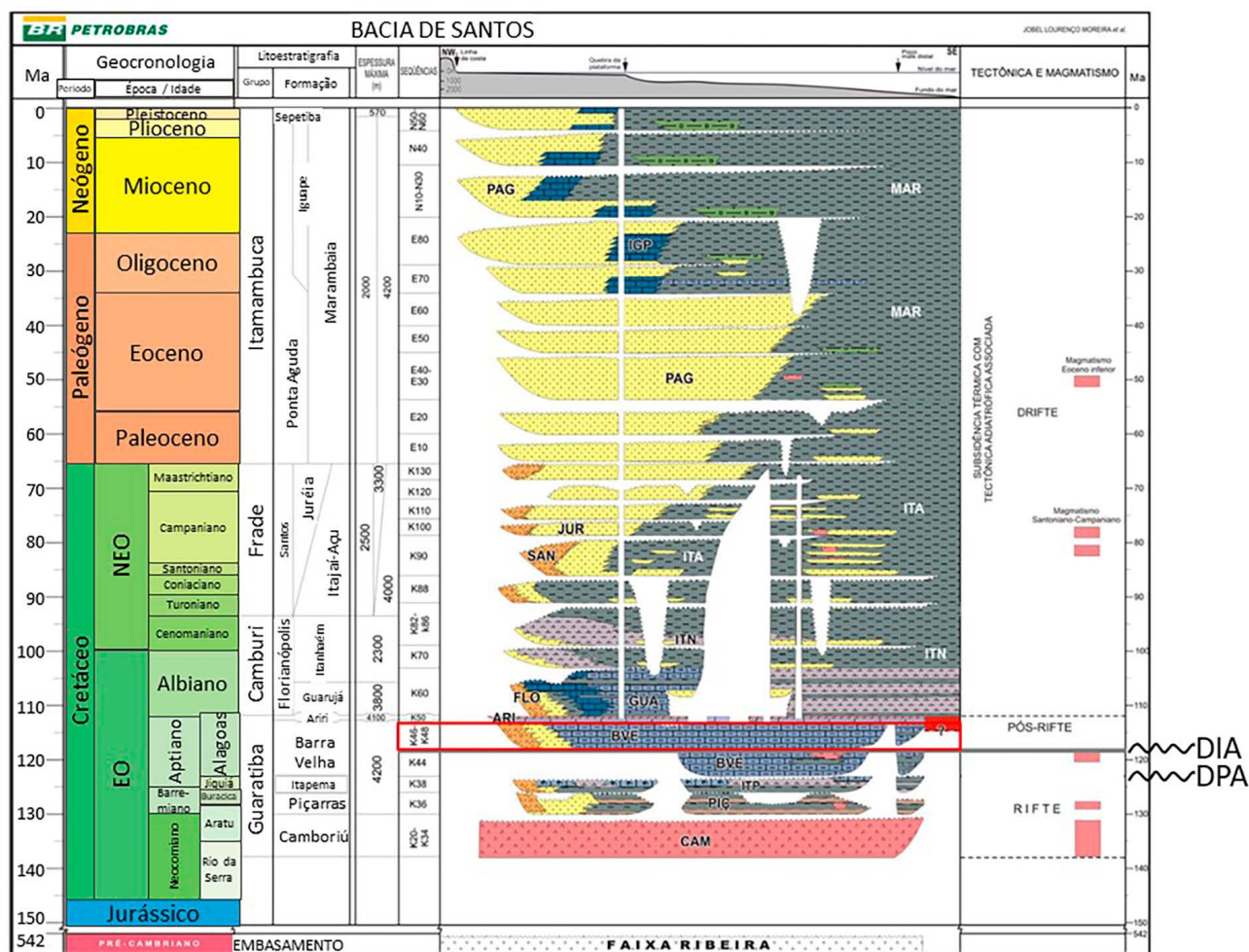
A fase pós-rifte ou fase sag da bacia, iniciada a partir do Eoaptiano, é caracterizada por uma subsidência regional associada ao resfriamento litosférico (Moreira et al., 2007). A atividade tectônica associada às falhas diminui, restringindo-se a reativações das principais falhas da fase rifte (Dias, 2005; Mohriak et al., 2008). Diversos autores, no entanto, identificam durante a fase sag definida por Moreira et al. (2007) uma tectônica ativa na Bacia de Santos, com a movimentação de falhas e criação de espaço durante a deposição dos carbonatos (Karner e Gambôa, 2007; Buckley et al., 2015; Faria et al., 2017). Os trabalhos de Torsvik et al. (2009) e Moulin et al. (2013) propõem que a tectônica sin-rifte estaria afetando inclusive a deposição do sal que estão sobrepostos aos carbonatos. Nos trabalhos de Dehler et al. (2023) e Adriano et al. (2022) é proposta uma última fase rifte concomitante à deposição do intervalo superior dos carbonatos da Formação Barra Velha.

De acordo com Moreira et al. (2007), as rochas que constituem o Pré-sal da Bacia de Santos são relacionadas à evolução da bacia durante as fases rifte e pós-rifte, sendo reunidas no Grupo Guaratiba (Figura 2), composto pelas formações Camboriú (derrames de basaltos toleíticos, ocorridos durante o Neocomiano), Piçarras (depositada durante o período de maior atividade tectônica, no andar Barremiano, e composta de arenitos e pelitos de composição talco-estevesítica e folhelhos escuros depositados nas porções distais da bacia), Itapema (de idade Neobarremiano-Eoaptiano e constituída por *rudstones*, *grainstones*

e *packstones* bioclásticos, nos altos estruturais originados pela atividade tectônica, e intercalações de *mudstones*, lamitos e folhelhos escuros, ricos em matéria orgânica, nos baixos estruturais) e Barra Velha (depositada durante o Aptiano, em ambiente transicional entre continental e marinho raso, e composta por calcários estromatolíticos, laminitos microbiais e microbialitos ricos em talco e argilas magnesianas, nas porções associadas a altos estruturais presentes no alto externo da Bacia de Santos, e folhelhos e folhelhos carbonáticos nas porções distais; intercalados com as fácies *in situ* podem ocorrer também *grainstones* e *packstones* compostos por fragmentos dos estromatólitos e bioclastos).

O limite entre as formações Itapema e Barra Velha é a discordância Pré-Alagoas (DPA), datada em 123,1 Ma e, de acordo com Moreira et al. (2007), corresponde ao limite entre as fases rifte e pós-rifte (ou fase *sag*). No entanto, trabalhos mais recentes (Buckley et al., 2015; Wright e Barnett, 2015; Faria et al., 2017; Farias et al., 2019) propõem que a passagem para a fase pós-rifte seja associada à discordância Intra-Alagoas, de idade 117 Ma, definida

por Moreira et al. (2007), durante a deposição da Formação Barra Velha. Com esta nova interpretação, a Formação Barra Velha foi depositada em dois regimes tectônicos distintos, sendo a porção inferior em um contexto tectônico rifte, com a presença de geometria de cunha, ainda que menos proeminente do que as feições observadas no rifte inferior (formações Piçarras e Itapema). Esta diferença pode estar associada à taxa de movimentação das falhas que criaram o espaço ou à diferença da taxa de sedimentação dos carbonatos sin-rifte (Buckley et al., 2015). A porção superior da Formação Barra Velha foi depositada em contexto tectônico pós-rifte, durante o processo de subsidência regional associada ao resfriamento litosférico (Moreira et al., 2007), adquirindo um padrão de preenchimento do tipo *sag*. Neste período, com uma baixa atividade tectônica associada a falhas, existiram falhas ainda ativas durante a deposição dos carbonatos, relacionadas a reativações das principais falhas da fase rifte (Dias, 2005; Mohriak et al., 2008; Karner e Gambôa, 2007). Como citado acima os trabalhos de Torsvik et al. (2009) e Moulin et al. (2013) consideram que



DIA – Discordância Intra-Alagoas; DPA – Discordância Pré-Alagoas. – modificado de Moreira et al. (2007).

**Figura 2.** Diagrama estratigráfico da Bacia de Santos. O retângulo vermelho representa o intervalo estratigráfico abordado no presente trabalho (intervalo superior da Formação Barra Velha). Foi realizada uma modificação do diagrama original, alterando o topo da sequência rifte para junto da discordância Intra-Alagoas, conforme proposto por Buckley et al. (2015) e Wright e Barnett (2015).



o intervalo superior da Fm. Barra Velha estaria incluso ainda em uma fase sin-rifte. Adriano et al. (2022) propõem uma terceira fase rifte (rifte tardio) para a Bacia de Santos concomitante a deposição da parte superior da Fm. Barra Velha e esta estaria associada a uma direção principal dos lineamentos NW-SE, que predominam na área de Iracema.

Wright e Barnett (2015) contestaram a origem microbiana dos carbonatos da Formação Barra Velha, propondo um modelo abiótico para a sua deposição, em um ambiente lacustre altamente alcalino, sem influência marinha. A influência marinha é descartada devido à ausência de fósseis marinhos, incluindo fósseis típicos de ambiente marinho restrito como foraminíferos miliolídeos. A ausência de minerais de sulfato, como gipsita e anidrita, também corrobora que estes carbonatos não se depositaram em ambiente de água marinha. Nas observações feitas por Wright e Barnett (2015) em amostras macroscópicas e em lâminas delgadas, foram verificadas poucas evidências da ocorrência de atividade e presença microbiana e, com isso, para os autores, parece impróprio usar o nome microbialito.

Apesar dos diferentes modelos paleoambientais discutidos na literatura para os carbonatos do Pré-sal, em todas as melhores fácies reservatórios se depositariam nos altos estruturais, evidenciando o controle da paleogeografia na deposição das fácies carbonáticas. Artagão (2018) apresenta uma proposta de distribuição das fácies em função da energia e batimetria do lago, evidenciando a necessidade de se determinar a paleobatimetria do lago para a correta predição das fácies.

Finalizando a fase pós-rifte da Bacia de Santos, após o ciclo carbonático da Formação Barra Velha, com topo definido em 113 Ma, ocorreu a deposição da Formação Ariri (Figura 2). Trabalhos recentes têm contestado esta idade do início da deposição do sal (Lima et al., 2018; Pietzsch et al., 2020; Tedeschi et al., 2017, 2019). A partir da correlação de isótopos de carbono com as seções do Tethyan foi possível correlacionar o fim da deposição dos evaporitos ao intervalo 1 do Evento Anóxido Oceânico do Aptiano datado entre 125 e 124 Ma (Tedeschi et al., 2019). No entanto o trabalho de Szatmari et al. (2021) contesta estas novas idades através de datações utilizando argônio. Estes propõem no seu trabalho uma idade entre 116 e 110 Ma, mais usual para o intervalo evaporítico.

A Fm. Ariri é constituída por evaporitos depositados em um intervalo de tempo estimado entre 0,7 a 1 Ma, segundo estudo de Dias (1998), durante o Neoptiano (Moraes et al., 2007). Os evaporitos de maior ocorrência na Bacia de Santos são a halita e a anidrita, entretanto também se constata sais mais solúveis, tais como taquidrita, carnalita e silvinita (Rodríguez et al., 2018).

No limite entre o Aptiano e o Albiano (~112Ma), o processo de ruptura efetivamente se propaga em direção à Bacia de Santos. Durante o Albiano (106Ma) ocorre o fim da *breakup* e abertura do Oceano Atlântico Equatorial, permitindo a conexão franca entre o Oceano Atlântico Sul e o Oceano Atlântico Central (Oceano *Thetis*), finalizando

assim o processo de separação do Gondwana Ocidental. Após o *breakup* inicia-se a fase drifte da bacia (Figura 2), que é composta pelos grupos Camburi (composto por carbonatos marinhos e folhelhos radioativos e margas), Frade (sistema de leques aluviais até pelitos e arenitos batiais, depositados do final do Cenomaniano até o limite Cretáceo/Paleógeno, que culminou com uma regressão marinha no final do Cretáceo) e Itamambuca (sedimentos depositados do Paleógeno até o presente, correspondendo a depósitos de leques aluviais proximais que gradam para pelitos e arenitos batiais nas porções distais, com ocorrências de sedimentação carbonática mista próximo à quebra da plataforma). A sequência drifte é bastante deformada por tectônica gravitacional, em função da movimentação do intervalo de sal, do relevo preexistente e do progressivo basculamento do embasamento (Pichel et al., 2020).

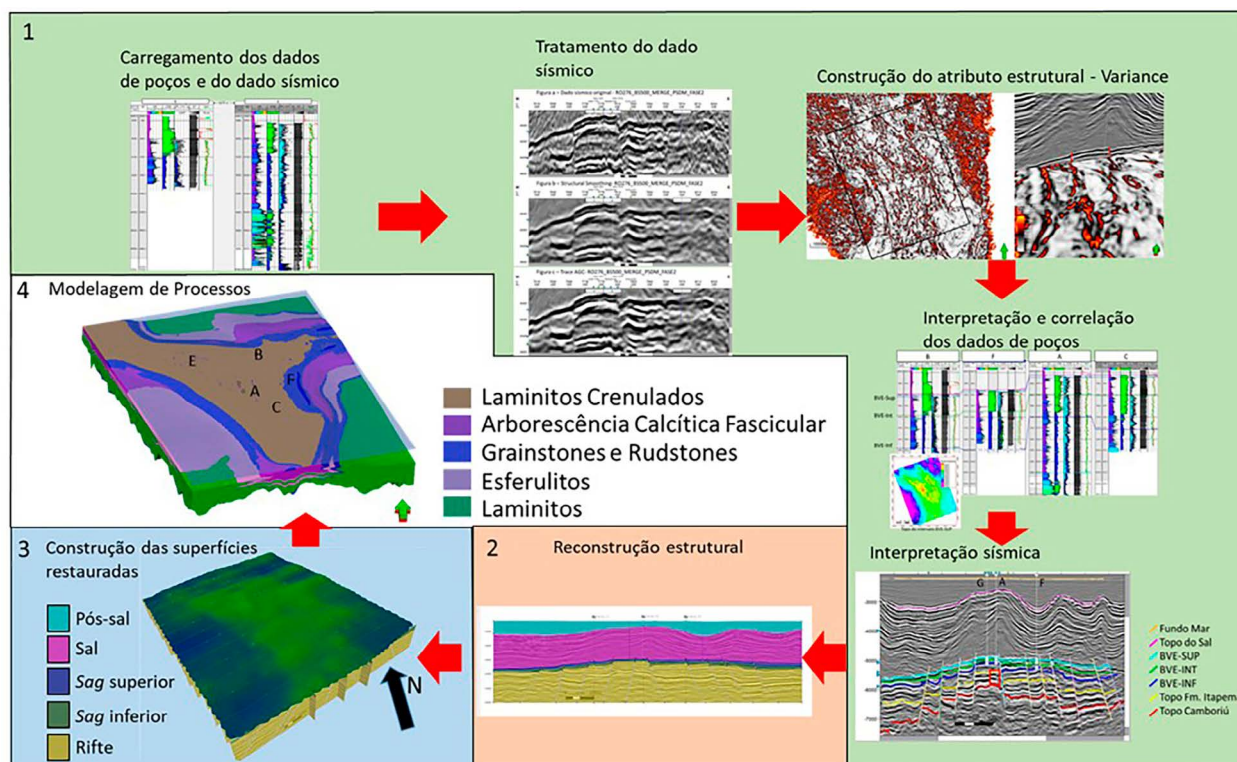
## BASE DE DADOS E MÉTODOS

O estudo foi dividido em quatro etapas (Figura 3), abordando os seguintes tópicos: construção do arcabouço estrutural-estratigráfico, através da correlação de poços e interpretação sísmica; reconstrução estrutural de horizontes estratigráficos da área de interesse, através da restauração de múltiplas seções; construção de mapas de paleobatimetria para o intervalo estratigráfico de interesse; e aplicação de uma das superfícies paleobatimétrica restauradas em uma modelagem de processos estratigráficos e sedimentológicos, realizada no intervalo superior da fase *sag*. Para a etapa de restauração estrutural foi utilizado o *software* Recon, produto de um convênio entre a Petrobras e a PUC-Rio, que utiliza os princípios da restauração mecânica através de modelos numéricos de elementos finitos (Santi, 2002). Todas as demais etapas foram realizadas utilizando o *software* Petrel (*Schlumberger*).

A base de dados contou com as informações de sete poços selecionados na área de Iracema e o dado sísmico 3D RO276\_BS500\_MERGE\_PSDM\_FASE2 migrado em profundidade. Os dados dos poços e o dado sísmico foram fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), através do Banco de Dados de Exploração e Produção – BDEP/ANP, de acordo com a Resolução ANP nº 757, de 23 de novembro de 2018. A área estudada é limitada por um retângulo de arestas de 22 x 28 km, totalizando 616 km<sup>2</sup> (Figura 1).

Devido à baixa qualidade do dado sísmico, antes de iniciar o mapeamento dos horizontes foi feito um tratamento, com o objetivo de ter um dado mais contínuo e menos ruidoso. Além do dado de amplitude do sinal sísmico utilizado, foi construído o atributo *Variance*, que identifica descontinuidades no sinal, permitindo a identificação de falhas mapeáveis na escala sísmica (Van Bemmelen et al., 2000).

A construção do arcabouço tectono-estratigráfico envolveu a interpretação e correlação de perfis dos poços e o mapeamento sísmico de superfícies estratigráficas e falhas na área de interesse. Os perfis utilizados nesta etapa foram



**Figura 3.** Fluxograma com as etapas metodológicas utilizadas para a realização do presente estudo. 1) Construção do arcabouço estrutural-estratigráfico; 2) reconstrução estrutural; 3) construção de mapas de paleobatimetria; 4) modelagem de processos estratigráficos e sedimentológicos.

os de raios gama e ressonância magnética, para definir os intervalos estratigráficos, e os perfis sônico e de densidade, para fazer a amarração com o dado sísmico. Tendo como base os conceitos de estratigrafia de seqüências e a correlação estratigráfica com áreas análogas na Bacia de Santos, foi possível interpretar três marcos estratigráficos que suportaram o mapeamento sísmico no intervalo sag da Formação Barra Velha: o topo da seção rifte; um horizonte intermediário no intervalo *sag*; e a base do sal. Foram assim definidos dois intervalos de interesse: denominados como *sag* inferior e *sag* superior. Tendo em vista a etapa de reconstrução estrutural, também foi necessário mapear o fundo do mar e o topo do sal na área de interesse. Além dos horizontes estratigráficos mencionados, foram mapeadas 74 falhas normais sintéticas e antitéticas.

A reconstrução estrutural consiste na reconstituição da geometria original dos horizontes antes da deformação sofrida ao longo do tempo geológico. Este processo pode ser realizado a partir de algoritmos geométricos que simulam determinadas premissas geológicas, como por exemplo, a preservação da área dos blocos deformados em regime distensivos. A escolha da orientação das seções a serem restauradas é uma importante premissa, devendo ser orientadas paralelamente à direção de transporte tectônico e assumindo-se também que a deformação deve ser plana (Elliott, 1983; Woodcock e Fischer 1986). Na etapa de reconstrução estrutural da área investigada foram selecionadas 14 seções

perpendiculares e três seções paralelas às principais feições estruturais mapeadas. As seções paralelas às falhas tiveram como objetivo somente amarrar as demais seções.

Para realizar a reconstrução estrutural foi gerada uma malha de elementos geométricos triangulares com arestas de 170 m. Após a construção da malha, foram definidos quatro intervalos estratigráficos a serem restaurados (pós-sal, sal, *sag* superior e *sag* inferior), sendo atribuídas a cada intervalo, características de porosidade, decaimento da porosidade e densidade (Tabela 1). A primeira etapa envolveu a descompactação dos intervalos superiores aos intervalos de interesse (*sag* inferior e *sag* superior), que no *software* RECON utiliza uma relação exponencial de decaimento da porosidade com a profundidade, realizando posteriormente a restauração dos blocos de falhas. Para restaurar os blocos de falhas estes são separados em módulo e posteriormente utilizando a ferramenta “Move sobre Falhas”, que através da translação e do cisalhamento puro, retorna o intervalo de interesse à geometria pré-deformação a que foi submetido (Santi, 2002).

Após a etapa de reconstrução estrutural ser finalizada, foram construídos os mapas de paleobatimetria das superfícies restauradas referentes às bases dos intervalos *sag* inferior e *sag* superior. Diversos algoritmos foram testados para a interpolação dos dados das seções restauradas, sendo selecionada, como o de melhor resultado, a simulação gaussiana sequencial, método estocástico de interpolação

baseado em krigagem. Foi gerado um variograma com alcance máximo de 5.000 m e mínimo de 3.000 m, utilizando como direção de anisotropia a orientação geral do alto de Iracema (N30W). Os horizontes restaurados foram convertidos em um mapa de paleobatimetria através de uma equação construída para transformar a superfície restaurada na superfície batimétrica do lago no momento da deposição, respeitando os dados de perfis de porosidade dos poços e utilizando dados bibliográficos sobre a caracterização estratigráfica e faciológica dos reservatórios carbonáticos da seção Pré-sal da Bacia de Santos (Faria et al., 2017; Artagão, 2018) e de análogos recentes (Cohen et al., 1997). Esta metodologia modifica o trabalho de Faria et al. (2017) onde ela propõe a construção da paleobatimetria do lago a partir dos horizontes restaurados, porém em seu trabalho ela normaliza os valores da superfície restaurada para um range de profundidade do lago.

Para demonstrar a aplicabilidade do produto final da construção dos mapas paleobatimétricos, foi realiza-

**Tabela 1.** Valores atribuídos aos parâmetros porosidade, decaimento da porosidade e densidade para os intervalos definidos para a restauração estrutural.

Parâmetros	Intervalos			
	Pós-sal	Sal	Sag superior	Sag inferior
Porosidade	0,48	0	0,42	0,45
Decaimento da porosidade (1/km)	0,46	-	0,44	0,45
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	2,16	2,73	2,72

da uma modelagem de processos, especificamente, neste caso, uma modelagem numérica sedimentológica-estratigráfica, que é uma ferramenta útil para a análise de sistemas carbonáticos, permitindo reproduzir cenários da arquitetura interna da plataforma carbonática em resposta às variações da deposição, erosão, retrabalhamento dos sedimentos e variação do nível de base, sendo estes parâmetros fortemente controlados pela batimetria inicial (Bosence et al., 1994). A modelagem de processos foi realizada para o intervalo *sag* superior, utilizando como dado de entrada duas superfícies paleobatimétricas, para comparação dos resultados: a que foi construída a partir da restauração do horizonte intermediário do intervalo *sag* e uma superfície construída a partir do horizonte originalmente interpretado na sísmica.

Neste tipo de modelagem, três controles estratigráficos principais são considerados: o espaço de acomodação, que varia em função da subsidência e da variação do nível do lago; o suprimento sedimentar, que para as fácies carbonáticas é controlado pela paleobatimetria e taxa de acumulação dos carbonatos; e o transporte, que no caso das fácies

carbonáticas será restrito ao retrabalhamento das fácies formadas *in situ* na própria estrutura.

Para controlar a subsidência foi construído um mapa de isópacas do intervalo *sag* superior. A espessura do intervalo foi dividida pelo tempo estimado para a deposição deste intervalo, sendo considerado um período de 2 Ma, entre 115 e 113 Ma, resultando em um mapa de subsidência.

O condicionamento do nível de variação do lago durante a simulação, foi feito através da construção de uma curva de alta frequência a partir dos dados dos perfis de raios gama e ressonância magnética, sendo também utilizados dados bibliográficos produzidos em áreas análogas (Faria et al., 2017; Artagão, 2018).

Para o controle do suprimento sedimentar foram construídas curvas de produtividade para as fácies carbonáticas *in situ* em função da batimetria, de acordo com dados bibliográficos sobre a caracterização estratigráfica e faciológica dos reservatórios carbonáticos da seção Pré-sal da Bacia de Santos (Faria et al., 2017; Artagão, 2018) e de análogos recentes (Cohen et al., 1997).

A deposição de fácies carbonáticas retrabalhadas foi simulada através de eventos autocíclicos relacionados a ondas, causando erosão das fácies precipitadas *in situ*. As ondas foram consideradas como tendo origem na parte leste e nordeste do Alto de Iracema, de acordo com dados obtidos por Minzoni et al. (2021) em uma região ao norte da área de Iracema.

## RESULTADOS

### Interpretação estratigráfica dos poços

A seção *sag* da Formação Barra Velha foi dividida em dois intervalos (*sag* inferior e *sag* superior) a partir da identificação nos poços B e F de um contato entre uma zona argilosa, abaixo, e o reservatório carbonático (Figura 4). Este contato é denominado no presente estudo como superfície BVE-INT. O intervalo *sag* inferior estende-se desde o topo da seção rifte da Formação Barra Velha (BVE-INF) que corresponde a DIA (Discordância Intra-Alagoas), até a superfície BVE-INT. O intervalo *sag* superior é delimitado na base pela superfície BVE-INT e, no topo, pela superfície aqui denominada BVE-SUP, que é coincidente com o topo do reservatório e base do sal.

A zona argilosa do intervalo inferior é caracterizada no perfil de ressonância magnética por leituras com alta porosidade total e baixa porosidade de fluido livre. O intervalo *sag* inferior também apresenta leituras de raios gama mais elevadas do que o intervalo *sag* superior. No intervalo *sag* superior, nenhum poço na área de estudo amostrou as fácies argilosas identificadas no *sag* inferior.

Aplicando-se os conceitos de estratigrafia de sequências, o intervalo *sag* inferior corresponde a dois ciclos de média frequência de transgressão e regressão do lago completo e uma fase final de transgressão (Figura 4). Os topos dos intervalos de transgressão são caracterizados pe-



los altos valores registrados no perfil de raios gama, que podem ser correlacionados à ocorrência de esferulitos e laminitos lisos. O intervalo *sag* superior corresponde a uma fase de regressão na base, seguida de um ciclo completo de transgressão e regressão do lago (Figura 4). O topo da fase regressiva final culmina com a deposição de laminitos crenulados com feições de exposição, caracterizados em perfil pelo aumento dos raios gama no topo do reservatório. Estes ciclos possuem boa correlação nos poços analisados na área de estudo.

### Interpretação do arcabouço sísmico-estratigráfico e sísmico-estrutural

Em uma análise geral, o intervalo de interesse na área de estudo configura um alto estrutural (Figura 5) alongado na direção predominante NNW-SSE (Figura 6). A estrutura é caracterizada como um *horst* assimétrico, composto por falhas normais desenvolvidas na fase rifte e reativadas durante a fase *sag*.

O horizonte BVE-INF é caracterizado na sísmica por um refletor de forte impedância positiva, (Figura 5). Na área mapeada, este horizonte possui cotas variando entre -6340 m e -4955 m (Figura 6). A forma de um *horst* assimétrico é evidente no mapa de contorno estrutural desta superfície estratigráfica, com um alto bem caracterizado na porção próxima aos poços A, G, D e E. A oeste deste alto há um depocentro, com um desnível topográfico aproximado de 200 m e, na porção leste da estrutura, o

depocentro principal está mais afastado da estrutura do alto do embasamento econômico (Formação Camboriú), estando condicionada por uma família de falhas sintéticas com mergulho para leste. Outros altos locais de menor expressão são observados como, por exemplo, próximo ao poço C.

O horizonte BVE-INT é bem caracterizado na sísmica por um refletor de forte impedância negativa (Figura 5). Este horizonte apresenta uma variação de cotas entre -5933 e -4847 m (Figura 6), sendo observada no mapa de contorno estrutural a existência de um alto secundário importante na região dos poços B e F, além do alto principal entre os poços E e C.

A identificação do horizonte BVE-SUP no mapeamento sísmico foi realizada indiretamente, a partir de um refletor de forte impedância positiva que assinala a passagem de um intervalo de anidrita para um intervalo de halita, na base da Formação Ariri, logo acima dos carbonatos da Formação Barra Velha (Figura 4). Este intervalo de anidrita é caracterizado em todos os poços da área de interesse, com espessura média de 10 m. O horizonte BVE-SUP foi representado na interpretação sísmica após a espessura do intervalo de anidrita ser descontada (Figura 5). Este horizonte apresenta uma variação de cota entre -5684 e -4710 m (Figura 6). O mapa de contorno estrutural deste horizonte mostra um amplo alto estrutural, que está associado a uma maior deposição de carbonatos.

O intervalo inferior da seção *sag* apresenta espessuras variando entre 40 e 486 m, com espessura média de 190 m.

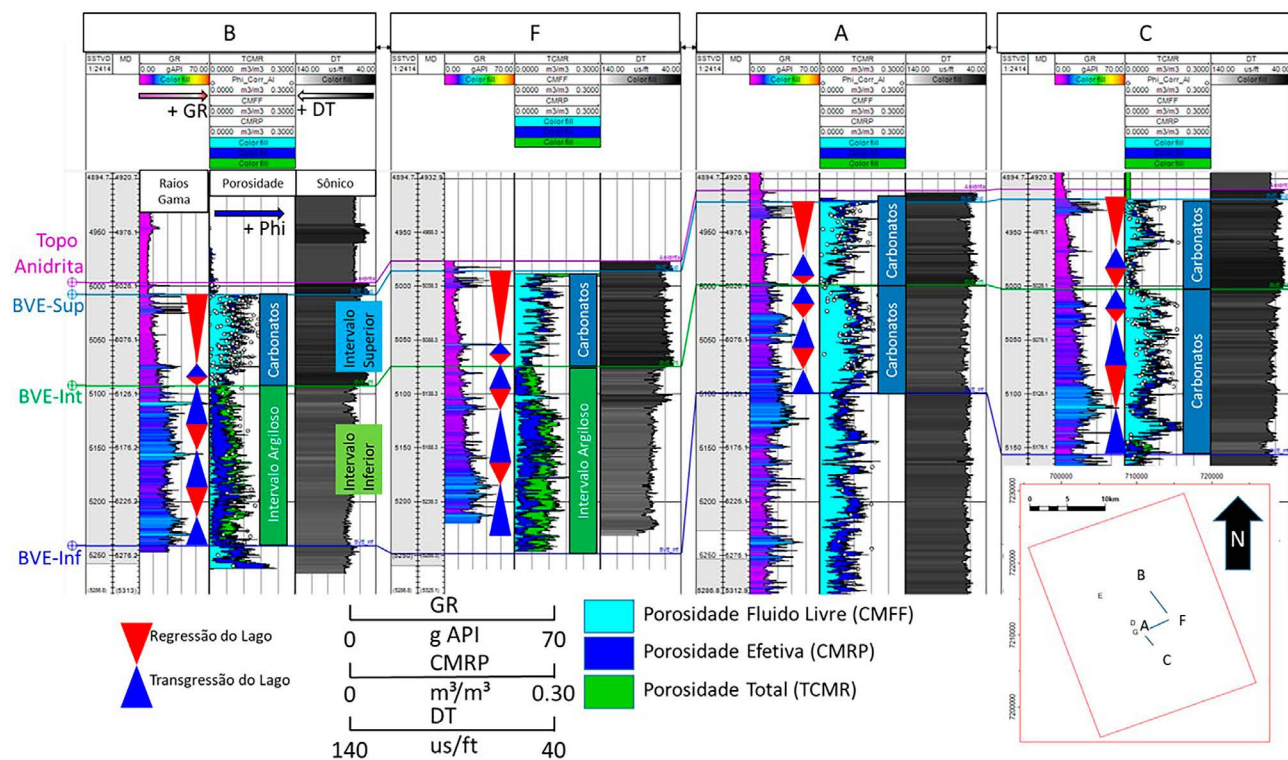
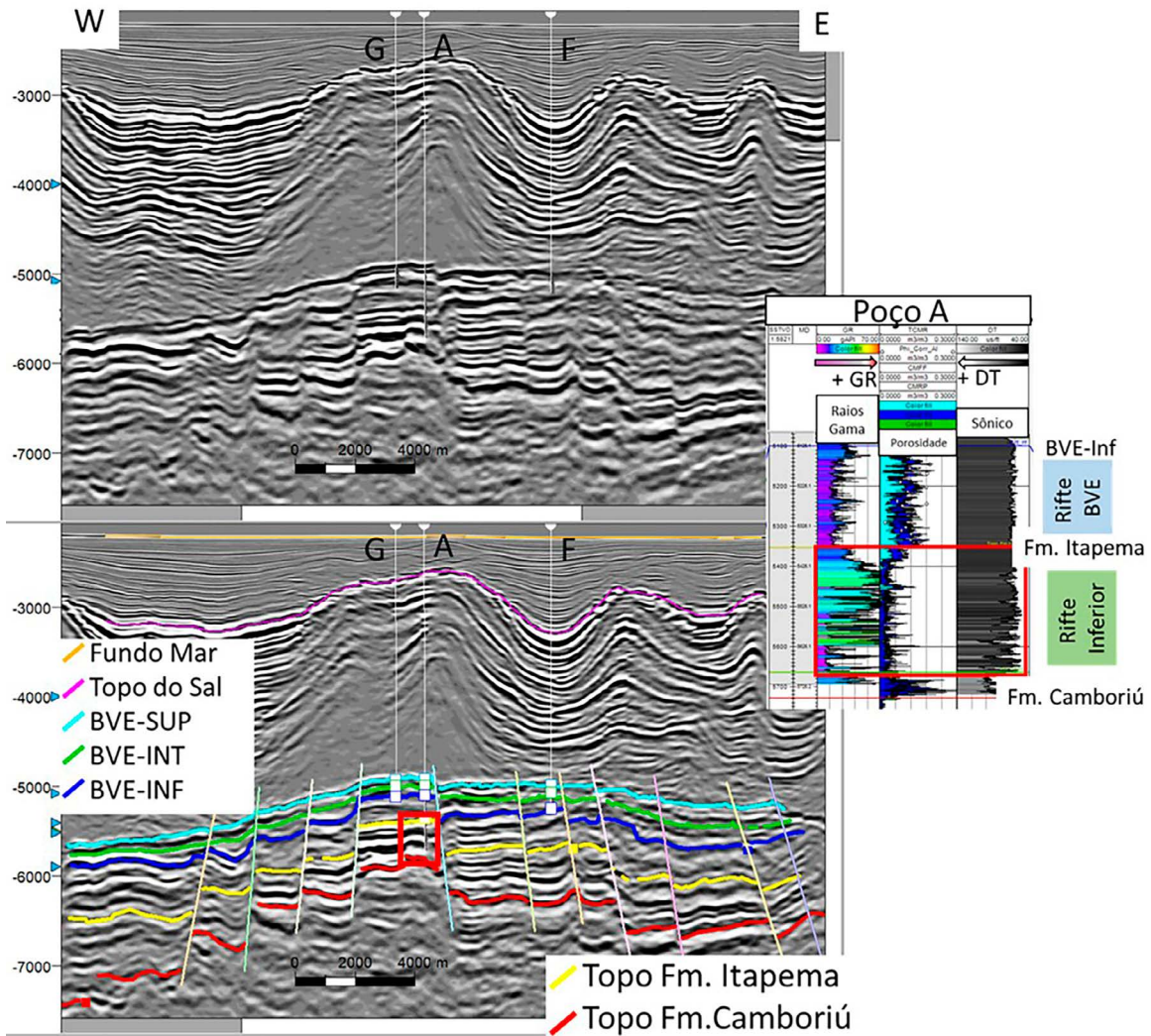
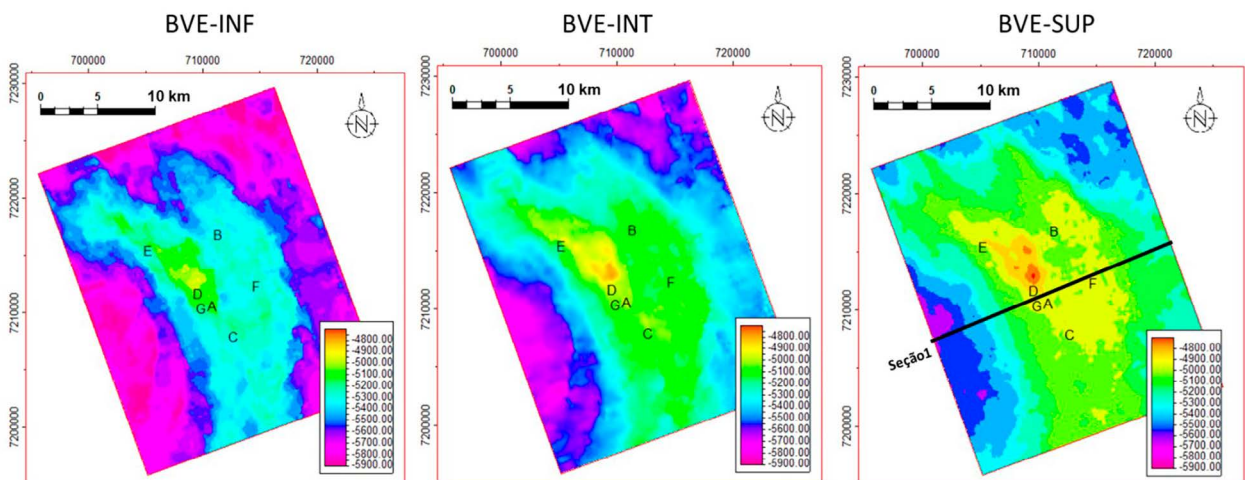


Figura 4. Correlação de poços com a interpretação da Estratigrafia de Alta Resolução (seqüências T-R) no intervalo de interesse.





**Figura 5.** Seção sísmica (Seção 1 ver localização na Figura 6) com a interpretação dos horizontes estratigráficos e falhas. Além dos horizontes utilizados no trabalho, é incluída a interpretação dos horizontes do topo da Formação Itapema e topo da Formação Camboriú. As falhas apresentam mergulho para leste e oeste, delimitando um *Horst* central. O polígono vermelho na seção sísmica interpretada corresponde ao intervalo destacado no perfil do poço A, assinalando as fácies lamosas da Formação Itapema. Legenda dos perfis na Figura 4.



**Figura 6.** Mapas de contorno estrutural das superfícies BVE-INF, BVE-INT e BVE-SUP, com a localização dos poços A – G, utilizados para amarração estratigráfica, e da seção sísmica 1 (apresentada na Figura 5). As escalas de cores indicam a profundidade (em metros).

O intervalo superior possui espessuras entre 35 e 335 m, com espessura média de 146 m.

De acordo com a análise sísmico-estratigráfica e sísmico-estrutural realizada, a configuração do *Horst* já estava implantada pré-horizonte BVE-INT. Com base na interpretação dos dados do poço A, pode ser identificada a presença de depósitos de baixa energia no intervalo rifte inferior (Fm. Itapema), caracterizados em perfil por rochas com alto valor em raios gama e baixa porosidade efetiva registrada no perfil ressonância magnética. Este intervalo também apresenta sismofácies plano-paralelas na seção sísmica (Figura 5), sugerindo, em conjunto com a interpretação dos dados do poço A, ter sido depositado em um baixo estrutural. No intervalo rifte da Fm. Barra Velha (Rifte BVE), delimitado no topo pelo horizonte BVE-INF, constata-se a modificação da condição de porosidade do poço, com o aumento da porosidade e a deposição de carbonatos porosos (Figura 5).

Foram mapeadas 74 falhas na área de estudo. As falhas apresentam rejeito normal e são sintéticas e antitéticas às estruturas que definem o *horst* principal. No geral apresentam uma geometria plana, podendo apresentar alguma tortuosidade (Figura 5). Analisando as espessuras dos blocos baixos, tanto em direção a leste como oeste, em relação ao *horst* onde está localizado o poço A nota-se o aumento de espessura dos intervalos inferior e superior do *sag*, indicando que estas falhas estavam ativas durante a deposição destes intervalos.

Na avaliação estatística das falhas interpretadas na sísmica, o caráter bimodal do azimute do mergulho (*dip direction*) é evidente (Figura 7), com dois picos de azimute, variando entre 060° e 080° e entre 240° e 260°. Estes azimutes de mergulho corroboram a direção principal NNW da estrutura observada nos mapas de contorno estrutural. Com relação aos ângulos de mergulho, pode-se observar que variam

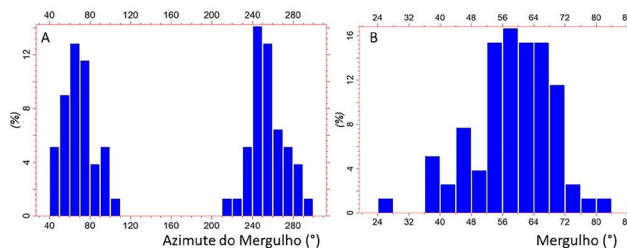


Figura 7. Azimute do mergulho; (A) e ângulo de mergulho; (B) das falhas mapeadas na área de estudo.

desde 24° a 84° (Figura 7), com predomínio entre 52° e 72°, com valores médios em torno de 58° e desvio padrão de 10°.

Analisando-se em detalhe as falhas interpretadas na área de estudo, nota-se uma variação da direção do plano de falha de NNE-SSW a NNW-SSE (Figuras 8 e 9). Na região sul observa-se a direção das falhas NNE-SSW, conforme se desloca para a região central da área de estudo as falhas modificam sua direção para N-S e, por fim, no norte da área de estudo, há um predomínio da direção NNW-SSE. Analisando-se os azimutes de mergulho em mapa, os dois grupos principais de azimutes vistos no histograma se agrupam em posições geográficas diferentes da área de estudo: o grupo com azimute entre 060° e 080° mostra uma concentração maior na borda leste da estrutura; e o grupo com azimute entre 240° e 260° na borda oeste, dando forma ao *horst* da área de estudo (Figuras 8 e 10).

As principais falhas mapeadas no trabalho e o sentido de mergulho das mesmas estão apresentadas na Figura 10, configurando um alto estrutural propício à deposição de carbonatos com boas características permoporosas durante o intervalo de deposição *sag* da bacia. Nota-se um padrão diferente da continuidade das falhas que delimitam o alto de Iracema (por exemplo, as falhas F3 e F4) com uma maior extensão destas, em comparação a falhas presentes na porção interna da estrutura e de direção N-S e NNW-SSE.

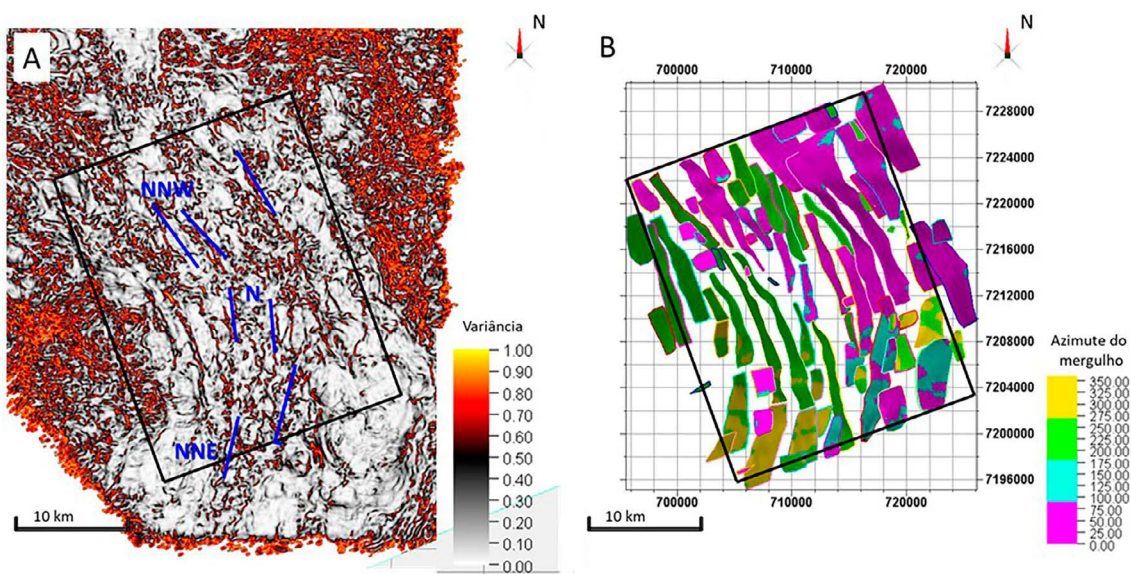


Figura 8. (A) Representação das principais direções de falhas – NNE-SSW, N-S e NNW-SSE; (B) Mapa com o azimute médio do mergulho das falhas mapeadas.



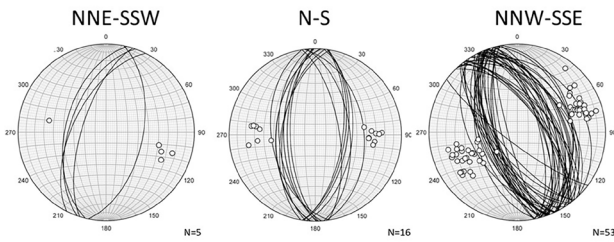


Figura 9. Plot de estereogramas dos principais conjuntos de falhas mapeadas (NNE-SSW, N-S e NNW-SSE).

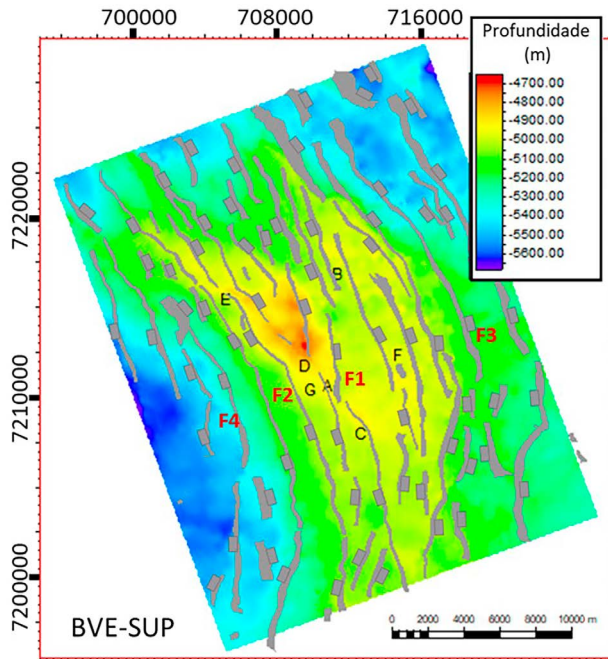


Figura 10. Principais falhas mapeadas sobre o mapa de contorno estrutural do horizonte BVE-SUP. As falhas F1 a F4 apresentadas no mapa serão destacadas na Figura 12.

Nas falhas de direção NNW-SSE, próximos ao poço B, existe um padrão *en echelon*, indicando algum componente direcional. Analisando o mapa de falhas (Figura 10), a evidência de algum movimento oblíquo se dá devido à grande continuidade das falhas que delimitam a estrutura, sendo que as falhas com segmentos mais curtos se encontram na parte interna do *horst*, delimitado por essas falhas contínuas que encurvam de NNE-SSW, para N-S, e finalmente para NNW-SSE. A direção oblíqua das falhas internas com segmentos mais curtos em relação às extensas falhas da borda da estrutura, sugere uma componente oblíqua dextral leve.

A feição do *horst* de Iracema, delimitada pelas falhas F3 e F4 (Figura 10), segundo a classificação de zonas de acomodação, corresponderia a Família 2, com meio-grábens opostos, com superposição (ISAZ); de acordo com Morley et al. (1990), a zona de transferência seria do tipo conjugada, divergente, com superposição.

### RECONSTRUÇÃO ESTRUTURAL

Para realizar a reconstrução estrutural, foram selecionadas 14 seções perpendiculares a direção NNW-SSE, que é a direção predominante das falhas mapeadas na área de estudo, conforme constatado nos histogramas da Figura 9. Essa escolha segue a premissa de que as seções a serem restauradas devem ser paralelas ao transporte tectônico registrado na área de estudo. Além disso, foram selecionadas três seções paralelas às feições estruturais com o objetivo de amarrar as seções restauradas previamente e facilitar a construção dos mapas (Figura 11).

Para obter os resultados da reconstrução estrutural, as seguintes etapas foram realizadas nas 17 seções selecionadas: primeiro, foi feita a descompactação dos intervalos pós-sal e sal, seguida pela construção dos módulos que separam

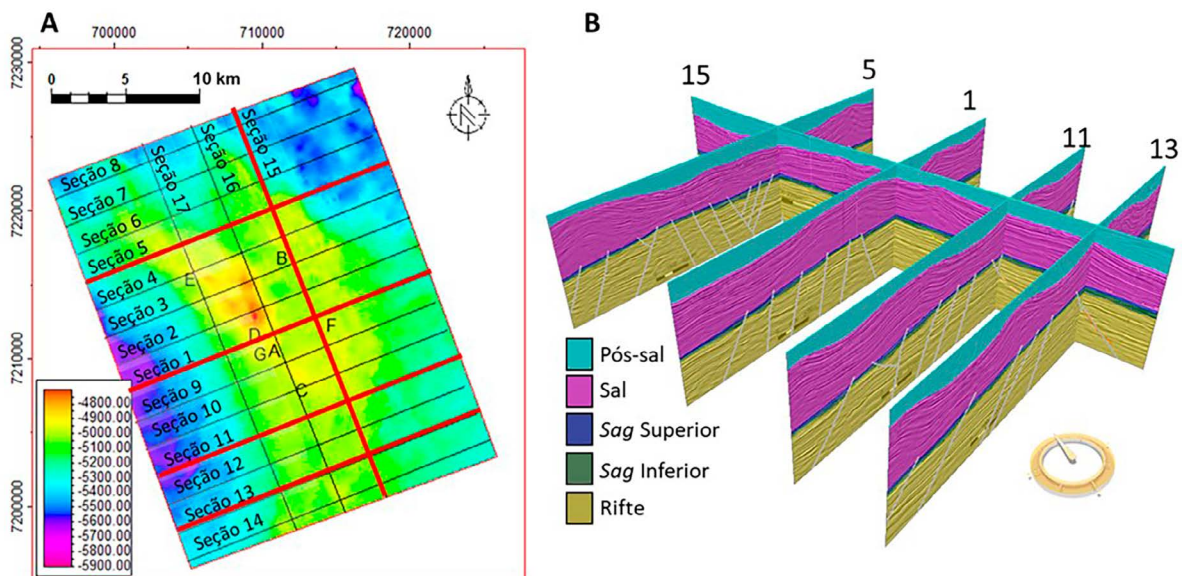


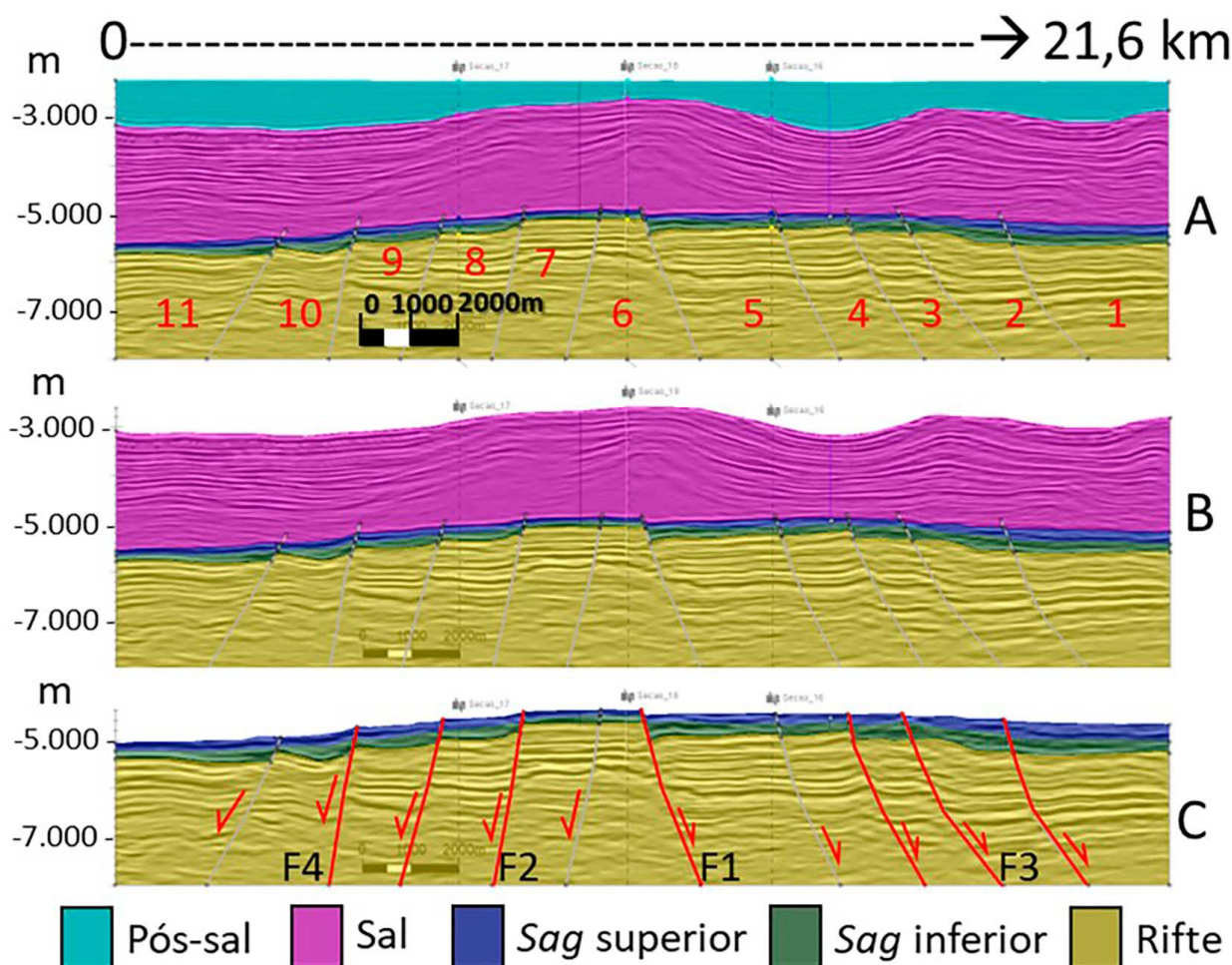
Figura 11. (A) Distribuição das seções restauradas sobre o mapade contorno estrutural do horizonte BVE-SUP. A escala de cores indica a profundidade em metros; (B) Visualização 3D das seções indicadas em A (linhas vermelhas), com a interpretação dos intervalos estratigráficos.

os blocos falhados (Figura 12). Em seguida, os rejeitos das falhas no topo do reservatório (BVE-SUP) foram restaurados de forma a obter uma superfície com a geometria pré-deformação. Por fim, após a restauração dos rejeitos das falhas, foi realizada a descompactação do intervalo *sag* superior. Esse procedimento foi repetido para o horizonte BVE-INT, no qual os rejeitos foram restaurados e, posteriormente, o intervalo *sag* inferior foi descompactado.

Após a descompactação dos intervalos pós-sal e sal das seções analisadas no alto estrutural de Iracema (Figura 11), foi removida a deformação volumétrica da seção Pré-sal, com o aumento da espessura do intervalo *sag* variando entre 35 e 45% devido à retirada do soterramento. Este resultado é exemplificado pela restauração da seção 1 (Figura 12).

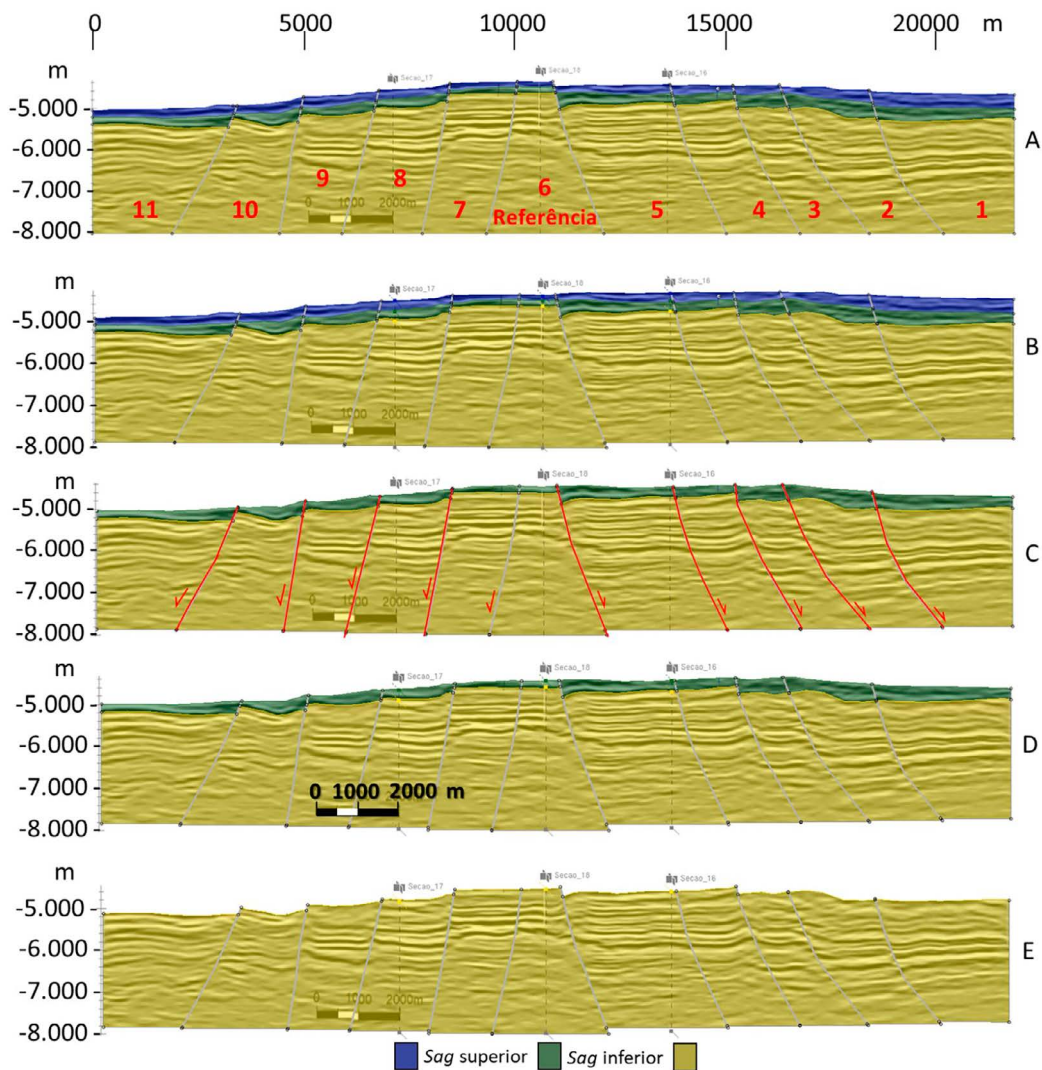
Na Seção 1, que atravessa a parte central da área de Iracema, é evidente a reativação de falhas durante a fase *sag* e talvez até mesmo durante a fase de deposição do sal, com rejeitos no horizonte BVE-SUP, topo do intervalo *sag* superior, chegando a 119 m na falha F1 a leste do módulo 6 (Figura 12). Este módulo 6 foi utilizado como referência

para a restauração estrutural, sendo todos os demais módulos movimentados em relação a ele. Outras falhas também apresentam rejeito no horizonte BVE-SUP, e estão destacadas na Figura 12, com os rejeitos na ordem de dezenas de metros. As falhas F3 e F4, que limitam a região do alto de Iracema, possuem rejeito de 43 e 26 m, respectivamente. As falhas F1 e F2 limitam a parte mais alta da estrutura, com a falha F2 apresentando um rejeito de 31 m. As outras falhas presentes na seção, apesar de não apresentarem rejeito aparente no topo do horizonte BVE-SUP, exibem variações da espessura do intervalo *sag* superior que podem ser explicadas pela movimentação tectônica durante a deposição dos carbonatos. A espessura do intervalo *sag* aumenta do bloco alto (módulos 6 e 7) para os blocos baixos, tanto a leste como a oeste, ficando bem mais evidente nos blocos das extremidades da seção (módulos 1, 2, 10 e 11). Este padrão também é uma indicação da reativação das falhas riftes durante a deposição dos intervalos inferior e superior na fase *sag*. (Figuras 13 e 14). Ao analisar as espessuras desses intervalos, é possível identificar um aumento mais expressivo na espessura do intervalo inferior. Em alguns casos, é observado um espessamento do



**Figura 12.** Descompactação dos intervalos pós-sal e sal. Seção 1 original interpretada no dado sísmico (A), com a descompactação do intervalo pós-sal; (B) e com a descompactação do intervalo sal; (C). As falhas destacadas em vermelho apresentam rejeito no horizonte BVE-SUP (topo da Formação Barra Velha). Os números de 1 a 11 identificam os módulos utilizados na restauração.





**Figura 13.** Descompactação dos intervalos *sag* superior e inferior. (A) Seção 1 após a descompactação do sal, também apresentada na Figura 12C; (B) Restauração do horizonte BVE-SUP, com a remoção dos rejeitos das falhas que afetam esta superfície; (C) Seção 1 com o intervalo *sag* superior descompactado, com o horizonte BVE-INT no momento final da deposição do intervalo *sag* inferior; (D) Restauração do horizonte BVE-INT, com a remoção dos rejeitos das falhas que afetam esta superfície; (E) Descompactação do intervalo *sag* inferior, sendo obtida a superfície BVE-INF no início da deposição dos carbonatos do intervalo *sag*. As falhas destacadas em vermelho apresentam rejeito no horizonte BVE-INT. Os números de 1 a 11 identificam os módulos utilizados na restauração.

intervalo inferior em direção as falhas, como exemplificado no módulo 10 da Figura 14. Essa evidência sugere uma atividade mais intensa das falhas durante o intervalo inferior do intervalo *sag*.

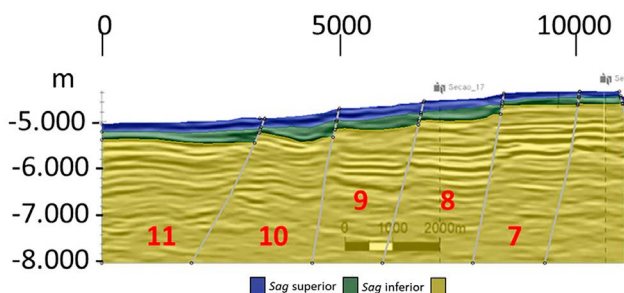
Após a restauração estrutural do horizonte BVE-SUP (Figura 13B) e descompactação do intervalo *sag* superior, foi obtida a superfície BVE-INT no momento final da deposição do intervalo *sag* inferior (Figura 13C). A reativação de falhas observada no topo do intervalo *sag* superior também é verificada no horizonte BVE-INT, assim como o aumento da espessura do intervalo *sag* inferior em direção aos blocos baixos, corroborando a existência também de uma tectônica sin-deposicional.

Após a restauração estrutural do horizonte BVE-INT (Figura 13D) e descompactação do intervalo *sag* inferior foi obtida a superfície que serviu como base para a deposi-

ção dos carbonatos do intervalo *sag* inferior (Figura 13E). Fica evidente que o alto estrutural já estava configurado desde o final da fase rifte e as falhas apresentam um maior rejeito quando comparado à fase *sag*.

Para o controle da qualidade do resultado da restauração, um indicativo de que a seção está balanceada, é a ausência de deformação nos limites da seção, com os limites laterais mantendo a verticalidade, e a ausência de inversão dos rejeitos das falhas nos intervalos mais antigos, após a restauração dos intervalos mais novos.

Os mapas de contorno estrutural dos horizontes BVE-INF e BVE-INT construídos a partir da malha de seções restauradas (Figura 15) corroboram com a interpretação sísmica de um alto estrutural principal entre os poços A e E no final da fase rifte, com altos locais como, por exemplo,

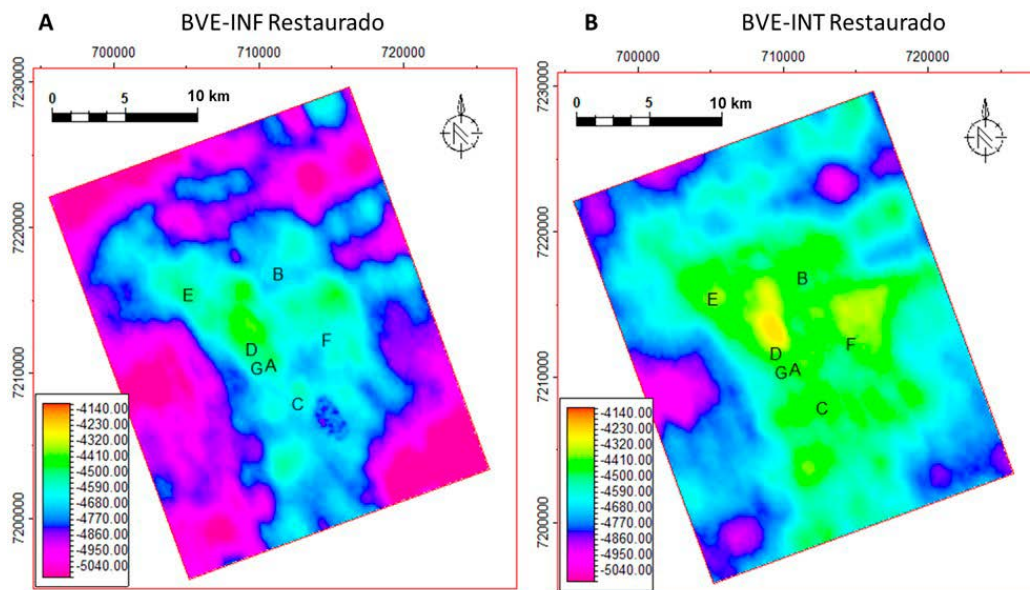


**Figura 14.** Zoom nos módulos 7 a 11 da Seção 1 para demonstrar que a espessura do intervalo sag aumenta do bloco alto (módulo 7) para os blocos do baixo em direção ao oeste, ficando bem mais evidente nos módulos 10 e 11.

a norte do poço F (Figura 15A). O mapa de contorno estrutural do horizonte BVE-INT restaurado mostra a extensão do alto estrutural principal em direção ao poço C, com um alto secundário na região dos poços B e F.

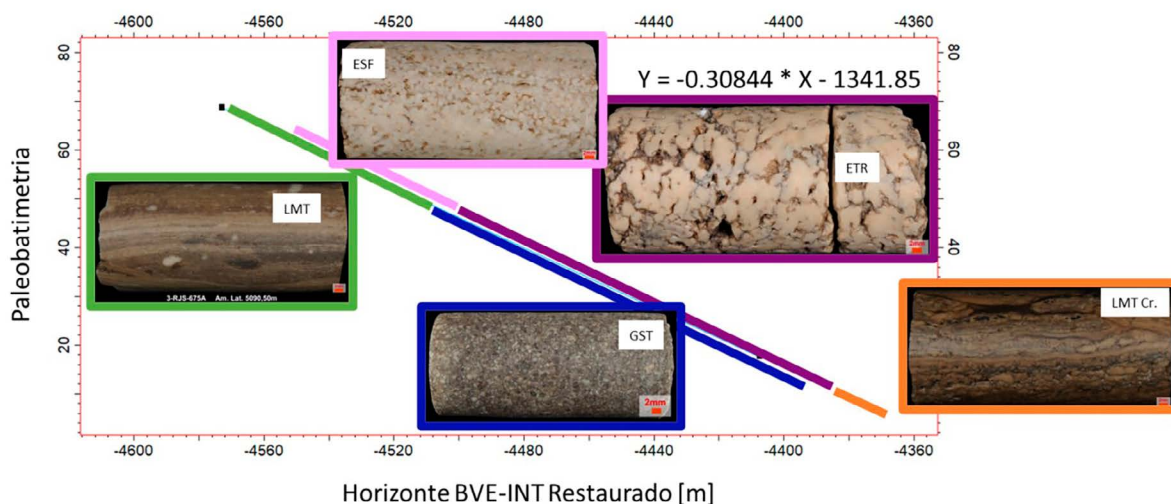
### PALEOBATIMETRIA

As equações utilizadas para a conversão da profundidade dos mapas de contorno estrutural dos horizontes BVE-INF e BVE-INT restaurados em valores batimétricos do lago no início da deposição dos intervalos sag inferior e superior estão enunciadas abaixo (Equações 1 e 2, respectivamen-



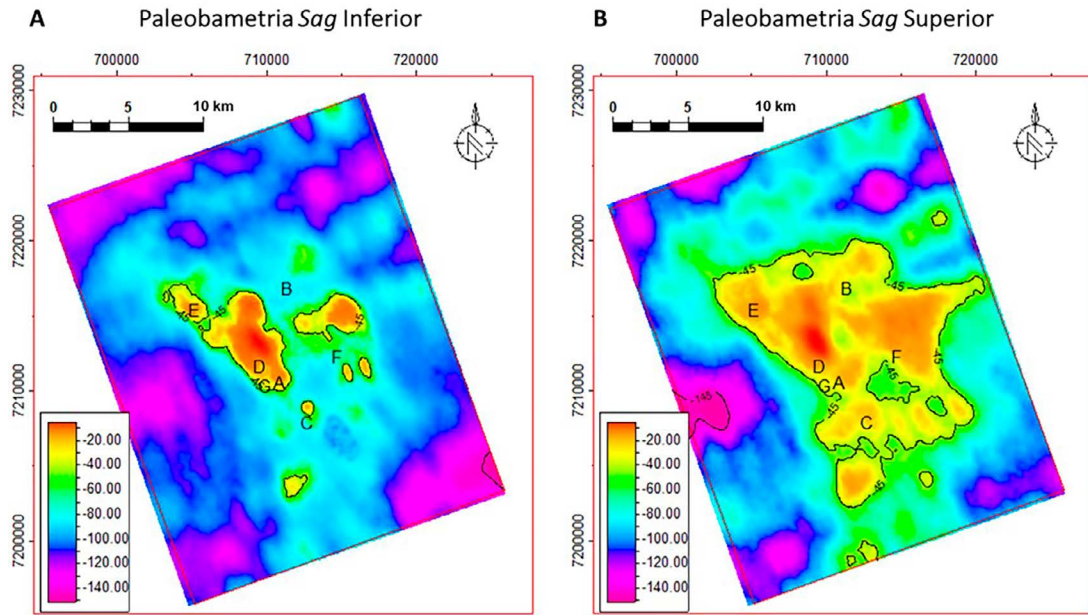
Escala de cores da legenda indicam a profundidade em metros.

**Figura 15.** (A) Mapa de contorno estrutural do horizonte BVE-INF restaurado; (B) Mapa de contorno estrutural do horizonte BVE-INT restaurado.



**Figura 16.** Equação usada para estimar a paleobatimetria do intervalo sag superior. As linhas coloridas correspondem à expectativa de cota de ocorrência das fácies, com base em analogos recentes (Cohen et al., 1997) e do Pré-sal (Faria et al., 2017; Artagão, 2018). Destaca-se a cota paleobatimétrica de 45 m, que marca a transição das fácies de um ambiente de alta energia (GST – Grainstones; ETR – Arborescência Calcítica Fascicular), acima desta cota, para as fácies de menor energia (ESF – Esferulitos; LMT – Laminitos Lisos). A fácies Laminitos Crenulados (LMT-Cr) está associada a profundidades ainda mais rasas com eventual exposição.





Escala de cores indicam a profundidade em metros.

**Figura 17.** (A) Mapa de paleobatimetria do horizonte BVE-INF, representando a profundidade do lago no início da deposição do intervalo sag inferior; (B) Mapa de paleobatimetria do horizonte BVE-INT, representando a profundidade do lago no início da deposição do intervalo sag superior. Destaca-se a cota paleobatimétrica de 45 m, que marca a transição das fácies de alta energia (arborescência calcítica fascicular e *grainstones*) para as fácies de baixa energia (esferulitos e laminitos com argila magnesiana).

te). As inclinações dessas retas foram determinadas através do ajuste dos resultados das paleobatimetrias às expectativas das fácies reconhecidas nos poços. Esse ajuste levou em consideração a presença de fácies carbonáticas ou argilosas nos perfis de ressonância magnética. Dessa forma, nos mapas gerados, os poços onde não foram identificadas fácies com argila magnesiana deveriam estar posicionados acima da cota de 45m.

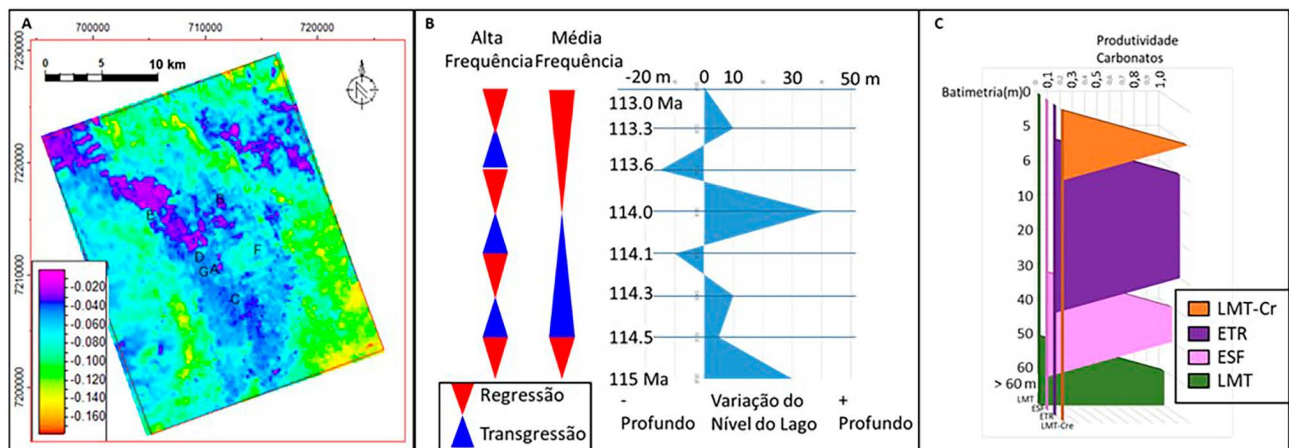
$$y = -0,478941 * x - 2144,28 \quad (1)$$

(para a construção do mapa paleobatimétrico do intervalo sag inferior)

$$y = -0,30844 * x - 1341,85 \quad (2)$$

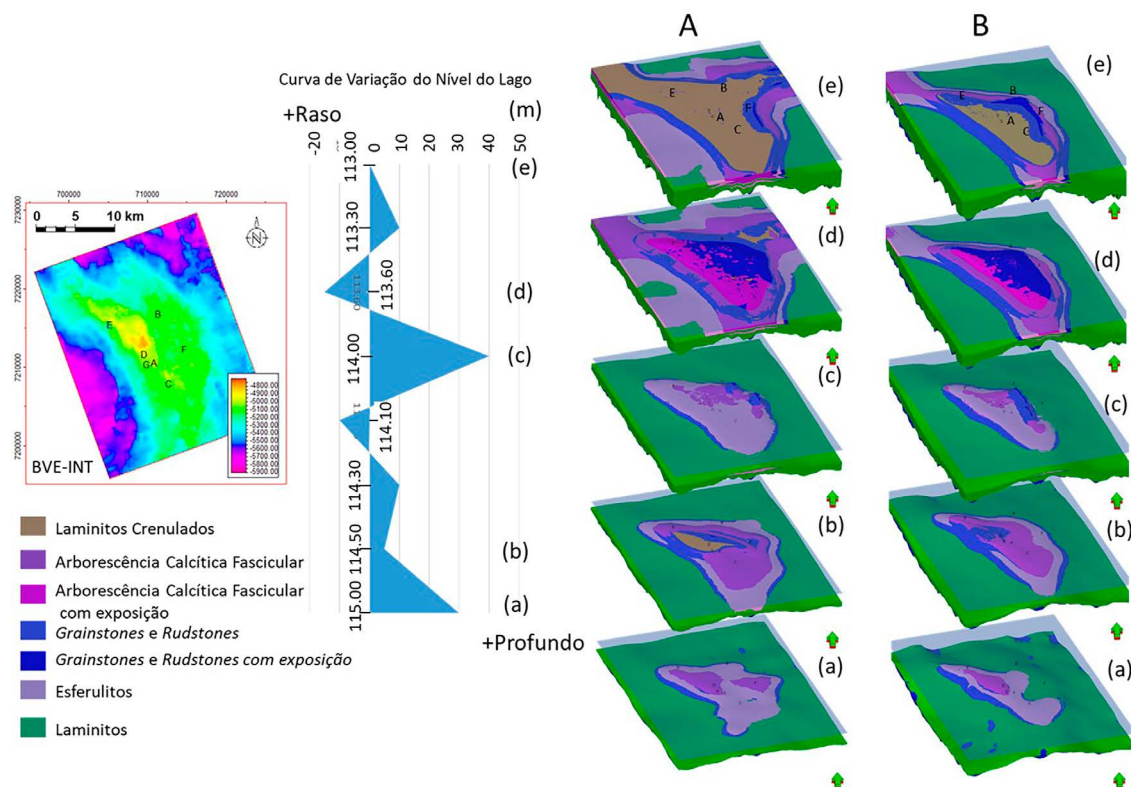
(para a construção do mapa paleobatimétrico do intervalo sag superior, demonstrada na Figura 16)

A distribuição batimétrica considerada para as fácies carbonáticas mostra uma transição entre as fácies de alta energia (*grainstones* e arborescência calcítica fascicular) e as fácies de baixa energia (esferulitos e laminitos com argila magnesiana) aproximadamente na cota batimétrica de 45 m



LMT-Cr – Laminitos crenulados; ETR – Arborescência Calcítica Fascicular; ESF – Esferulitos; LMT – Laminitos Lisos.

**Figura 18.** (A) Mapa de subsidência do intervalo sag superior; (B) Variação do nível do lago utilizada na simulação de processos. A curva de variação do nível do lago é condicionada pela estratigrafia de média e alta frequência definida nos poços a partir da correlação com áreas análogas; (C) Produtividade dos carbonatos *in situ* utilizada nos cenários de modelagem de processos. A batimetria em depósitos carbonáticos tem um forte controle na produtividade dos sedimentos, sendo utilizada para controlar a deposição das fácies na modelagem de processo.



**Figura 19.** Resultados da modelagem de processos estratigráficos-sedimentológicos do intervalo *sag* superior utilizando, como dado de entrada para os modelos, a superfície restaurada do horizonte BVE-INT: (A) e a superfície sísmica BVE-INT; (B). São destacados cinco momentos dos modelos simulados, correlacionados aos ciclos de variação de alta frequência do nível do lago (indicados pelas letras de a – e).

(Figura 16). Os laminitos crenulados estão associadas a profundidades ainda mais rasas e podendo ocorrer exposição.

O mapa de paleobatimetria do intervalo *sag* inferior (Figura 17A) apresenta valores de profundidade variando entre 5 e 150 m. Apenas porções relacionadas ao alto principal, onde estão localizados os poços A e D, e altos estruturais locais, como a região do poço C, estão associadas a cotas acima de 45 m de profundidade. A região onde se localizam os poços B e F está abaixo da cota paleobatimétrica de 45 m, configurando um ambiente de baixa energia, o que está de acordo com a interpretação da presença de argila no intervalo *sag* inferior nos perfis de porosidade dos poços.

O mapa de paleobatimetria do intervalo *sag* superior (Figura 17B) também apresenta profundidade variando entre 5 e 150 m, porém neste mapa observa-se que todos os poços analisados estão localizados acima da cota paleobatimétrica de 45 m. Este ambiente mais raso é o que possibilita o desenvolvimento de fácies carbonáticas com boas condições porosas, o que é confirmado pelos perfis dos poços analisados no presente estudo, não sendo identificada a presença de argila magnesiânica no intervalo *sag* superior.

## MODELAGEM DE PROCESSOS GEOLÓGICOS

A modelagem de processos sedimentológicos-estratigráficos realizada no intervalo *sag* superior (período entre 115 Ma e

113 Ma) exemplifica a aplicação dos mapas paleobatimétricos para a interpretação paleogeográfica. Serão apresentados a seguir os resultados das duas simulações realizadas, utilizando a superfície restaurada do horizonte BVE-INT e a superfície sísmica original, demonstrando a importância da restauração estrutural. Antes de apresentar as simulações realizadas, é necessário detalhar as interpretações de alguns dos parâmetros que controlaram a modelagem de processos.

O mapa de subsidência construído a partir do mapa de isópacas do intervalo *sag* superior (Figura 18A) apontou valores entre 0,01 e 0,17 mm/a, com valor médio de 0,07 mm/a.

Com relação à variação de mais alta frequência do nível do lago adotada na simulação, o intervalo de transgressão de média frequência do *sag* superior foi subdividido em um ciclo completo de afogamento e raseamento na base, terminando com mais uma fase de afogamento no topo (Figura 18B). O intervalo de raseamento de média frequência do topo foi detalhado em uma fase de raseamento na base e um ciclo completo de afogamento e raseamento no topo (Figura 18B).

De acordo com as curvas de produtividade para as fácies carbonáticas *in situ* em função da batimetria (Figura 18C), foram reconhecidas as seguintes faixas ideais para a deposição: laminitos crenulados entre 0 e 5 m; arborescência calcítica fascicular entre 6 e 40 m; esferulitos entre 40 e 50 m; laminitos lisos maior do que 50 m.

Os resultados obtidos na modelagem de processos utilizando a superfície BVE-INT restaurada (Figura



19A), indicam que inicialmente a plataforma carbonática estava mais afogada devido ao final da fase transgressiva do intervalo *sag* inferior, ocorrendo a deposição de fácies de menor energia (esferulitos) em grande parte do alto da estrutura de Iracema (Figura 19Aa), o que é corroborado pela presença de piores porosidades na base do intervalo *sag* superior (Figura 4). No final da primeira fase de raseamento de alta frequência (Figura 18B), verifica-se o aumento da quantidade dos carbonatos arborescentes, que ocupam a área do alto estrutural (Figura 19Ab). No momento de maior afogamento do intervalo *sag* superior (114 Ma), ocorre a expansão da deposição de fácies esferulitos, indicando novamente um período de menor energia (Figura 19Ac). Na fase de raseamento de alta frequência seguinte é registrada a ocorrência de uma maior proporção de fácies de arborescência calcítica depositada no alto da estrutura, inclusive com exposição, e a presença de uma proporção de depósitos carbonáticos retrabalhados na parte leste da estrutura (Figura 19Ad). A fase final de raseamento do intervalo *sag* superior é representada pela maior deposição dos laminitos crenulados (Figura 19Ae), que colmatam a estrutura e estão assinalados nos perfis pelos altos valores de raios gama no topo do reservatório (Figura 4).

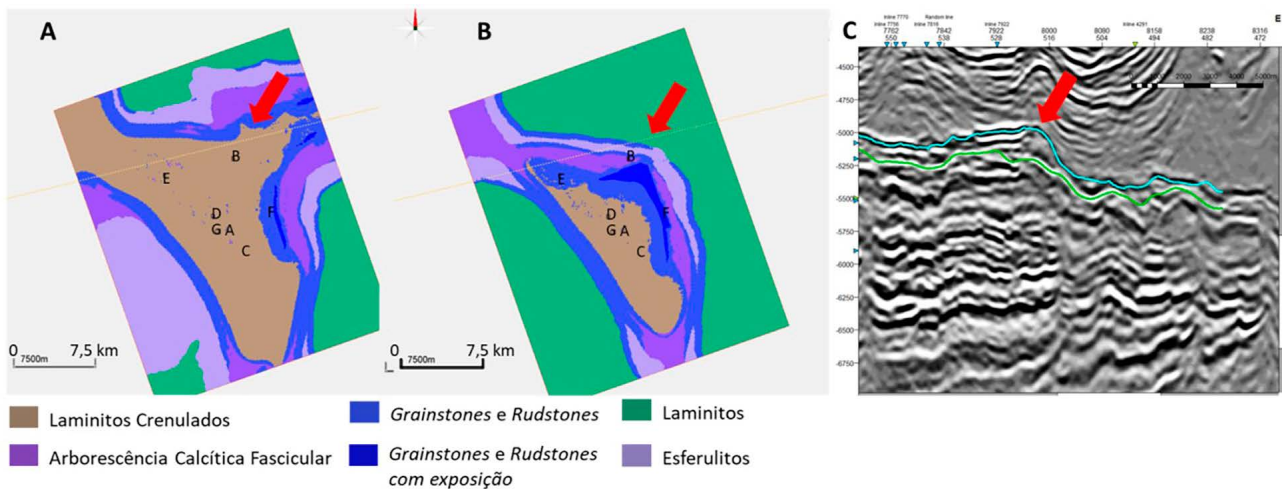
Na simulação de processos utilizando a superfície BVE-INT sísmica original (Figura 19B), a plataforma carbonática apresenta-se mais estreita em comparação com a simulação anterior, com menor ocorrência de fácies carbonáticas depositadas em profundidades mais rasas. Neste cenário está sendo indicada a deposição de fácies com argila magnesiânica nas regiões dos poços B e F durante os períodos de subida do nível do lago (Figuras 19Ba e 19Bc), o que de fato não foi observado nos poços. Durante os períodos de retração do lago, observa-se uma menor expansão a real da plataforma carbonática, que

está sendo limitada pela paleobatimetria mais profunda nos flancos da estrutura de Iracema (Figuras 19Bb, 19Bd e 19Be), ocorrendo a deposição de fácies carbonáticas in situ rasas e retrabalhadas apenas mais próximo ao alto principal de Iracema.

## DISCUSSÃO

A área de Iracema configura um alto estrutural que foi propício à deposição de fácies carbonáticas no Aptiano, entre as idades de 117 e 113 Ma. No entanto, a sua história inicial durante a fase rifte inferior (Formação Itapema), relacionada a depósitos de baixa energia, indica que o *horst* ainda não estava estruturado. O aumento da porosidade a partir do intervalo rifte da Formação Barra Velha, delimitado no topo pelo horizonte BVE-INF, marca a alteração das condições estruturais e, por consequência, deposicionais. Esta mudança é correlacionada neste estudo à atuação da zona de transferência Iracema, promovendo a modificação das condições estruturais.

A estrutura de Iracema, em uma posição relativa mais alta durante a deposição da fase *sag*, possibilitou a deposição de fácies carbonáticas com boas características permoporosas. A seção *sag* inferior é correlacionada a uma fase de expansão do lago, hipótese reforçada pela grande deposição de fácies argilosas nos baixos relativos, que foram amostradas nos poços B e F. Wright e Tosca (2016) consideraram que os argilominerais magnesianos se preservam preferencialmente em ambiente sublitorâneo, com lâmina d'água intermediária e abaixo do nível das ondas. A maior atividade tectônica durante a deposição do intervalo inferior desempenha um papel significativo para o aumento do espaço de acomodação e das batimetrias. Esse aumento contribui para criar condições favoráveis à deposição das argilas magnesianas no bloco baixo da falha F1, na região dos poços B e F. Na seção *sag* supe-



**Figura 20.** (A) Distribuição das fácies com base na modelagem de processos estratigráfica-sedimentológica utilizando o mapa de contorno estrutural do horizonte BVE-INT restaurado; (B) Distribuição das fácies com base na modelagem de processos utilizando o mapa de contorno estrutural do horizonte sísmico BVE-INT; (C) Feição de *mound* observada na sísmica, indicando que na região assinalada pela seta vermelha ainda são observadas fácies de alta energia, como previsto no modelo da superfície restaurada.

rior não foi amostrado nenhum poço com fácies argilosas, indicando uma fase de retração do lago, com depósitos em um ambiente litorâneo, com maior concentração de íons e deposição de rochas carbonáticas, hipótese também sugerida pela ocorrência de laminitos com feição de exposição no topo do reservatório, que foram identificados e descritos por Faria et al. (2017).

Além das mudanças das condições deposicionais, outra evidência da atuação da zona de transferência de Iracema é a orientação da estrutura e das falhas mapeadas. As principais falhas que originaram a Bacia de Santos no Eocretáceo nuclearam-se ao longo de estruturas preexistentes, herdando a direção NE-SW do embasamento. A maior parte da estrutura conhecida como “Alto Externo da Bacia de Santos” (Gomes et al., 2008, 2012), onde está localizada a área do presente estudo, apresenta esta orientação. A presença da zona de transferência de Iracema, de direção NW-SE, oblíqua à orientação NE-SW dominante na bacia, combinação que resulta na estrutura do “S” de Santos (Magnavita et al., 2010), influenciou na mudança da direção para NNW-SSE que predomina na área de Iracema. Esta mudança é gradual e modifica a estrutura à medida que se aproxima da zona de transferência: a sul da área ainda se observam falhas na direção NE-SW, que se modificam para NNW-SSE no norte da área de Iracema.

As falhas normais interpretadas na área de Iracema possuem rejeito nos intervalos inferior e superior da seção *sag*, algumas apresentando rejeito até mesmo na base do sal. A reativação de falhas que se formaram durante a fase rifte da bacia, e atuaram sin-deposicionalmente durante a fase *sag*, sugere que na área de estudo não ocorreu uma quiescência tectônica, como proposto por Moreira et al. (2007). Outros autores já descreveram esta reativação de falhas durante a fase *sag* da bacia, como Karner e Gambôa (2007) e Buckley et al. (2015). Faria et al. (2017) observaram, em seu estudo, a reativação de falhas sin- e pós-deposicionais. Essa reativação estaria relacionada à migração do eixo do rifte em direção às porções mais distais da bacia ao longo da história de deformação da crosta continental. Essa migração pode explicar a ocorrência de regiões sem deformação dútil em posições mais próximas à margem, enquanto em regiões mais distantes, teríamos um regime de rifte ativo que causaria deformações menores em posições intermediárias da bacia.

Rigoti (2015) demonstrou o diacronismo do preenchimento sedimentar e da estruturação do rifte, representado pela migração lateral da deformação que acontece em função da focalização dos esforços deformacionais, com as estruturas mais jovens ocorrendo em direção ao oceano ou ao sítio do futuro *breakup*. A estrutura do Alto Externo, com uma direção predominante NE-SW, é considerada como o limite entre o Rifte Interno e Externo, sendo delimitado pela estrutura denominada de lineamento Helmut por Dehler et al. (2016). Enquanto o Rifte Externo continua em processo de deformação durante o

aptiano superior, uma das hipóteses para os rejeitos de falhas observados na área de Iracema é a reativação das falhas do sistema do Rifte Interno durante essa movimentação do Rifte Externo.

Outra hipótese considerada neste estudo para a área de Iracema é a atuação da zona de transferência de Iracema. Acredita-se que essa zona esteja sendo afetada pelo avanço contínuo do rifte nas partes mais distais da bacia (Rifte Externo e Bloco Resistente demonstrados por Rigoti, 2015), o que resulta no deslocamento das falhas pré-existentes da fase rifte durante a deposição dos sedimentos na seção *sag* na área de Iracema. Essa hipótese considera a movimentação das falhas como resultado da dinâmica complexa entre o Rifte Externo e a zona de transferência de Iracema.

Uma terceira hipótese, apresentada por Adriano et al. (2022), está relacionada a uma terceira fase rifte associada às falhas de direção NW-SE presentes na região de Iracema. Esta terceira fase rifte é correlata a deposição do intervalo superior da Formação Barra Velha que correspondem aos intervalos *sag* Superior e Inferior, abordados neste estudo.

A movimentação das falhas é o principal motivador para que seja realizada a restauração dos horizontes interpretados na sísmica. A restauração estrutural confirmou a interpretação sísmica da existência do *horst* de Iracema durante a fase *sag*. Os horizontes restaurados indicam a ocorrência de posições relativamente mais altas do que as observadas na sísmica em alguns setores do reservatório, sugerindo a possibilidade de ocorrência de depósitos carbonáticos mais porosos.

A restauração estrutural também impacta positivamente na modelagem de processos, modificando a expectativa de ocorrência de fácies reservatório e não reservatório. Como exemplo, a nordeste do poço B, no modelo utilizando a superfície BVE-INT restaurada, existe a expectativa de uma região com boas fácies reservatórios, com intercalações de arborescências calcíticas e retrabalhados (Figura 20). Já na simulação utilizando o dado sísmico, a região a nordeste do poço B estaria em uma posição de baixa energia. Quando é analisado o dado sísmico para se avaliar qual modelo é o mais coerente, são observadas feições como as demonstradas por Minzoni et al. (2021) e classificadas como *mounds*, compostos por retrabalhados e arborescências calcíticas, dando robustez ao modelo construído utilizando a superfície restaurada.

Um importante diferencial do estudo aqui realizado foi propor a construção de mapas de paleobatimetria através de equações que correlacionam a cota dos horizontes restaurados a uma profundidade paleobatimétrica, o que permite ajustar melhor as profundidades da paleobatimetria às fácies identificadas nos poços. Faria et al. (2017) propôs a normalização da superfície restaurada, entre 0 e 60 m, mas desta forma perde-se a possibilidade de algum ajuste local aos dados dos poços.

Conforme discutido por Faria et al. (2017), a modelagem de processos se mostra uma ferramenta poderosa que permite analisar diversos cenários, como diferentes superfícies paleobatimétrica. Pode também fornecer diversas propriedades para subsidiar a modelagem probabilística de reservatórios, como a proporção de fácies utilizada como trend na elaboração dos modelos de fácies, que são condicionantes da distribuição de porosidade e permeabilidade no modelo 3D de reservatório.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizada a construção do arcabouço estratigráfico e estrutural da área de Iracema, campo de Tupi, com o mapeamento de cinco horizontes sísmicos e 74 falhas, onde foi caracterizado um *horst* assimétrico de direção preferencial NNW-SSE, que condiciona os eventos deposicionais do intervalo *sag*.

A área de Iracema está inserida no contexto tectônico do alto externo da Bacia de Santos e, conforme demonstrado através da análise estrutural dos horizontes e falhas mapeadas se diferencia pela mudança de direção estrutural constatada na área, com o predomínio da direção NNW-SSE devido à influência da zona de transferência de Iracema, que em conjunto com a direção NE-SW predominante na Bacia de Santos resulta na estrutura do “S” de Santos.

Através da reconstrução estrutural, foram restaurados os horizontes BVE-INF e BVE-INT à época da deposição dos carbonatos da fase *sag*, validando a interpretação sísmica do *horst* de Iracema, estruturado pelo menos desde o final da fase rifte da Formação Barra Velha. É evidente a reativação de falhas associadas ao aumento de espessura dos intervalos em direção aos blocos baixos, confirmando a tectônica sin-deposicional nos intervalos *sag* inferior e *sag* superior na área de estudo.

Os mapas de paleobatimetria elaborados a partir das superfícies restauradas se mostraram preditivos, demonstrando o valor de se realizar a reconstrução estrutural em áreas estruturalmente complexas. Estes mapas podem ser usados tanto como *input* na modelagem de processos em estudos de reservatório, como também diretamente na forma de um mapa de favorabilidade de fácies em estudos exploratórios expeditos.

O modelo de fácies resultante da modelagem de processos demonstra a variação areal e vertical das fácies, controladas pela paleobatimetria e a variação do nível do lago. O predomínio de fácies de alta energia no alto estrutural e em períodos de nível baixo do lago, com aumento da proporção de arborescência calcítica e *grainstones*, intercalados a níveis de fácies de baixa energia (esferulitos) depositadas durante os períodos de transgressão reproduziu a heterogeneidade vertical observada nos reservatórios do Pré-sal. O resultado obtido pode subsidiar a construção de modelos 3D de reservatórios (fácies, porosidade e permeabilidade), aumentando a previsibilidade dos estudos.

## AGRADECIMENTOS

Somos gratos à Petróleo Brasileiro S.A., Petrobras, pela permissão para publicar este artigo e pelo apoio fornecido a este estudo, permitindo a conciliação entre o trabalho e a atividade acadêmica. À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela liberação dos dados para a realização do estudo. Além disso, gostaríamos de agradecer à universidade pública e de qualidade que possibilitou a realização deste trabalho, por meio do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Também expressamos nossa gratidão ao editor e aos revisores por suas sugestões construtivas que contribuíram para aprimorar o manuscrito.

## BIBLIOGRAFIA

Adriano, M. S., Figueiredo, J. P., Coelho, P. H. G. R., Borghi, L. (2022). Tectonic and stratigraphic evolution of the Santos Basin rift phase: New insights from seismic interpretation on Tupi oil field area. *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103842. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103842>

Almeida, F. F., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)

Almeida, J., Dios, F., Mohriak, W. W., Valeriano, C., Heilbron, M., Eirado, L. G., Tomazzoli, E. (2013). Pre-rift tectonic scenario of the Eo-Cretaceous Gondwana break-up along SE Brazil-SW Africa: insights from tholeiitic mafic dyke swarms. *Geological Society, London, Special Publications*, 369(1), 11-40. <https://doi.org/10.1144/SP369.24>

Artagão, V. M. (2018). *Análise estratigráfica de alta resolução aplicada aos depósitos da Formação Barra Velha, Bacia de Santos Bacia de Santos: identificação, correlação e mecanismos de controle de ciclos sedimentares*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências, UERJ. Disponível em: <http://www.btdt.uerj.br/handle/1/7162>. Acesso em: 20 dez. 2023.

Bosence, D. W., Pomar, L., Waltham, D. A., Lankester, T. H. (1994). Computer modeling a Miocene carbonate platform, Mallorca, Spain. *AAPG Bulletin*, 78(2), 247-266. Disponível em: <http://archives.datapages.com/data/bulletins/1994-96/data/pg/0078/0002/0200/0247.htm>. Acesso em: 20 dez. 2023.

Buckley, J. P., Bosence, D., Elders, C. (2015). Tectonic setting and stratigraphic architecture of an Early Cretaceous lacustrine carbonate platform, Sugar Loaf High, Santos Basin, Brazil. In: Bosence, D. W. J. et al. (eds) *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. *Geological Society, London, Special Publications*, 418, 175-191. <https://doi.org/10.1144/SP418.13>

- Chang, H. K., Assine, M., Correa, F. S., Tinen, J. S. (2008). Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (2), 29-46. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008382S2946>
- Cohen, A. S., Talbot, M. R., Awramik, S. M., Dettman, D. L., Abell, P. (1997). Lake level and paleoenvironmental history of Lake Tanganyika, Africa as inferred from late Holocene and modern stromatolites. *Bulletin Geological Society of America*, 109, 444-460. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0444:LLAPHO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0444:LLAPHO>2.3.CO;2)
- Dehler, N. M., Magnavita, L., Gomes, L., Rigoti, C., Oliveira, J., Sant'anna, M., Costa, F. (2016). The 'Helmut' geophysical anomaly: A regional left-lateral transtensional shear zone system connecting Santos and Campos basins, southeastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 72, 412-422. <https://doi.org/10.4138/atlgeol.2018.014>
- Dehler, N. M., Yamato, A. A., Cruz, F. E. G., Moretti Junior, P. A., Lopes, M. R. F., Zambonato, E. E., Vasconcelos, C. S., Oliveira, J. A. B., Gomes, L. C., Nogueira, M. S., Hamsi Junior, G. P., Freitas, J. T. R. (2023). Tectônica e sedimentação do Pré-sal da Bacia de Santos. In: Chagas, A. A. P.; Araújo, C. C.; Santos, L. A. (orgs.) As grandes descobertas do Pré-sal no Atlântico Sul. *Boletim de Geociências da Petrobras*, no prelo.
- Dias, J., Oliveira, J., Vieira, J. (1988). Sedimentological and stratigraphic analysis of the Lagoa Feia Formation, rift phase of Campos basin, offshore Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 18 (3), 252-260. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1988252260>
- Dias, J. L. (1998). *Análise Sedimentológica e Estratigráfica do Andar Aptiano em Parte da Margem Leste do Brasil e no Platô das Malvinas - Considerações Sobre as Primeiras Incursões e Ingressões Marinhas do Oceano Atlântico Sul Meridional*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Dias, J. L. (2005). Tectônica, estratigrafia e sedimentação no Andar Aptiano da margem leste brasileira. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 13 (1), 7-25.
- Dunbar, J. A., Cook, R. W. (2003). Palinspastic reconstruction of structure maps: an automated finite element approach with heterogeneous strain. *Journal of Structural Geology*, 25, 1021-1036. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00154-2](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00154-2)
- Elliott, D. (1983). The construction of balanced cross sections. *Journal of Structural Geology*, 5, 101. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90035-4)
- Faria, D. L. P., Reis, A. T., Souza Junior, O. G. (2017). Three-dimensional stratigraphic-sedimentological forward modelling of an Aptian carbonate reservoir deposited during the sag stage in the Santos basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 88, 676-695. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.013>
- Farias, F. A., Szatmari, P., Bahniuk, A., França, A. B. (2019). Evaporitic carbonates in the pre salt of Santos Basin – genesis and tectonic implications. *Marine and Petroleum Geology*, 105, 251-272. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.04.020>
- Gomes, P. O., Kilsdonk, B., Minken, J., Grow, T. (2008). The Outer High of the Santos Basin, Southern Sao Paulo Plateau, Brazil: Pre-Salt Exploration Outbreak, Paleogeographic Setting, and Evolution of the Syn-Rift Structures. In: *AAPG International Conference and Exhibition*, Search and Discovery Article #10193. Cape Town, South Africa. Disponível em: <https://www.searchanddiscovery.com/documents/2009/10193gomes/images/gomes.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- Gomes, P. O., Kilsdonk, B., Grow, T., Minken, J. (2012). Tectonic evolution of the Outer High of Santos Basin, southern Sao Paulo Plateau, Brazil, and implications for hydrocarbon exploration. In: D. Gao, ed. *Tectonics and sedimentation: Implications for petroleum systems*. McLean, Virginia, USA: *AAPG Memoir 100*, p.125-142. <https://doi.org/10.1306/13351550M1003530>
- Groshong Jr, R. H., Bond, C., Gibbs, A., Ratliff, R., Wiltschko, D. V. (2012). Preface: Structural balancing at the start of the 21st century: 100 years since Chamberlin, *Journal of Structural Geology*, 41, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.03.010>
- Heilbron, M. L., Pedrosa-Soares, A. C., Neto, M. C. C., Silva, L. C. (2004). Província Mantiqueira. In: V.M. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro e B.B. Brito Neves (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano*, p.203-234. São Paulo: Editora Beca.
- Karner, G. D., Gambôa, L. A. P. (2007). Timing and origin of the South Atlantic pre-salt sag basins and their capping evaporates. *Geological Society, London, Special Publications*, 285, 15-35. <https://doi.org/10.1144/SP285>
- Lima, F., Sanjinés, A., Maizatto, J., Ferreira, E., Ng, C., Costa, D., Zerfass, G., Alves, C., Strohschoen Jr, O., Vivers, M. (2018). Aptian marine post-salt rocks in Santos, Campos and Espírito Santo basins, Brazil: A biochronological stratigraphical approach. *XLIX Congresso Brasileiro de Geologia*. Rio de Janeiro: SBG.
- Macedo, J. M. (1990). Evolução tectônica da bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. In: Raja Gabaglia, G.P., Milani, E.J. (Eds.), *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Petrobras, pp. 361-376.
- Maerten, L., Maerten, F. (2006). Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration: technique and industry applications. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, 1201-1226. <https://doi.org/10.1306/02240605116>



- Maerten, L. (2007). Geomechanics to solve structure related issues in petroleum reservoirs. *AAPG European Region Newsletter*, 2, 2-3. Disponível em: <https://www.searchanddiscovery.com/documents/2007/07105maerten/images/maerten.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- Magnavita, L. P., Dehler, N. M., Gomes, L. C., Sant'anna, M. V., Souza, A. E. C. M., Menezes, J. R. C. (2010). *Arcabouço Tectônico e Cinemática do Pré-sal do Sudeste Brasileiro*. Petrobras, Relatório Reservado, 55 p.
- Meisling, K. E., Cobbold, P. R., Mount, V. S. (2001). Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil. *American Association Petroleum Geology Bulletin*, 11, 1903e1924. <https://doi.org/10.1306/8626D0A9-173B-11D7-8645000102C1865D>
- Milani, E. J., Oliveira, J. A. B., Dias, J. L., Szatmari, P., Cupertino, J. A. (2005). Basement control on structural styles and sediment pathways of Southeast Brazil Atlantic margin basins (Brazil deep sediments Deep-water sedimentation in the Southeast Brazilian margin project). In: *Proceedings of AAPG International Conference and Exhibition*. Paris, France.
- Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G. V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M., Neto, O. C. P. (2007). Bacias sedimentares brasileiras: Cartas estratigráficas - Introdução. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 183-198.
- Minzoni, M., Cantelli, A., Thornton, J., Wignall, B. (2021). Seismic-scale geometries and sequence-stratigraphic architecture of Early Cretaceous syn-post rift carbonate systems, Presalt Section, Brasil. *Geological Society, London, Special Publications*, 509 (1), 105-126. <https://doi.org/10.1144/SP509-2019-78>
- Mohriak, W. U., Nemcok, M., Enciso, G. (2008). South Atlantic divergent margin evolution: rift-border uplift and salt tectonics in the basins of SE Brazil. *Geological Society, London, Special Publications*, 294, 365-398. <https://doi.org/10.1144/SP294.19>
- Moreira, J. L. P., Madeira, C. V., Gil, J. A., Machado, M. A. P. (2007). Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 15 (2), 531-549.
- Morley, C. K., Nelson, A., Patton, T., Munn, G. (1990). Transfer zones in the East African Rift System and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *AAPG Bulletin*, 74, 1234-1253. <https://doi.org/10.1306/0C9B-2475-1710-11D7-8645000102C1865D>
- Moulin, M., Aslanian, D., Rabeneau, M., Patriat, M., Matias, L. (2013). Kinematic keys of the Santos–Namibe basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 369(1), 91-107. <https://doi.org/10.1144/SP369.3>
- Pichel, L. M., Jackson, C. A. -L., Peel, F., Dooley, T. P. (2020). Base-salt relief controls salt-tectonic structural style, São Paulo Plateau, Santos Basin, Brazil. *Basin Research*, 32(3), 453-484. <https://doi.org/10.1111/bre.12375>
- Pietzsch, R., Tedeschi, L. R., Oliveira, D. M., Anjos, C. W. D., Vazquez, J. C., Figueiredo, M. F. (2020). Environmental conditions of deposition of the lower cretaceous lacustrine carbonates of the Barra Velha formation, Santos Basin (Brazil), based on stable carbon and oxygen isotopes: A continental record of pCO<sub>2</sub> during the onset of the oceanic anoxic event 1a (OAE 1a) interval? *Chemical Geology*, 535, 119457. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119457>
- Rigoti, C. A. (2015). *Evolução tectônica para a Bacia de Santos com ênfase na geometria crustal: Interpretação integrada de dados de sísmica de reflexão e refração, gravimetria e magnetometria*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.btdt.uerj.br/handle/1/7131>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- Rodriguez, C. R., Jackson, C. A.-L., Rotevatn, A., Bell, R. E., Francis, M. (2018). Dual tectonic-climatic controls on salt giant deposition in the Santos Basin, offshore Brazil. *Geosphere*, 14(1), 215-242. <https://doi.org/10.1130/GES01434.1>
- Santi, M. R. (2002). *Procedimentos Computacionais para o Balanceamento de Seções Geológicas*. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://web.tecgraf.puc-rio.br/~lfm/teses/MarcioSanti-Doutorado-2002.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- Souza, I. A. (2008). *Falhas de transferência da porção norte da Bacia de Santos interpretadas a partir de dados sísmicos: Sua Influência na Evolução e Deformação da Bacia*. Tese (Doutorado). Rio Claro: IGCE-UNESP. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/102986>. Acesso em: 20 dez. 2023.
- Szatmari, P., Lima, C. M., Fontaneta, G., Melo Lima, N., Zambonato, E., Menezes, M. R., Bahniuk, J., Coelho, S. L., Figueiredo, M., Florencio, C. P. (2021). Petrography, geochemistry and origin of South Atlantic evaporites: The Brazilian side. *Marine and Petroleum Geology*, 127, 104805. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104805>
- Tedeschi, L. R., Jenkyns, H. C., Robinson, S. A., Sanjinés, A. E. S., Viviers, M. C., Quintaes, C. M. S. P., Vazquez, J. C. (2017). New age constraints on Aptian evaporites and carbonates from the South Atlantic: Implications for Oceanic Anoxic Event 1a. *Geology*, 45(6), 543-546. <https://doi.org/10.1130/G38886.1>
- Tedeschi, L. R., Jenkyns, H. C., Robinson, S. A., Lana, C. C., Menezes Santos, M. R. F., Tognoli, F. M. W. (2019). Aptian carbon-isotope record from the Sergipe-Alagoas Basin: New insights into oceanic anoxic event 1a and the timing of seawater entry into the South Atlantic. *Newsletters on Stratigraphy*, 53(3), 333-364. <https://doi.org/10.1127/nos/2019/0529>

- Torsvik, T. H., Rouse, S., Labails, C., Smethurst, M. A. (2009). A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin. *Geophysical Journal International*, 177(3), 1315-1333. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04137.x>
- Van Bommel, P. P., Pepper, R. E. F. (2000). “*Seismic signal processing method and apparatus for generating a cube of variance values*”, U.S. Patent - US6151555A. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2000054207>. Acesso em: 03 abr 2024.
- Woodcock, N. H., Fischer, M. (1986). Strike-slip duplexes. *Journal of Structural Geology*, 8, 725-735. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(86\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90021-0)
- Wright, V. P., Barnett, A. J. (2015). An abiotic model for the development of textures in some South Atlantic early Cretaceous lacustrine carbonates. In: Bosence, D. W. J., Gibbons, K. A., Le Heron, D. P., Morgan, W. A., Pritchard, T. & Vining, B. A. (eds) *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. *Geological Society, London, Special Publications*, 418(1), 209-219. <https://doi.org/10.1144/SP418.3>
- Wright, V. P., Tosca, N. J. A. (2016). A Geochemical Model for the Formation of the Pre-Salt Reservoirs, Santos Basin, Brazil: Implications for Understanding Reservoir Distribution. *AAPG Search and Discovery*, Article #51304.
- Zalán, P. V., Oliveira, J. A. B. (2005). Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil: *Boletim de Geociências da Petrobras*, 13, 269-300.