



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Tecnologia e Ciências**

**Faculdade de Geologia**

**Gabriela Salomão Martins**

**Evolução tectono-estratigráfica dos evaporitos Horizonte e  
Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas e suas  
implicações na abertura do Oceano Atlântico Sul**

**Rio de Janeiro**

**2016**

Gabriela Salomão Martins

**Evolução tectono-estratigráfica dos evaporitos Horizonte e Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas e suas implicações na abertura do Oceano Atlântico Sul**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de bacias.

Orientador: Prof. Dr. Webster Ueipass Mohriak

Coorientador: Dr. Nivaldo Destro

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

M386 Martins, Gabriela Salomão.  
Evolução tectono-estratigráfica dos evaporitos Horizonte e Paripueira na porção alagoana da Bacia Sergipe-Alagoas e suas implicações na abertura do Oceano Atlântico Sul / Gabriela Salomão Martins. – 2016.  
225 f.: il.

Orientador: Webster Ueipass Mohriak.  
Coorientador: Nivaldo Destro.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.  
Bibliografia.

1. Evaporitos – Alagoas – Teses 2. Tectônica de placas – Alagoas – Teses. 3. Geologia estrutural – Alagoas – Teses. 4. Sedimentação e depósitos – Teses. 5. Bacias sedimentares – Teses. I. Mohriak, Webster Ueipass. II. Destro, Nivaldo. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 551.247:551.3.051(813.5)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Gabriela Salomão Martins

**Evolução tectono-estratigráfica dos evaporitos Horizonte e Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas e suas implicações na abertura do Oceano Atlântico Sul**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de bacias.

Aprovada em 05 de outubro de 2016.

Banca examinadora: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Webster Ueipass Mohriak (Orientador)  
Faculdade de Geologia - UERJ

\_\_\_\_\_  
Dr. Nivaldo Destro (Coorientador)  
PETROBRAS

\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Mônica da Costa Pereira Lavalley Heilbron  
Faculdade de Geologia – UERJ

\_\_\_\_\_  
Dr. Andres Cesar Gordon  
ACG|G&G Consultoria

Rio de Janeiro

2016

## DEDICATÓRIA

Valéria Salomão (*in memoriam*)

## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio e incentivo de várias pessoas e instituições, as quais expresso meus sinceros agradecimentos:

À minha família, por todo o apoio, carinho e compreensão, em especial à Valéria Salomão (*in memoriam*), que foi a primeira pessoa a reconhecer a importância e incentivar a realização deste projeto.

Ao meu companheiro de todas as horas, Felipe Saliba, que me apoiou e motivou desde sempre, que discutiu e participou de cada linha escrita nesta dissertação e que fez com que cada momento difícil se parecesse mais leve, de forma que sem o qual este trabalho não teria se realizado.

Ao Dr. Nivaldo Destro, pela orientação, paciência, disponibilidade e por sua inestimável dedicação a este projeto, tendo ensinado e discutido geologia amplamente e contribuído de forma significativa para os resultados obtidos.

Ao Prof. Dr. Webster Mohriak, pela orientação e pela oportunidade de desenvolver este projeto tão importante e enriquecedor para minha vida profissional.

Aos membros da banca examinadora deste trabalho, Prof.<sup>a</sup> Dra. Mônica Heilbron e Dr. Andrés Gordon, pelas excelentes correções e sugestões.

Ao amigo e geólogo Thiago Falcão pelos ensinamentos e discussões sobre a restauração estrutural realizada neste trabalho e ao CENPES/PETROBRAS pela oportunidade de utilização dos softwares Recon e AnaSeTe.

À Vânia Campinho e Denise Teixeira da PETROBRAS Sede e aos profissionais da PETROBRAS/UO-SEAL pela presteza e cordialidade durante a disponibilização dos testemunhos descritos neste trabalho.

Aos (às) professores (as) da Faculdade de Geologia da UERJ, pelas aulas e discussões geológicas, em especial Prof. Dr. Miguel Mane, Prof. Dr. Mauro Geraldês, Prof. Dr. Leonardo Uieda, Prof. Dr. Paulo de Tarso Menezes, Prof. Dr. Marcus Berao, Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi e Prof. Dr. Hernani Chaves, que contribuíram de maneira direta ou indireta para este trabalho.

Aos (às) amigos (as) do Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da UERJ, pela convivência, aprendizado e colaboração neste projeto,

em especial ao inesquecível Alex Peçanha (*in memoriam*), um ser nobre e de alma iluminada, que em pouco tempo conquistou meu profundo respeito e admiração e a quem tive a honra de receber sua amizade.

Aos (às) amigos (as) da turma de 2014 da Especialização em Sismoestratigrafia da UERJ, pelo aprendizado e experiências trocadas, em especial Ricardo Nicácio, pela contribuição para este trabalho com a parte de filtragem e pós-processamento sísmico.

Ao Geofísico Élvio Bulhões, da PETROBRAS, pelas orientações e ensinamentos sobre filtragem e pós-processamento sísmico.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Katherine Giles, da University of Texas at El Paso e ao Prof. Dr. Greg Mack, emérito da New Mexico State University, pela viagem de campo no Rio Grande Rift (EUA) e pelas excelentes discussões geológicas sobre este trabalho.

À PETROBRAS e ANP pela concessão da bolsa de estudos, por meio dos programas PFRH – PETROBRAS e PRH17-ANP.

À ANP pela concessão dos dados públicos de sísmica, poços e gravimetria utilizados neste trabalho.

Um passo a frente e você não está mais no mesmo lugar.

*Chico Science*



## RESUMO

MARTINS, Gabriela Salomão. **Evolução tectono-estratigráfica dos evaporitos Horizonte e Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas e suas implicações na abertura do Oceano Atlântico Sul.** 2016. 255f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Na Bacia de Sergipe-Alagoas ocorrem três eventos evaporíticos: Horizonte, Paripueira e Ibura. Os dois primeiros, objetos deste estudo, pertencem à fase rifte e são os mais antigos da bacia. Suas ocorrências se restringem a baixos estruturais na porção terrestre da Sub-Bacia Alagoas, cujas áreas de estudo foram os Baixos de Varela e Fazenda Guindaste. Descrições de testemunhos dos evaporitos Horizonte na Formação Coqueiro Seco revelaram que estes consistem unicamente de halita. Os evaporitos Paripueira na Formação Maceió também são formados somente por halita, conforme indicado pelos perfis dos poços analisados. Testemunhos de sedimentos intercalados entre as diversas camadas de sal mostraram depósitos de fluxo gravitacional, com mineralogia e textura imaturas, apontando para deposição sin-tectônica às falhas do rifte em ambiente lacustre. A análise estratigráfica, tanto do Baixo de Varela quanto de Fazenda Guindaste, levaram à identificação de sequências lacustres, com algumas das superfícies de máxima regressão coincidindo com o topo das camadas de sal e a principal superfície de inundação máxima coincidindo com o topo dos folhelhos da Formação Ponta Verde. A interpretação dos dados sísmicos mostrou que os Baixos de Varela e Fazenda Guindaste são semigrabens regionais controlados pelas falhas de borda, de alívio, transversais e antitéticas. Em ambos os casos, os evaporitos são delimitados pelas falhas do rifte, sendo que em algumas há evidência clara de atividade sin-sedimentar com espessamento das camadas de sal. Este tectonismo gerou subsidência suficiente e acentuou a restrição fisiográfica, permitindo a dissecação dos lagos e precipitação dos evaporitos. Restaurações estruturais evidenciaram a relação espacial entre os dois eventos evaporíticos, mostrando que durante a deposição da Formação Coqueiro Seco, o principal local de geração de espaço era o Baixo de Varela, que apresentava condições tectônicas e climáticas propícias para a deposição de sal. Já, durante a deposição da Formação Maceió, a atividade tectônica mais acentuada migrou em direção ao Baixo de Fazenda Guindaste, permitindo a deposição dos evaporitos Paripueira. Por se tratar de tema multidisciplinar, o contexto tectono-estratigráfico dos evaporitos Horizonte e Paripueira não pode ser explicado sob o ponto de vista de uma disciplina isoladamente, de modo que um estudo abrangente de análise de bacias foi conduzido. Os resultados obtidos, mostraram mais evidências suportando a origem continental lacustre destes evaporitos, sem contribuição de incursões do incipiente Oceano Atlântico.

Palavras-chave: Quebra do Gondwana. Aptiano Inferior. Bacia de Sergipe-Alagoas.

Tectônica rifte. Evaporitos.

## ABSTRACT

MARTINS, Gabriela Salomão. **Tectonic and stratigraphic evolution of the Horizonte and Paripueira evaporites in the Alagoas Sub-Basin, NE Brazil, and its implication to the South Atlantic Ocean opening.** 2016. 255f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Three evaporitic events occur in the SergipeAlagoas Basin, namely Horizonte, Paripueira and Ibura. The first two events, which are the focus of this work, belong to the Early Aptian synrift phase and are the oldest evaporites associated with the Gondwana breakup in the Brazilian margin. This sequence occurs in restricted and localised structural lows in the onshore portion of the Alagoas subbasin, particularly in the Varela and Fazenda Guindaste Lows, forming layers with hundreds of meters in thickness. The upper sequence (Ibura event) is restricted to the onshore and offshore portions of the Sergipe SubBasin, and is equivalent to the main evaporite layer that was deposited during the South Atlantic opening. Core descriptions of the Horizonte evaporites in the Coqueiro Seco Formation revealed they consist only of halite. The Paripueira evaporites in the Maceió Formation are also formed only by halite, as indicated by well logs. Core samples of sediments interbedded with these salt layers show gravitational flux deposits, with immature texture and mineralogy, suggesting syntectonic deposition in a lacustrine environment. Seismic interpretation indicates the Varela and Paripueira Lows are half grabens controlled by synthetic and antithetic rift faults, as well as transversal release faults. Some of those faults show clear evidence of synsedimentary activity for both evaporitic events. This tectonism provided enough depositional space and accentuated the physiographic restriction, allowing the lakes desiccation and evaporite precipitation. Structural restorations revealed the spatial relationship between these two synrift evaporitic events. During deposition of the Coqueiro Seco Formation, the Varela Low registered the most significant amount of subsidence, with favorable conditions to form the Horizonte evaporites. Subsequently, during deposition of the Maceió Formation, the main tectonic activity migrated towards the Fazenda Guindaste Low, allowing the precipitation of the Paripueira evaporites. This theme cannot be explained by only one isolated discipline point of view, so a multidisciplinary basin analysis study has been conducted. Most of the evidences suggest the early evaporite events formed without contribution of marine incursions from the incipient Atlantic Ocean.

Keywords: Gondwana break-up. Early Aptian. Sergipe-Alagoas Basin. Rift tectonics. Evaporites.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa de localização da área de estudo na Bacia de Sergipe–Alagoas, suas principais feições estruturais e dados geológico–geofísicos utilizados. ....	23
Figura 2 –	Seção geológica da porção alagoana da Bacia de Sergipe–Alagoas, na região dos Baixos de Varela e Fazenda Guindaste, indicando a ocorrência dos evaporitos Horizonte e Paripueira.....	25
Figura 3 –	Idades dos evaporitos Horizonte e Paripueira determinadas por métodos bioestratigráficos. ....	26
Figura 4 –	Distribuição dos eventos evaporíticos da Bacia de Sergipe–Alagoas na sua carta estratigráfica e a relação destes com o estágio tectônico. ....	27
Figura 5 –	Distribuição das estações de aquisição gravimétrica do levantamento Debar_denest na área de estudo.....	32
Figura 6 –	Localização de alguns dos principais depósitos evaporíticos modernos.....	38
Figura 7 –	Mapa de localização e idade de algumas das maiores bacias evaporíticas pretéritas do mundo. ....	38
Figura 8 –	Estrutura atômica da molécula de NaCl (halita) e os deslocamentos entre as camadas de íons.....	41
Figura 9 –	Modelo esquemático de ciclo ideal de deposição de uma sequência evaporítica.....	45
Figura 10 –	Tipos de cristalização primária e secundária de halita e gipsita.....	46
Figura 11 –	Estrutura hopper, típica de cristais de halita. ....	46
Figura 12 –	Variação da densidade em relação à profundidade para sal, folhelho e arenito em rochas do Golfo do México, Estados Unidos.....	49
Figura 13 –	Viscosidade do sal comparada com outros materiais. ....	50
Figura 14 –	Distribuição de depósitos evaporíticos modernos e antigos. ....	55
Figura 15 –	Modelos de bacia evaporítica com barreiras.....	58
Figura 16 –	Modelo idealizado do padrão de distribuição de fácies “olho de touro” (termo original: bull’s eye pattern), típico de bacias completamente fechadas (depois de Schmalz, 1970). ....	59

Figura 17 –	Modelo idealizado do padrão de distribuição de fácies “gota de lágrima” (termo original: tear-drop pattern), típico de bacias restritas (depois de Schmalz, 1970).....	60
Figura 18 –	Mares epicontinentais (seaways), cobrindo grandes áreas no interior dos continentes com águas marinhas rasas e plataformas pericontinentais, que formam amplas bordas continentais de inclinação suave. Caracterizados por águas muito rasas e áreas de centenas a milhares de quilômetros.....	62
Figura 19 –	Estilos deposicionais de evaporitos em rampas e plataformas.....	63
Figura 20 –	Atributos dos três principais estilos de bacias lacustres. ....	65
Figura 21 –	Diagrama de fase dos tipos de bacia lacustre, mostrando a existência e o caráter de estratos não marinhos em geral e em particular como uma função do aporte de sedimento/ água e geração de espaço de acomodação.....	66
Figura 22 –	Diagrama esquemático destacando as principais feições de lagos superpreenchidos.....	67
Figura 23 –	Diagrama esquemático destacando as principais feições de lagos balanceados.....	69
Figura 24 –	Diagrama esquemático destacando as principais feições de lagos subpreenchido.....	70
Figura 25 –	Classificação de sabkha utilizando o contexto deposicional e os constituintes da matriz. ....	74
Figura 26 –	Modelo esquemático de sabkhas marinhas costeiras.....	75
Figura 27 –	Sabkha continental em meio a um sistema de playa, mostrando várias fácies e processos do suprimento de solutos, incluindo escoamento superficial e águas subterrâneas meteóricas e hidrotermais (em parte depois de Kendall, 1992; Eugster & Hardie, 1978).....	76
Figura 28 –	Evolução de um ciclo deposicional em um lago salino efêmero (saline pan).....	77
Figura 29 –	Sabkhat Umm Shurabyat, Arábia Saudita.....	78
Figura 30 –	Espectro climático de águas subterrâneas, texturas e mineralogia das salinas do Holoceno no sul e oeste da Austrália.....	80

Figura 31 –	Salina da Lagoa Vermelha, Brasil. Modelo esquemático da formação de dolomita microbiana e as condições imediatamente acima e abaixo da interface salmoura–sedimento (depois de Vasconcelos & Mackenzie, 1997; Van Lith et al., 2002). .....	81
Figura 32 –	Great Salt Lake e Boneville Salt Flat, Utah, Estado Unidos. Imagem Landsat NASA.....	82
Figura 33 –	Distribuição de sedimentos no Great Salt Lake e arredores. ....	83
Figura 34 –	Bacia do Mar Morto, no Oriente Médio. ....	86
Figura 35 –	Imagem aérea do Lago Assal (fonte: ESRI), distribuição dos sedimentos do Lago Assal (depois de Stieljes, 1973), no Holoceno e modelo de infiltração de água marinha no lago através de fraturas no basalto. ....	87
Figura 36 –	Reconstrução do Permo–Triássico (~250 Ma), mostrando a configuração paleogeográfica do Supercontinente Pangea, previamente aos eventos de fragmentação. ....	88
Figura 37 –	Reconstituição paleogeográfica do processo de abertura do Gondwana entre o Jurássico e o Cretáceo.....	92
Figura 38 –	Carta estratigráfica da Sub–Bacia de Alagoas.....	95
Figura 39 –	Carta Estratigráfica da Sub–Bacia de Sergipe.....	96
Figura 40 –	Modelo de evolução tectônica da Bacia de Sergipe–Alagoas proposto por Lana (1985, 1990) e Falkenhein et al. (1986), baseado na ocorrência de falhas e depocentros escalonados na direção N–S, devido à uma transcorrência sinistral.....	104
Figura 41 –	Configuração da Microplaca Sergipana. ....	105
Figura 42 –	Comparação entre as cartas estratigráficas das bacias das margens nordeste brasileira e oeste africana, mostrando a duração dos seus estágios tectônicos.....	107
Figura 43 –	Modelo esquemático para a evolução tectônica da Sub–Bacia de Sergipe.....	108
Figura 44 –	Esboço paleogeográfico do Eoaptiano (Eo–Alagoas) e o Golfo Paripueira proposto por Ojeda (1981).....	110
Figura 45 –	Colunas estratigráficas de algumas bacias da América do Sul com distribuição das ocorrências de sal no Aptiano e as principais	

	formações e membros associados.....	112
Figura 46 –	Síntese dos principais fósseis relacionados aos períodos de deposição de sal na Bacia de Sergipe–Alagoas. ....	115
Figura 47 –	Bivalves e gastrópodes do Plio – Pleistoceno do Lago Turkana, Sistema de Riftes do Leste Africano. ....	119
Figura 48 –	Poços dos Baixos de Varela e de Fazenda Guindaste, com suas formações litoestratigráficas, litologias e perfis de raios gama e sônico. ....	132
Figura 49 –	Posicionamento dos testemunhos descritos em relação aos poços e seus perfis.....	138
Figura 50 –	Descrição detalhada do testemunho dos evaporitos Horizonte. HAI–pp: Halita (granulometria granulosa) com estrutura plano–paralela.....	141
Figura 51 –	Foto de conjunto e fotos de detalhe do testemunho dos evaporitos Horizonte no poço 1–HZ–0001–AL. ....	142
Figura 52 –	Cristais de halita tipo hopper, pertencentes a caixa 4 do testemunho dos evaporitos Horizonte. ....	143
Figura 53 –	Resposta da perfilagem para o trecho testemunhado e utilização desta para interpretação dos demais trechos dos evaporitos Horizonte.....	144
Figura 54 –	Descrição do testemunho do embasamento, foto de conjunto e fotos de detalhe. ....	145
Figura 55 –	Descrição detalhada do testemunho 1 dos sedimentos da Formação Maceió. ....	147
Figura 56 –	Fotos de conjunto e detalhe do testemunho 1 do poço 1–PA–0001–AL. ....	148
Figura 57 –	Descrição detalhada do testemunho 2 dos sedimentos da Formação Maceió. ....	150
Figura 58 –	Fotos de conjunto e detalhe do testemunho 2 dos sedimentos da Formação Maceió. ....	151
Figura 59 –	Descrição do testemunho 3 dos sedimentos da Formação Maceió. ....	152
Figura 60 –	Fotos de conjunto e de detalhe do testemunho 3 dos sedimentos da Formação Maceió. ....	153

Figura 61 –	Descrição do testemunho 4 dos sedimentos da Formação Maceió. ....	156
Figura 62 –	Fotos de conjunto e de detalhe do testemunho 4 dos sedimentos da Formação Maceió. ....	157
Figura 63 –	Estratigrafia de sequências para os Baixos de Varela e Fazenda Guindaste.....	163
Figura 64 –	Mapa gravimétrico de anomalia Ar Livre obtida a partir de dados de satélite.....	167
Figura 65 –	Mapas gravimétricos de anomalia Bouguer e sua derivada vertical obtidos a partir do levantamento gravimétrico terrestre Debar–denest e correlação com arcabouço tectônico da Bacia de Sergipe–Alagoas..	168
Figura 66 –	Mapa gravimétrico de anomalia Bouguer com sobreposição de arcabouço estrutural interpretado pelo método “multiscale edge detection”. ....	170
Figura 67 –	Seção sísmica em tempo composta pela linha 2D 0027–1270 e linha arbitrária do 3D 0026–Rio Sumauma localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	172
Figura 68 –	Comaparação entre a seção (em tempo) sem interpretação e interpretada, composta pela linha 2D 0027–1270 e linha arbitrária do 3D 0026–Rio. Nota: Aplicação do atributo sísmico Envelope, que auxiliou na interpretação das duas falhas de borda do rifte. ....	174
Figura 69 –	Detalhe da linha sísmica 0027–1270, mostrando o padrão divergente dos refletores nos evaporitos Horizonte (em cor rosa).....	175
Figura 70 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–0933 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	176
Figura 71 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1265 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	177
Figura 72–	Detalhe da amarração entre o poço 1–HZ–0001–AL e a seção sísmica 0027–1265, mostrando as litologias perfuradas pelo poço (halita em lilás) e o perfil de raios gama (em verde). ....	178
Figura 73 –	Seção sísmica em tempo da linha 0027–1265 com aplicação do atributo sísmico Envelope. ....	180
Figura 74 –	Bloco diagrama mostrando os principais elementos estruturais relacionados à formação de falhas de alívio, entre eles a rampa de	

	direção. ....	181
Figura 75 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1261 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	183
Figura 76 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1254 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	184
Figura 77 –	Visões tridimensionais das linhas sísmicas interpretadas na região do Baixo de Varela.....	185
Figura 78 –	Mapa estrutural (em tempo) do topo dos evaporitos Horizonte gerado a partir da interpretação das linhas sísmicas e principais falhas mapeadas que o delimitam. ....	186
Figura 79 –	Modelo tectono–estratigráfico proposto para o Baixo de Varela.....	190
Figura 80 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1427 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	192
Figura 81 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1435 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	195
Figura 82 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0220–0461 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	196
Figura 83 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1628 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	197
Figura 84 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1452 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	198
Figura 85 –	Seção sísmica em tempo da linha 2D 0027–1610 localizada conforme mapa acima e mostrando os horizontes e falhas interpretados. ....	199
Figura 86 –	Bloco diagrama mostrando a geometria do espaço deposicional durante a deposição dos evaporitos Paripueira, com base nas principais estruturas mapeadas nas linhas sísmicas. ....	201
Figura 87 –	Restauração estrutural da seção geológica regional publicada por Arienti (2006), posicionada no dip da bacia e passando pelo Baixo de Fazenda Guindaste.....	203
Figura 88 –	Restauração estrutural da seção geológica regional publicada por Souza–Lima (2008), posicionada no strike da bacia e passando pelos Baixos Varela e de Fazenda Guindaste.....	206
Figura 89 –	Carta estratigráfica simplificada da Bacia de Kwanza desde o pré–	



	rifte ao final do Cretáceo, mostrando a ocorrência do sal no Membro Maculungo (Barremiano) e localização do poço que perfurou este sal.	217
Figura 90 –	Foto aérea de lago controlado por falha normal com sedimentação recente de gipsita e foto panorâmica deste lago na base da Guadalupe Mountains, Rifte do Rio Grande, SW do Texas. ....	223
Figura 91 –	Mapa de ocorrência de evaporitos na América do Sul durante o Permo–carbonífero. ....	223

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Principais características e perfis geofísicos disponíveis para os poços efetivamente utilizados no projeto. ....	30
Tabela 2 –	Sísmica 2D Utilizada. ....	32
Tabela 3 –	Levantamento sísmico 3D utilizado.....	33
Tabela 4 –	Íons mais abundantes na água do mar e comparação com águas de rios. ....	40
Tabela 5 –	Valência e raio atômico dos principais elementos constituintes dos evaporitos.....	41
Tabela 6 –	Principais minerais evaporíticos, suas composições químicas e seus valores típicos de raios gama. ....	42
Tabela 7 –	Sequência típica de deposição de minerais evaporíticos, de acordo com sua solubilidade.....	44
Tabela 8 –	Densidade típica e composição química de alguns dos principais minerais evaporíticos. ....	48
Tabela 9 –	Taxas de sedimentação de diferentes tipos de sedimentos.....	53
Tabela 10 –	Alguns exemplos de depósitos evaporíticos lacustres. ....	64
Tabela 11 –	Alguns exemplos de evaporitos em corpos aquosos perenes quaternários em contextos costeiro e continental. ....	79
Tabela 12 –	Espessuras verticais, em metros, das unidades estratigráficas perfuradas pelos poços no Baixo de Varela.....	131
Tabela 13 –	Espessura total e efetiva de sal (halita) dos evaporitos Horizonte, nos poços do Baixo de Varela.....	133
Tabela 14 –	Espessuras verticais, em metros, das unidades estratigráficas perfuradas pelos poços no Baixo de Fazenda Guindaste.....	135
Tabela 15 –	Espessura total e efetiva de sal (halita) nos evaporitos Paripueira, nos poços do Baixo de Fazenda Guindaste.....	136
Tabela 16 –	Superfícies estratigráficas presentes em função de cada contexto deposicional. ....	160
Tabela 17 –	Quadro comparativo entre as evidências que suportam os modelos de deposição continental e marinho.....	224

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	20
1	<b>LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	20
2	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	22
3	<b>OBJETIVOS</b> .....	28
4	<b>BASE DE DADOS</b> .....	29
4.1	<b>Poços</b> .....	29
4.2	<b>Levantamentos Geofísicos de Métodos Potenciais</b> .....	31
4.3	<b>Sísmica 2D</b> .....	31
4.4	<b>Sísmica 3D</b> .....	33
5	<b>MÉTODOS DE TRABALHO E FERRAMENTAS UTILIZADAS</b> .....	34
5.1	<b>Análise dos dados de poços</b> .....	34
5.2	<b>Interpretação dos dados gravimétricos e magnetométricos</b> .....	34
5.3	<b>Interpretação sísmica</b> .....	35
5.4	<b>Restauração estrutural</b> .....	36
6	<b>CONCEITOS BÁSICOS SOBRE EVAPORITOS</b> .....	37
6.1	<b>Introdução</b> .....	37
6.2	<b>Definição de evaporitos e suas principais características físico-químicas</b> .....	37
6.2.1	<u>Composição química, mobilidade química e solubilidade</u> .....	39
6.2.2	<u>Cristalinidade</u> .....	45
6.2.3	<u>Densidade</u> .....	47
6.2.4	<u>Viscosidade</u> .....	50
6.2.5	<u>Resistência a esforços distensionais e compressionais</u> .....	51
6.2.6	<u>Condutividade térmica</u> .....	51
6.2.7	<u>Velocidade sísmica</u> .....	51
7	<b>AMBIENTES DE SEDIMENTAÇÃO DE EVAPORITOS</b> .....	53
7.1	<b>Características gerais e taxa de sedimentação</b> .....	53
7.2	<b>Modelos de deposição para bacias evaporíticas pretéritas</b> .....	56
7.2.1	<u>Bacia com barreira em uma das entradas “basinwide deposits”</u> .....	56
7.2.2	<u>Plataformas evaporíticas</u> .....	61

7.2.3	<u>Evaporitos lacustres</u> .....	64
7.3	<b>Modelos de deposição para bacias evaporíticas atuais</b> .....	72
7.3.1	<u>Depósitos de corpos aquosos efêmeros: sabkhas e lagos salinos</u> .....	72
7.3.2	<u>Depósitos de corpos aquosos perenes: salinas e lagos salinos</u> .....	78
8	<b>ORIGEM E EVOLUÇÃO DA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA DENTRO DO CONTEXTO DE ABERTURA DO GONDWANA</b> .....	88
9	<b>ARCABOUÇO TECTONO-ESTRATIGRÁFICO DA BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS</b> .....	93
9.1	<b>O Embasamento da Bacia de Sergipe-Alagoas</b> .....	93
9.2	<b>O Estágio de sinéclise paleozoica</b> .....	94
9.3	<b>O estágio pré-rifte</b> .....	97
9.4	<b>O estágio rifte</b> .....	97
9.5	<b>O estágio transicional</b> .....	100
9.6	<b>O estágio drifte</b> .....	101
10	<b>MODELOS DE EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS</b> .....	103
11	<b>PRINCIPAIS MODELOS EXISTENTES SOBRE OS EVAPORITOS HORIZONTE E PARIPUEIRA</b> .....	109
12	<b>CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS SOBRE ASPECTOS PALEONTOLÓGICOS</b> .....	113
12.1	<b>Registro fóssil na Bacia de Sergipe-Alagoas entre o Barremiano Superior e o Aptiano</b> .....	113
12.2	<b>Registro fóssil em outras bacias do sistema cretáceo de riftes do Atlântico Sul</b> .....	121
12.3	<b>Discussão</b> .....	124
13	<b>CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS SOBRE ASPECTOS GEOQUÍMICOS</b> .....	127
14	<b>RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	130
14.1	<b>Análise sedimentológica e estratigráfica com base em perfis e testemunhos de poços</b> .....	130
14.1.1	<u>Descrição dos poços</u> .....	130

14.1.1.1	Poços no Baixo de Varela .....	130
14.1.1.2	Poços no Baixo de Fazenda Guindaste .....	134
14.1.2	<u>Descrição e interpretação dos testemunhos</u> .....	137
14.1.2.1	Poço 1-HZ-0001-AL .....	139
14.1.2.1.1	Testemunho dos evaporitos Horizonte.....	139
14.1.2.1.2	Testemunho do embasamento.....	140
14.1.2.2	Poço 1-PA-0001-AL .....	146
14.1.2.2.1	Testemunhos dos sedimentos siliciclásticos da Formação Maceió.....	146
14.1.3	<u>Interpretação estratigráfica</u> .....	159
14.1.3.1	Análise estratigráfica dos Baixos de Varela e Fazenda Guindaste.....	161
14.2	<b>Análise tectônica com base em interpretação integrada de dados sísmicos, métodos potenciais e poços</b> .....	166
14.2.1	<u>Aspectos tectônicos regionais observados nos dados gravimétricos</u> .....	166
14.2.2	<u>Baixo de Varela e evaporitos Horizonte</u> .....	171
14.2.2.1	Aspectos tectônicos observados nos dados sísmicos e de poços	171
14.2.3	<u>Modelo tectono-estratigráfico proposto</u> .....	186
14.2.4	<u>Baixo de Fazenda Guindaste e evaporitos Paripueira</u> .....	191
14.2.4.1	Aspectos tectônicos observados nos dados sísmicos e de poços	191
14.2.4.2	Modelo tectono-estratigráfico proposto .....	200
14.2.5	<u>Análise tectônica integrada dos Baixos de Varela e Fazenda Guindaste com base em restaurações estruturais</u> .....	205
15	<b>DISCUSSÕES E CONCLUSÕES</b> .....	209
15.1	<b>Considerações iniciais</b> .....	209
15.2	<b>Evolução tectono-estratigráfica do Baixo de Varela e evaporitos Horizonte</b> .....	209
15.3	<b>Evolução tectono-estratigráfica do Baixo de Fazenda Guindaste e Evaporitos Paripueira</b> .....	211
15.4	<b>Discussões sobre a gênese e implicações dos evaporitos</b> .....	213

	<b>Horizonte e Paripueira na abertura do oceano Atlântico Sul</b>	
15.5	<b>O modelo existente de incursão marinha no Aptiano Inferior.....</b>	<b>214</b>
15.6	<b>O modelo de precipitação de sal em lagos continentais do tipo playa lake .....</b>	<b>220</b>
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>224</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>227</b>

## INTRODUÇÃO

Esta dissertação é parte integrante e conclusiva dos requisitos para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Tal trabalho foi desenvolvido sob orientação do Prof. Dr. Webster Ueipass Mohriak, do Departamento de Geologia Regional e Geotectônica da instituição acima citada e do Dr. Nivaldo Destro, do Departamento de Exploração da Petrobras. Este projeto recebeu apoio do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (PRH 17/ANP/UERJ) por meio de concessão de bolsa de estudos durante os dois anos de mestrado, com recursos advindos do Programa de Formação de Recursos Humanos da Petrobras (PFRH PETROBRAS).

### 1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Sergipe-Alagoas ocupa uma faixa alongada na costa brasileira, na região nordeste do país. Faz limite a norte, com a Bacia de Pernambuco-Paraíba, no Alto de Maragogi e a sul, com a Bacia de Jacuípe, no sistema de falhas Vaza-Barris (Figura 1). Esta bacia possui uma área emersa de 13.000 km<sup>2</sup> e uma área submersa de 20.000 km<sup>2</sup>, até a cota batimétrica de 2.000 m (Feijó, 1994).

De acordo com Campos Neto *et al.* (2007) a Bacia de Sergipe-Alagoas foi abordada em diversos trabalhos como uma única bacia, dos quais se destaca o trabalho de Lana (1985). Entretanto, Feijó (1994), na sua revisão das cartas estratigráficas, individualizou as bacias Sergipe e Alagoas, estabelecendo o limite entre estas no Alto de Japoatã-Penedo. Neste trabalho a Bacia de Sergipe-Alagoas será tratada como bacia única, seguindo o que foi considerado por Campos Neto *et al.* (2007) em uma das revisões mais atuais das cartas estratigráficas desta bacia. De acordo com o mesmo autor, o Alto de Japoatã-Penedo (Figura 1) não caracteriza um divisor de bacias e está restrito apenas à porção emersa e de águas rasas, não se prolongando até o bloco baixo da charneira Eoalagoas. Entretanto, o preenchimento sedimentar e o estilo tectônico variam da porção sergipana para a

alagoana, o que faz se considerar estas porções como duas sub-bacias distintas dentro de uma única bacia e, cada qual com sua própria carta estratigráfica.

A área de estudo deste trabalho está restrita à porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas, onde estão localizadas as ocorrências dos evaporitos Horizonte e Paripueira, especificamente nos Baixos de Varela e Fazenda Guindaste (Figura 1).



## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As bacias sedimentares da margem leste brasileira são de grande importância econômica e científica, devido ao seu conteúdo petrolífero e aos seus registros sedimentares que evidenciam a abertura do Oceano Atlântico Sul. Dentre essas bacias, a Bacia de Sergipe-Alagoas, situada no nordeste do Brasil, foi escolhida como tema de estudo.

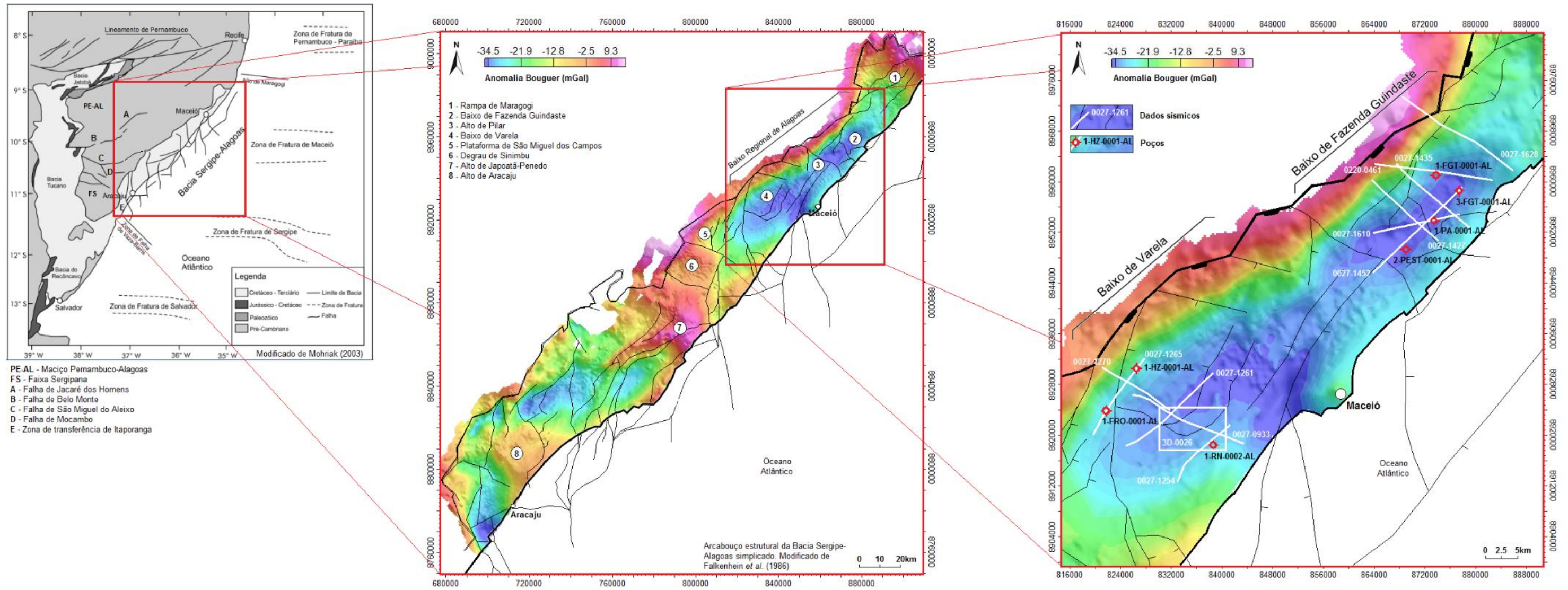
Esta bacia apresenta uma completa sucessão estratigráfica, estando representados depósitos relacionados desde as fases de sinéclise paleozoica até a fase drifte (Souza-Lima, 2008). Dentre estes depósitos, ocorrem três eventos evaporíticos denominados Horizonte, Paripueira e Ibura, dos quais os dois primeiros, que são também os mais antigos, são o objetivo de estudo desta dissertação.

As ocorrências conhecidas dos evaporitos Horizonte e Paripueira estão restritas à Sub-bacia de Alagoas (Souza-Lima, 2008). Estas ocorrências estão concentradas na porção emersa da bacia com alguns indícios na plataforma continental, restritas aos seguintes baixos estruturais: Baixo de Varela, Baixo de Fazenda Guindaste e Baixo de Coruripe (Souza-Lima, 2008).

O evento evaporítico Horizonte possui pequena espessura conhecida (apenas 57 m de halita, detectados pelo poço 1-HZ-1-AL, perfurado pela PETROBRAS) e ocorrência restrita ao Baixo de Varela, na porção médio-superior da Formação Coqueiro Seco (Souza-Lima, 2008).

O evento evaporítico Paripueira foi reconhecido pela primeira vez quando da perfuração do poço 1-AL-2A-AL, no Baixo Regional de Alagoas, operado pela empresa Drilex nos anos 1940. Posteriormente, foi também detectado pelo poço 1-PA-1-AL, executado pela PETROBRAS, em 1958, no Baixo de Fazenda Guindaste. Este poço alcançou espessura total efetiva de 347m de halita.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo na Bacia de Sergipe-Alagoas, suas principais feições estruturais e dados geológico-geofísicos utilizados.



Fonte: A autora, 2016.

Em 1972, o poço 1-ALS-3, executado no Baixo de Coruripe (plataforma continental), também constatou evaporitos, provavelmente deste mesmo evento, mas ainda não confirmado (Souza-Lima, 2008).

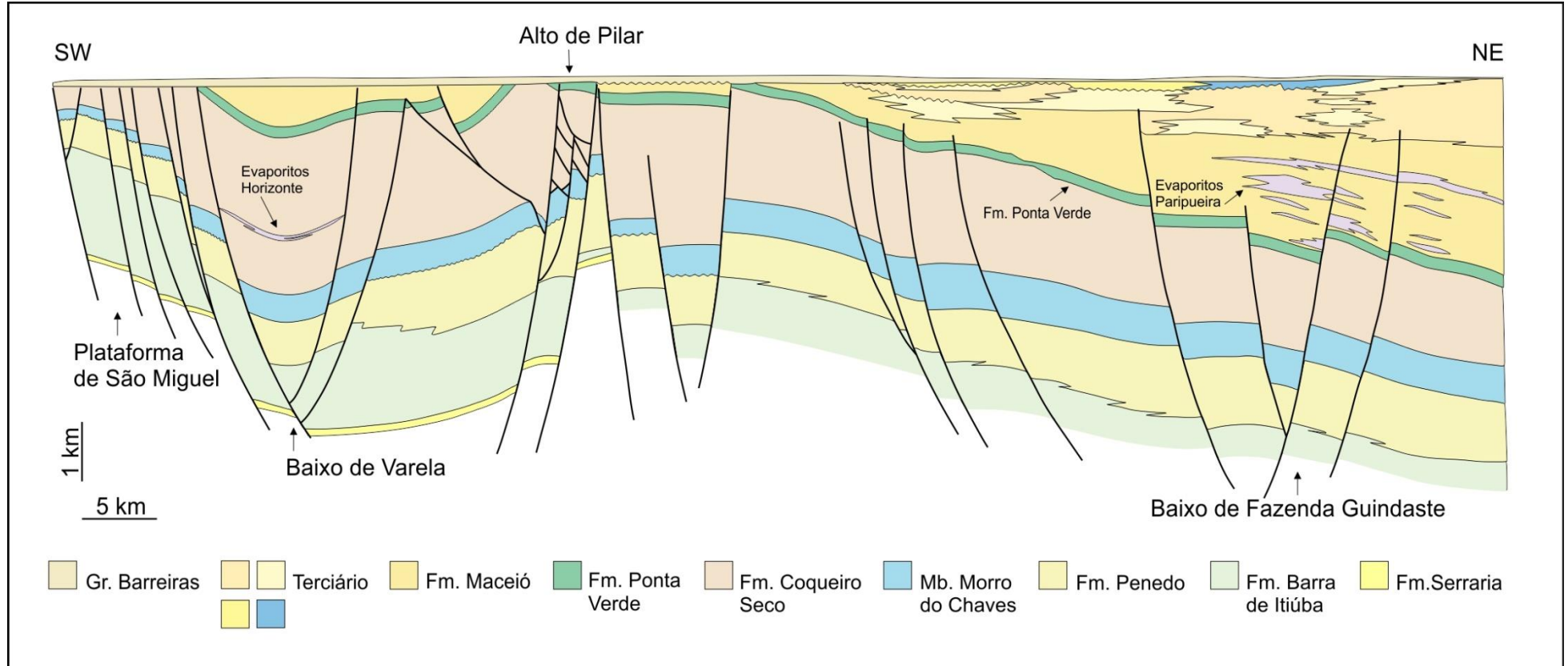
Inicialmente, o evaporito Horizonte foi considerado como uma ocorrência estratigraficamente mais antiga do evento Paripueira, mas análises micropaleontológicas e estratigráficas distinguiram os dois eventos. Estas análises, baseadas em ostracodes não marinhos, posicionaram os evaporitos Horizonte na Formação Coqueiro Seco, abaixo dos folhelhos da Formação Ponta Verde. Dessa forma, eles foram caracterizados como em uma zona mais antiga e distinta dos evaporitos Paripueira, que ocorrem estratigraficamente acima de tal formação (Souza-Lima, 2008) (Figura 2).

As idades destes evaporitos foram determinadas por métodos bioestratigráficos, como o estudo de palinomorfos, pela PETROBRAS (Uesugui, 1987), posicionando os evaporitos Horizonte no andar local Jiquiá (base do Eoaptiano, cerca de 125 Ma) e os evaporitos Paripueira no andar local Alagoas (Aptiano Médio, cerca de 115 Ma) (Figura 3). O posicionamento dos evaporitos Horizonte no andar Jiquiá, os torna os mais antigos da Bacia de Sergipe-Alagoas e, conseqüentemente, de toda a margem brasileira (Souza-Lima, 2008).

Outra característica peculiar destes evaporitos, além de sua idade mais antiga que a maioria dos demais na margem brasileira, é o estágio tectônico no qual foram depositados. Alguns autores (e.g. Lima, 1987; Mendes, 1996; Souza-Lima, 2008 e Cruz, 2008) embora diverjam quanto ao posicionamento do final do estágio rifte na Bacia de Sergipe-Alagoas, sugerem que os evaporitos Horizonte e Paripueira foram depositados ainda neste estágio, diferentemente do que ocorre no restante das bacias marginais, onde o sal é considerado como pós-rifte (Figura 3 Figura 4).

As características dos evaporitos Horizonte e Paripueira citadas acima (mais antigos de todas as bacias marginais brasileiras e deposição durante o estágio rifte) tornam-nos peças-chave no entendimento da evolução tectônica da Bacia de Sergipe-Alagoas e, por conseguinte, de todo Rifte Sul Atlântico, justificando-se assim sua escolha como tema de estudo. Soma-se a isto a carência de estudos sobre estes evaporitos, já que os estudos mais detalhados, em sua maioria, foram dirigidos para os evaporitos Ibura, que são mais representativos em termos de área, volume e exploração como bem mineral.

Figura 2 - Seção geológica da porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas, na região dos Baixos de Varela e Fazenda Guindaste, indicando a ocorrência dos evaporitos Horizonte e Paripueira.

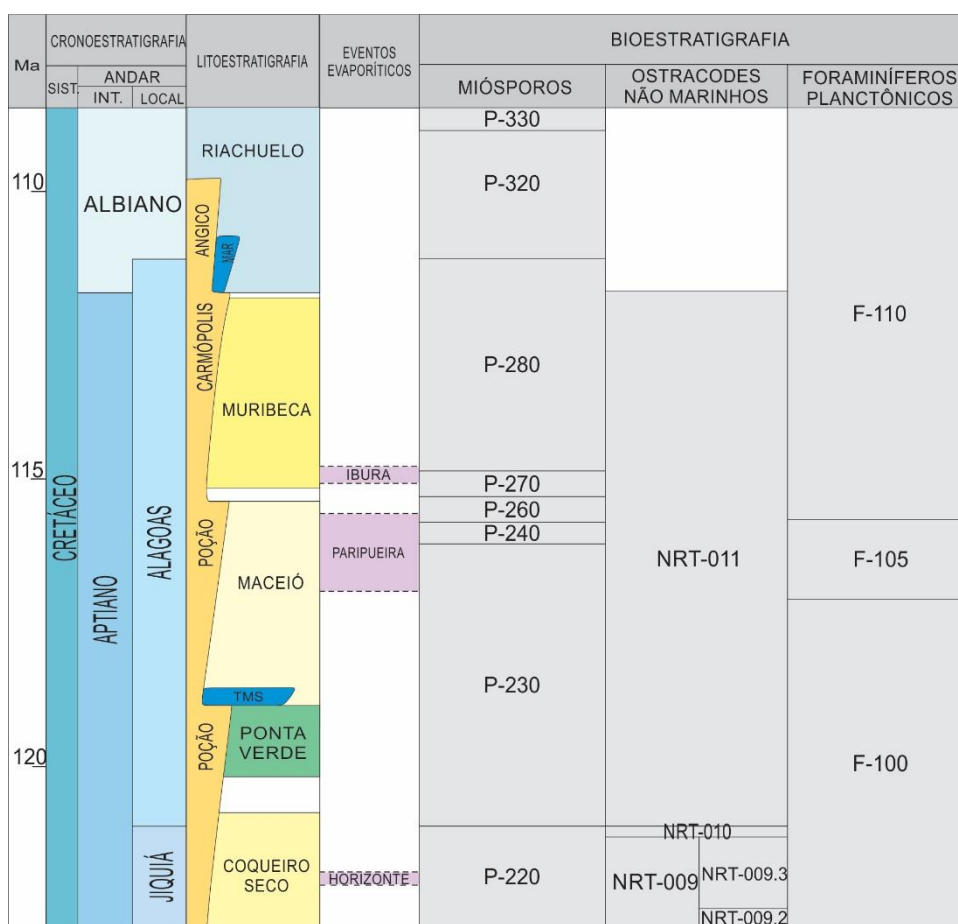


Fonte: SOUZA-LIMA, 2008. Adaptada pela autora, 2016.



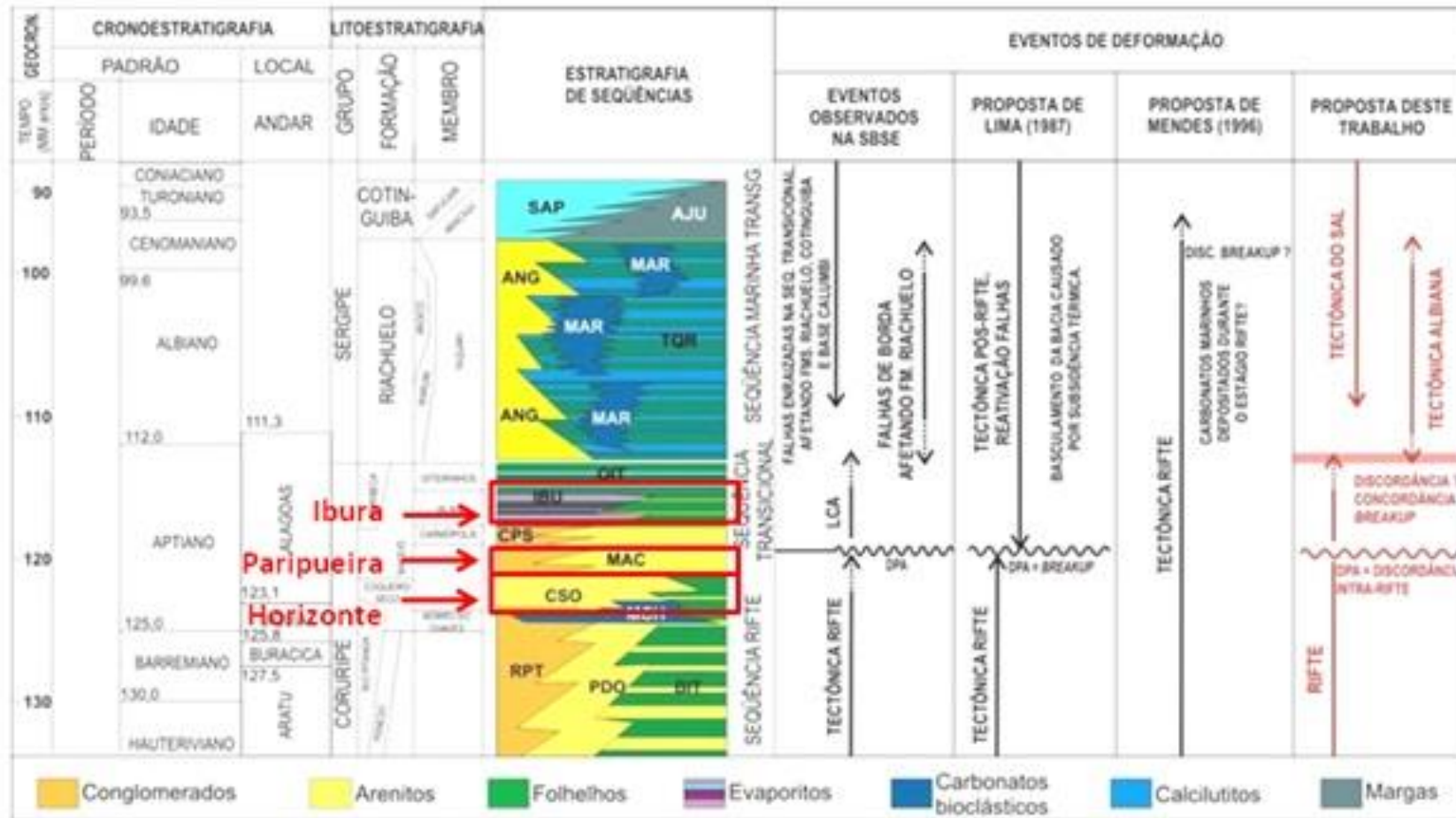
Adicionalmente, existem ainda algumas questões em aberto que podem ser elucidadas com o estudo dos evaporitos Horizonte e Paripueira, como por exemplo: a extensão e espessura de seus depósitos, o controle tectônico na deposição destes e suas relações com as estruturas do rifte, seus ambientes de deposição e discussões sobre paleogeografia e paleoambientes do sistema de riftes do Atlântico Sul durante o Aptiano.

Figura 3 - Idades dos evaporitos Horizonte e Paripueira determinadas por métodos bioestratigráficos.



Fonte: UESUGUI, 1987; SOUZA-LIMA, 2008; CAMPOS NETO *et al.*, 2007. Adapta pela autora, 2016.

Figura 4 - Distribuição dos eventos evaporíticos da Bacia de Sergipe-Alagoas na sua carta estratigráfica e a relação destes com o estágio tectônico.



Nota: Mesmo com divergências quanto ao final do rifte, os evaporitos Horizonte e Paripueira ficam inseridos neste estágio para todos os autores citados.  
Fonte: CRUZ, 2008. Adaptada pela autora, 2016

### 3. OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é caracterizar os evaporitos Horizonte e Paripueira e suas áreas de ocorrência quanto às suas litologias, distribuição espacial, controle tectônico e ambientes de deposição. Soma-se a isto um objetivo mais global que é contribuir para um melhor entendimento da evolução tectono-sedimentar da fase rifte na porção alagoana da Bacia de Sergipe-Alagoas, discutindo suas relações com o processo de abertura do Oceano Atlântico Sul.

Para atingir tais objetivos, foram executados os seguintes trabalhos:

- a) Análise de perfis e testemunhos de poços na região para caracterizar fácies, superfícies estratigráficas e ambientes deposicionais dos evaporitos e sucessões relacionadas a este;
- b) Interpretação de dados geofísicos de métodos potenciais e sísmicos para caracterizar a tectônica associada aos baixos estruturais alvos deste estudo, a distribuição espacial e o controle tectônico dos evaporitos Horizonte e Paripueira;
- c) Utilização de restaurações estruturais de seções geológicas regionais para elucidar a história evolutiva das áreas de estudo de forma integrada;
- d) Integração dos resultados e elaboração de um modelo de evolução tectono-estratigráfica para as áreas de estudo.

## **4. BASE DE DADOS**

Os dados utilizados neste trabalho são públicos e foram cedidos gratuitamente pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), por meio do seu Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) para que fossem utilizados neste projeto acadêmico.

O conjunto de dados recebidos compreende 15 poços, 16 linhas sísmicas 2D, 2 volumes sísmicos 3D, além de levantamento gravimétrico e magnetométrico. A seleção desse conjunto de dados foi feita com base nos locais de ocorrência dos evaporitos Horizonte e Paripueira listados na literatura e de acordo com as regras de acesso e quantidades máximas estipuladas pela ANP.

Porém, cabe ressaltar que todos os dados recebidos foram analisados, mas nem todos foram efetivamente utilizados e apresentados nos resultados, pois alguns deles não atenderam às necessidades deste estudo. Estes incluem poços que não atingiram os intervalos estratigráficos de interesse ou que não dispunham dos perfis necessários ou ainda que não se localizavam exatamente nas estruturas de maior interesse. Também não foram utilizados dados sísmicos não migrados ou com migração bruta, ou com trechos significativos com falta de cobertura sísmica; ou que simplesmente não acrescentaram informação relevante, como foi o caso do levantamento magnetométrico. Sendo assim, os dados efetivamente utilizados neste trabalho são apresentados na Figura 1.

### **4.1 Poços**

Os poços foram selecionados de acordo com os locais que a literatura indica como sendo de ocorrências dos evaporitos em questão e de acordo com as melhores posições em relação aos dados sísmicos, de forma a possibilitar uma melhor amarração entre ambos os dados. Pelos motivos supramencionados, não foi possível utilizar todos os poços recebidos, mas os detalhes daqueles que foram efetivamente utilizados são apresentados na Tabela 1.

Basicamente, os dados dos poços utilizados consistiram nos relatórios de poço, perfil composto, perfis geofísicos em formato digital e testemunhos.



Tabela 1 - Principais características e perfis geofísicos disponíveis para os poços efetivamente utilizados no projeto

Nome	Coord X (UTM)	Coord Y (UTM)	Elevação Mesa Rotativa (m)	Prof. Final (m)	Sísmica de poço	Testemunhos	Perfis disponíveis	Tipo	Resultado
1FGT-0002-AL	214421,00	8961943,20	103,00	3812,00	-	-	CALI, DT, GR, ILD, LLD, LLS, NPHI, RHOB, SP	Exploratório	seco com indícios de óleo e gás
1FRO-0001-AL	182189,78	8939079,54	125,00	3588,00	-	-	CALI, DT, GR, ILD, NPHI, RHOB, SP	Exploratório	seco com indícios de óleo
1HZ-0001-AL	163343,43	8923863,67	113,00	2149,00	-	Sim	CALI, DT, GR, ILD, LLD, LLS, NPHI, RHOB	Exploratório	seco sem indícios de hidrocarboneto
1PA-0001-AL	167930,37	8930422,49	66,74	2627,00	-	Sim	GR, NPHI, RSN	Exploratório	seco sem indícios de hidrocarboneto
1RN-0002-AL	180165,80	8918775,80	94,00	3303,00	-	-	CALI, DT, GR, ILD, NPHI, RHOB, SP	Exploratório	seco sem indícios de hidrocarboneto
2PEST0001-AL	214449,83	8954703,04	70,00	1820,00	-	-	GR, NEUT, SP, RSN	Exploratório	seco sem indícios de hidrocarboneto
3FGT-0003-AL	218139,10	8959553,20	14,00	3495,00	-	-	CALI, DT, GR, ILD, LLD, LLS, NPHI, RHOB	Exploratório	seco sem indícios de hidrocarboneto

Legenda: CALI: caliper, DT: sônico, GR: raios gamma, ILD/LLD: resistividade profunda, LLS: resistividade rasa, NPHI: porosidade neutrônica, RHOB: densidade, RSN: resistividade rasa normal bruta, SP: potencial espontâneo.

Fonte: A autora, 2016.

## 4.2 Levantamentos Geofísicos de Métodos Potenciais

Foram recebidos os seguintes dados de métodos potenciais: gravimetria terrestre, cujo levantamento denomina-se Debar\_denest e magnetometria aérea denominada Maragogi/Canavieiras. Ambos os levantamentos foram disponibilizados pela ANP e abrangem toda a área de estudo. Entretanto, os mapas magnetométricos produzidos não apresentaram resultados significativos e optou-se por não os apresentar nos resultados.

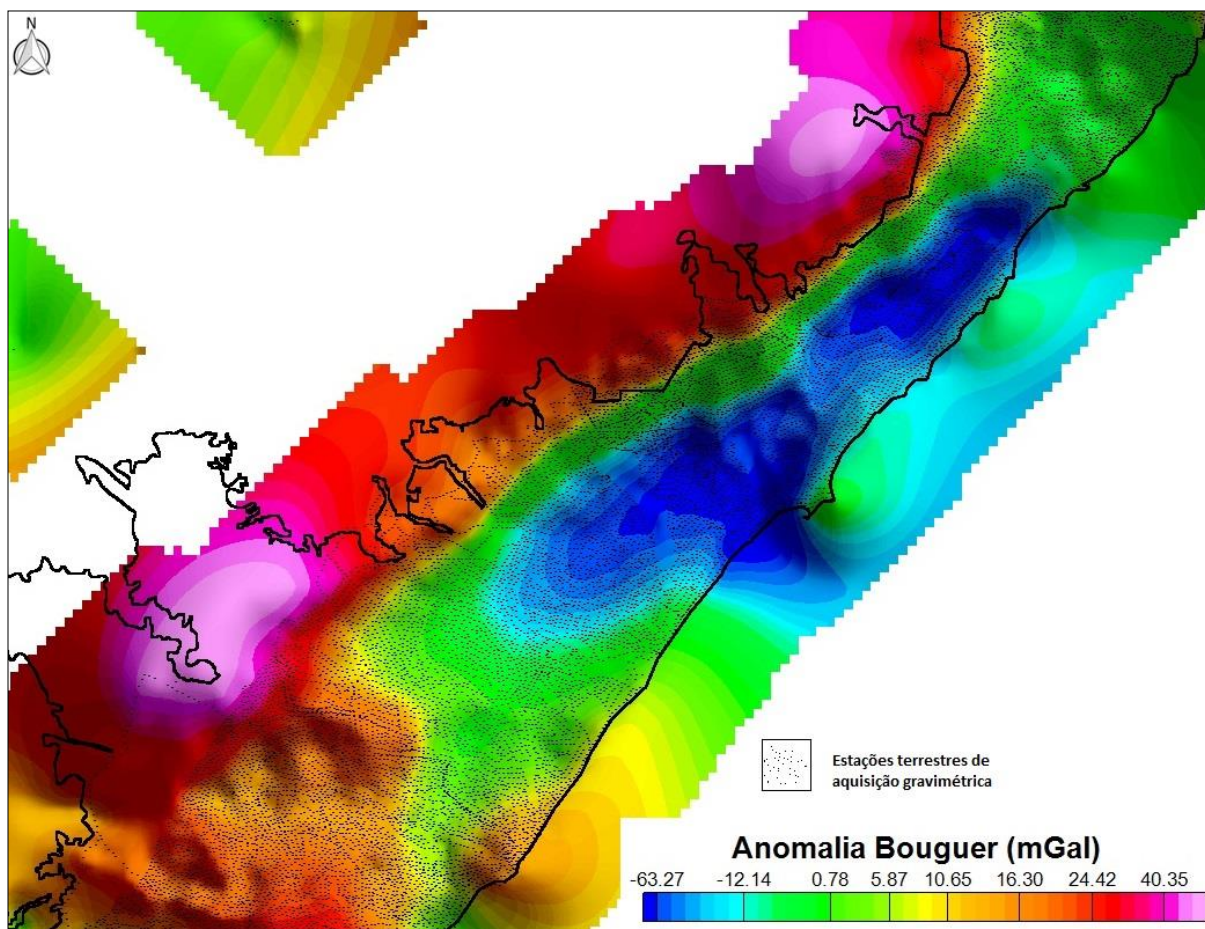
Adicionalmente, também foram utilizados dados gravimétricos de satélite disponibilizados por Sandwell *et al.* (2009, 2013, 2014) através da página na internet da Universidade da Califórnia em San Diego. O levantamento gravimétrico Debar\_denest possui densa malha de estações de aquisição de dados, distribuídos por toda a bacia, conforme mostra a Figura 5. Estes dados foram fornecidos pela ANP no formato de banco de dados (.gdb), contendo o valor absoluto de gravidade medido e o valor de Anomalia Bouguer já calculado.

Já, o dado gravimétrico obtido por meio projeto TOPEX é de cobertura global, mas para este trabalho foram selecionadas informações somente da área de interesse, que engloba toda a Bacia de Sergipe-Alagoas. Este levantamento fornece valores de anomalia gravimétrica Ar-livre.

## 4.3 Sísmica 2D

O conjunto de dados sísmicos 2D que foi efetivamente utilizado consiste em 11 linhas sísmicas processadas no domínio do tempo e fazem parte de diversos levantamentos adquiridos entre os anos 1990 e 2003. A lista das linhas sísmicas 2D utilizadas e suas principais características é apresentada na Tabela 2.

Figura 5 – Distribuição das estações de aquisição gravimétrica do levantamento Debar\_denest na área de estudo.



Fonte: A autora, 2016.

Tabela 2 - Sísmica 2D Utilizada

Levantamento	Segmento	Processamento	Ano de aquisição
R0011_Sergipe_Alagoas_2003	0027-0933	Migração final	2003
R0011_Sergipe_Alagoas_2003	0027-1261	Migração final	2003
R0011_Sergipe_Alagoas_2003	0027-1265	Migração final	2003
R0011_Sergipe_Alagoas_2003	0027-1270	Migração final	2003
R0011_Sergipe_Alagoas_2003	0027-1427	Migração final	2003
R0011_Sergipe_Alagoas_2003	0220-0461	Migração final	2003
R0011_Sergipe_Alagoas_2003	0027-1254	PSTM	2003
0027_Sergipe_Alagoas_33	0027-1435	Migração final	Pré-1998
0027_Sergipe_Alagoas_33	0027-1628	Migração final	Pré-1998
0027_Sergipe_Alagoas_33	0027-1452	Migração final	Pré-1998
0027_Sergipe_Alagoas_33	0027-1610	Migração final	Pré-1998

Legenda: PSTM: *Pre Stack Time Migration*

Fonte: A autora, 2016.

#### 4.4 Sísmica 3D

Foram recebidos dois cubos sísmicos 3D, mas um deles, denominado 0027\_Pilar não possui migração final e não se localiza exatamente nas áreas de interesse, mas sim na estrutura vizinha Alto de Pilar e, portanto, não foi possível utilizá-lo. O outro cubo sísmico, denominado 0026\_Rio Sumaúma, localiza-se na região do Baixo de Varela e possui processamento final, de modo que atendeu às necessidades deste trabalho. A Tabela 3 lista as principais características deste levantamento sísmico 3D.

Tabela 3 - Levantamento sísmico 3D utilizado

<b>Levantamento</b>	<b>Processamento</b>	<b>Ano de aquisição</b>
0026 - Rio Sumauma	PSTM	Pré-1998

Legenda: PSTM: *Pre Stack Time Migration*.  
Fonte: A autora, 2016.

## **5. MÉTODOS DE TRABALHO E FERRAMENTAS UTILIZADAS**

Os métodos utilizados nesta pesquisa compreenderam revisão bibliográfica; análise sedimentológica e estratigráfica de perfis e testemunhos de poços; interpretação tectono-estratigráfica de dados sísmicos; interpretação de dados gravimétricos e restauração estrutural. Os resultados obtidos a partir dos métodos aplicados foram analisados de forma integrada e possibilitaram a elaboração de um modelo de evolução tectono-sedimentar da área de estudo.

### **5.1 Análise dos dados de poços**

Esta etapa da pesquisa iniciou-se com a organização e leitura cuidadosa dos relatórios de poços para obter uma visão geral dos dados. Em seguida, foi feito o carregamento e controle de qualidade dos perfis geofísicos disponíveis. Após ter os perfis carregados no software de interpretação, foram inseridos os marcadores estratigráficos existentes nas suas respectivas profundidades.

Os perfis dos poços serviram tanto para a amarração destes com a sísmica, quanto para a interpretação e correlação dos eventos evaporíticos e suas litologias associadas. Além disso, os perfis e as descrições de amostras de calha e litologias que constavam nos relatórios recebidos foram utilizados para identificar as principais superfícies estratigráficas.

Também foram descritos testemunhos de dois poços: 1-HZ-0001-AL (evaporitos Horizonte e embasamento) e 1-PA-0001-AL (siliciclásticos intercalados entre diversas camadas dos evaporitos Paripueira) que auxiliaram na análise sedimentológica e de ambientes deposicionais.

A análise dos dados de poços como um todo permitiu fazer interpretações de fácies, ambientes deposicionais e estratigrafia de sequências para as áreas de estudo.

### **5.2 Interpretação dos Dados Gravimétricos e Magnetométricos**

A análise dos dados de gravimetria e magnetometria iniciou-se com o carregamento destes no software de interpretação, onde fez-se a configuração de

*datum* e sistema de coordenadas dos mesmos. Em seguida, iniciou-se a etapa de processamento.

Em relação à magnetometria, o processamento consistiu no micro-nivelamento dos dados, que é um procedimento para retirada de ruídos de alta frequência, paralelos às linhas de voo do levantamento. Depois de realizado o processamento, foram gerados mapas de anomalia magnética de campo total, reduzida ao polo e residual. Porém, considerou-se que estes resultados não agregariam informação significativa sobre o problema em questão, sendo então desconsiderados neste trabalho.

Já em relação à gravimetria terrestre, foram gerados mapas de anomalia Bouguer e da primeira derivada vertical da anomalia Bouguer. Além disso, também foi aplicado o método conhecido como *Multiscale Edge Detection* nestes dados, que consiste em se obter o gradiente horizontal em vários níveis de continuação para cima e formar linhas com as amostras que se repetam em um determinado número de vezes ao longo de uma distância pré-definida.

Nos dados gravimétricos de satélite, foi apenas elaborado o mapa da anomalia *Free Air*.

### **5.3 Interpretação Sísmica**

Em relação à interpretação sísmica, a primeira etapa foi o carregamento dos dados no software de interpretação, o que permitiu um reconhecimento geral destes (e.g. polaridade, fase, *mistie*) e identificação dos que tinham condições de serem utilizados e dos que não tinham.

Como a razão sinal/ruído dos dados sísmicos disponíveis é baixa, foram aplicados alguns procedimentos de pós-processamento sísmico do tipo filtros passa-banda e aplicação do filtro *FK Wheighnting* para eliminar ruídos em ângulos diferentes do sinal, no domínio da frequência. O resultado obtido a partir deste pós-processamento foi considerado satisfatório e aumentou principalmente a continuidade dos refletores.

Na sequência, procedeu-se à amarração entre sísmica e poços por meio da construção de sismogramas sintéticos, com base nos perfis de densidade e sônico disponíveis para os poços.

A partir dos poços amarrados, foi possível iniciar a interpretação sísmica das falhas e horizontes. Foram interpretados 14 horizontes, sendo estes: topo do embasamento cristalino, topo da seção pré-rifte, topo da Formação Barra de Itiúba, topo da Formação Penedo, topo da Formação Morro do Chaves, base dos evaporitos Horizonte, topo dos evaporitos Horizonte, topo da Formação Coqueiro Seco, topo da Formação Ponta Verde, base dos evaporitos Paripueira, topo dos evaporitos Paripueira, topo da Formação Maceió, topo da Formação Poção, topo da Formação Barreiras, além de horizontes locais utilizados para marcar os níveis intermediários de sal. O critério de definição dos horizontes a serem mapeados foi baseado nos marcadores disponíveis nos poços.

Para auxiliar na interpretação também foram utilizados alguns atributos sísmicos como *Envelope*, *Variance* (manual Petrel 2014) e *TecVA* (Bulhões e Amorim, 2005).

#### **5.4 Restauração Estrutural**

Os objetivos de uma restauração estrutural são validar geometricamente uma interpretação estrutural por meio de processos que fazem com que a seção geológica a ser restaurada retorne à sua configuração inicial pré-deformação e ajudar a contar a história evolutiva de uma área de estudo.

No caso desta dissertação, duas seções geológicas regionais publicadas, que têm representatividade da área de estudo foram restauradas no software *Recon* (utilização por cortesia do CENPES/PETROBRAS). As principais etapas englobadas neste processo foram: (a) digitalização e condicionamento das seções a serem restauradas, (b) construção da malha de deformação, (c) descompactação e retirada das camadas, (d) restauração das falhas, (e) restituição de trechos erodidos, quando necessário, (e) restauração do topo das camadas.

## 6. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE EVAPORITOS

### 6.1 Introdução

Evaporitos são conhecidos e utilizados pelo ser humano há milhares de anos. Dicionários dos povos sumero-assírios datados de 668 – 626 A.C. já traziam nomes de alguns sais como gipso e halita (Warren, 2006). Já os estudos específicos sobre evaporitos iniciaram-se a cerca de 120 anos, com abordagem predominantemente química e ao longo do tempo evoluíram para estudos de caráter sedimentológico, utilizando modelos recentes para explicar os depósitos pretéritos (Silva *et al.* 2000).

No mundo moderno a importância dos evaporitos não está somente no campo acadêmico, mas também nas atividades de exploração dos minerais evaporíticos em si, e na exploração de petróleo, já que cerca de 50% dos maiores campos de petróleo do mundo estão relacionados a rochas evaporíticas (Warren, 2006).

Os principais ambientes evaporíticos modernos ocorrem em regiões áridas, sob influência de um mar restrito, como por exemplo, Golfo Pérsico, Mar Vermelho, Mar Morto, Kara-Bogaz (leste do Mar Cáspio) e Lago Assal, na região de Afar, nordeste da África (Mohriak, 2008b) (Figura 6). Já os depósitos de épocas pretéritas ocorrem espalhados em bacias sedimentares em diversos locais no mundo (Figura 7).

### 6.2 Definição de evaporitos e suas principais características físico-químicas

Evaporito pode ser definido como uma rocha que foi originalmente precipitada a partir da superfície de uma salmoura saturada, por meio da evaporação solar (Warren 2006). A palavra evaporito tem origem no termo em latim *evaporare* e no sufixo grego *litho*, que significa rocha (Mohriak, 2008a).

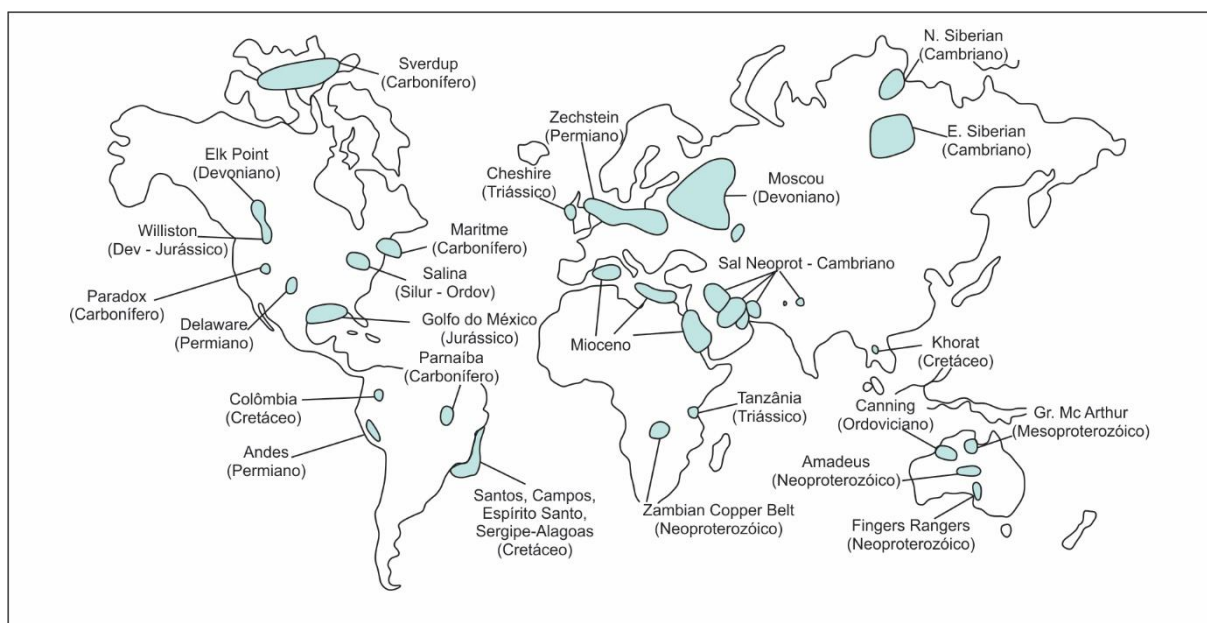


Figura 6 - Localização de alguns dos principais depósitos evaporíticos modernos.



Fonte: Google Earth Pro (Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO, Image Landsat).

Figura 7 - Mapa de localização e idade de algumas das maiores bacias evaporíticas pretéritas do mundo.



Fonte: WARREN, 2006. Adaptada pela autora, 2016

Em sua maior parte, os evaporitos se originam da restrição de mares, quando estes são isolados do sistema global de oceanos e evaporam grandes quantidades de água. A água marinha contém, em média, 36,5 g de sais dissolvidos em cada litro, sendo a maioria composta por NaCl (Mohriak, 2008a). Além da restrição marinha, existem modelos de deposição lacustre de evaporitos, que serão discutidos mais à frente.

Os evaporitos são diferentes das outras rochas, pois possuem características tanto de sólido, como de líquido. Além disso, são rochas temporárias, pois são móveis quimicamente (propriedade de dissolução em água) e fisicamente (fluxo sólido) (Mohriak, 2008a). As principais propriedades físico-químicas que conferem aos evaporitos tamanha peculiaridade são: composição química, solubilidade, mobilidade, cristalinidade, densidade, fluatibilidade, viscosidade, resistência a esforços, condutividade térmica e velocidade sísmica.

#### 6.2.1 Composição química, mobilidade química e solubilidade

Para se entender sobre a solubilidade e mobilidade dos evaporitos, é necessário conhecer a composição química destes e também da água do mar, de onde vêm os principais íons que os formam.

Na água do mar atual os íons mais abundantes são: Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Br<sup>-</sup> e ocorrem em quantidades muito superiores do que nas águas dos rios, como mostra a Tabela 4, a seguir. Logo, se há entrada de águas fluviais em uma bacia em evaporação, a concentração destes íons diminuirá e haverá mudança nos compostos que estão sendo precipitados. Estas mudanças podem ser registradas nas sequências litológicas de uma sucessão evaporítica (Mohriak, 2008a).

Tabela 4 - Íons mais abundantes na água do mar e comparação com águas de rios.

Íon	Oceano (ppm)	Rios (ppm)
Cl <sup>-</sup>	18980	7.5
Na <sup>+</sup>	10560	6.3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2650	11
Mg <sup>2+</sup>	1270	4.1
Ca <sup>2+</sup>	400	15
K <sup>+</sup>	380	2.3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	140	58
Br <sup>-</sup>	65	13

Fonte: MOHRIAK, 2008a.

Outra característica importante em relação a estes íons que formam os sais é o potencial iônico, que é a carga do íon dividida pela sua área superficial. Então, quanto maior o íon, menor será seu potencial iônico, pois a carga ficará distribuída por uma área muito ampla e a força de atração do íon será difusa e fraca. Por exemplo, a molécula de sílica (SiO<sub>2</sub>), que constitui o quartzo, possui um potencial iônico muito elevado, em torno de 10, pois o silício tem uma carga alta (4+) e raio iônico pequeno (0,41Å). Isto resulta em uma estrutura atômica extremamente resistente, ou seja, possui alta resistência a deslocamentos no seu arcabouço atômico. Esta característica reflete nas propriedades do mineral formado por tal estrutura atômica, de modo que, se o quartzo é posto em contato com a água, não vai se dissolver, pois apresenta grande potencial iônico e estrutura muito resistente a deslocamentos (Mohriak, 2008a).

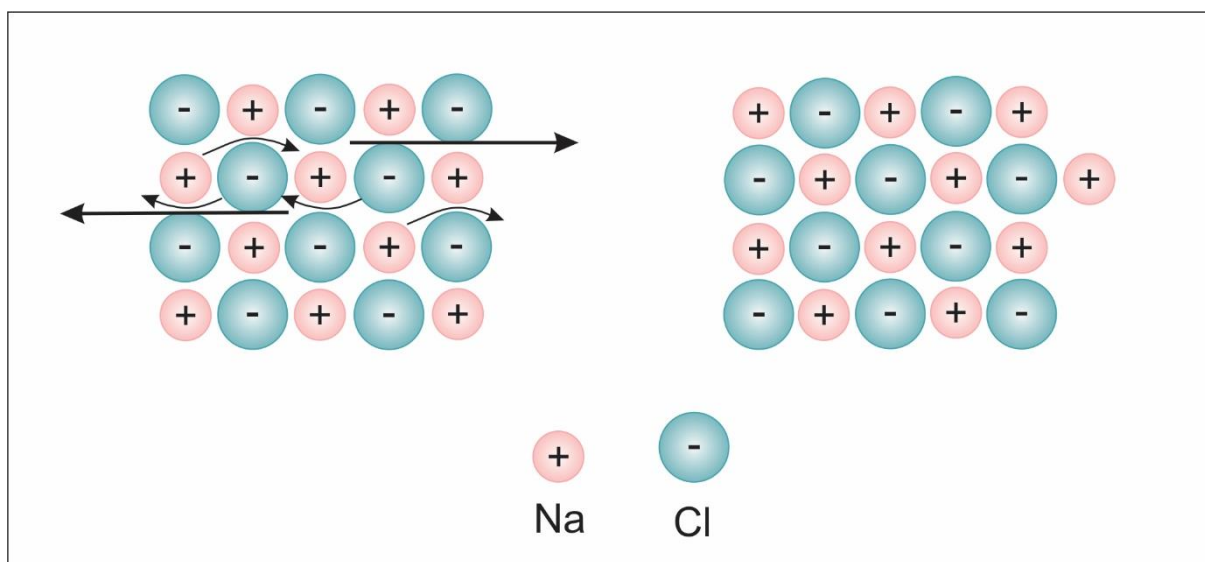
Porém, os íons mais comuns dos evaporitos (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>) possuem baixo potencial iônico, pois apresentam cargas pequenas e raio iônico muito grande, resultando em grande facilidade de dissolução em água e mobilidade elevada dos íons no reticulado cristalino (Tabela 5). Como a estrutura cristalina dos compostos evaporíticos geralmente tem relação 1:1, como no caso da halita (NaCl), um deslocamento linear de uma fileira de íons se contrapõe com os mesmos íons em outra posição, o que gera facilidade de deslocamento entre planos do cristal, tornando assim a halita um sal tão móvel e com características intermediárias entre líquido e sólido (Figura 8) (Mohriak, 2008a).

Tabela 5 - Valência e raio atômico dos principais elementos constituintes dos evaporitos.

Elemento	Valência	Raio Atômico (Å)
Na	1+	0.95
K	1+	1.33
Ca	2+	1.44
Mg	2+	0.86
Al	3+	0.53
Si	4+	0.41
Cl	1-	1.81
SO <sub>4</sub>	2-	2.95

Fonte: MOHRIAK, 2008a.

Figura 8 - Estrutura atômica da molécula de NaCl (halita) e os deslocamentos entre as camadas de íons.

Fonte: PRESS *et al.*, 2006; MOHRIAK, 2008a. Adaptada pela autora, 2016.

Outro fator químico importante que interfere na solubilidade dos evaporitos em solução aquosa é a lei do íon comum. O efeito do íon comum se caracteriza pela mudança nas taxas da reação química de precipitação de um determinado composto, quando se adiciona algum íon desse composto na solução. Dessa forma, a adição de um íon comum irá reduzir a solubilidade do primeiro composto, fazendo com que mais cristais se precipitem. Nesse caso, uma nuvem de pequenos cristais se precipita ao mesmo tempo, já que há grande competição para a deposição do soluto. Por exemplo, a presença de cristais grandes e bem formados de halita indica que havia apenas um composto com o íon cloreto na solução, com pouca competição para a precipitação e muito tempo para o completo desenvolvimento dos

cristais. Mas, se aumentar a quantidade de outro soluto com o mesmo íon na solução, aumentará a quantidade de cristais menores de halita. Portanto, havendo competição entre diversos solutos, haverá deposição de cristais pequenos e sem forma bem definida (Mohriak, 2008a).

A evaporação de bacias restritas resulta na concentração de sais e na formação de salmouras, a partir das quais precipitam-se diversos minerais evaporíticos, em que os principais destes e suas fórmulas químicas estão representados na Tabela 6 (Mohriak, 2008a).

Para que a precipitação de minerais evaporíticos ocorra é necessário que a taxa de evaporação seja superior a taxa de influxo de água na bacia (precipitação pluviométrica mais entrada de águas de rios e mares). Portanto, a saída de água da bacia deve suplantar a entrada. Para garantir estas condições, um ambiente desértico e o isolamento da bacia são essenciais (Mohriak, 2008a).

Tabela 6 - Principais minerais evaporíticos, suas composições químicas e seus valores típicos de raios gama.

<b>Mineral</b>	<b>Composição</b>	<b>Raios Gama (API)</b>
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	0
Magnesita	MgCO <sub>3</sub>	0
Dolomita	Ca(Fe, Mg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0
Trona	Na <sub>3</sub> H(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	0
Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0
Anidrita	CaSO <sub>4</sub>	0
Halita	NaCl	0
Kainita	KMg(SO <sub>4</sub> )Cl.3H <sub>2</sub> O	225
Kieserita	MgSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	0
Langbeinita	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	275
Silvita	KCl	500
Carnalita	KMgCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	200
Taquidrita	CaMg <sub>2</sub> .Cl <sub>6</sub> .12H <sub>2</sub> O	0
Bischofita	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0
Polihalita	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	180

Fonte: MOHRIAK, 2008a.

Em uma bacia evaporítica, ocorrem sucessões litológicas que indicam a variação de salinidade da salmoura ao longo do tempo geológico. Essas variações de salinidade ocorrem em função da aridez climática e do aporte de água na bacia,

dividindo a sucessão em intervalos ou ciclos evaporíticos correlacionáveis (Mohriak, 2008a).

Os ciclos evaporíticos de primeira ordem podem ser definidos pelo aumento da salinidade, iniciando-se no nível mais baixo e evoluindo até o mais elevado, e retornando novamente ao nível inicial, em função da variação do nível da salmoura na bacia evaporítica (Jenyon, 1986; Carvalho, 1987; Warren, 1989 *apud* Mohriak, 2008a). Geralmente, cada ciclo é marcado na base por camadas de folhelhos pretos, altamente orgânicos e favoráveis a geração de hidrocarbonetos, enquanto o topo da sequência pode ser marcado pela deposição de sais mais solúveis, como aqueles compostos por magnésio e potássio (Mohriak, 2008a) (Figura 9).

Os ciclos evaporíticos podem ser caracterizados também pela sequência de precipitação de seus minerais, que ocorre em função das suas diferentes solubilidades e da quantidade de cada composto disponível na salmoura (Richter-Bernburg, 1972; Hardie, 1984 *apud* Mohriak, 2008a).

Esta sequência típica de deposição de evaporitos é apresentada na Tabela 7 e é descrita a seguir:

**Carbonatos:** não são minerais evaporíticos, mas frequentemente antecedem a deposição destes, com minerais como calcita, aragonita e dolomita (Mohriak, 2008a).

**Sulfatos de cálcio:** geralmente há deposição de gipsita, com posterior transformação em anidrita, à medida que a água cristalina é perdida (ver composição química destes minerais na Tabela 6). Na transformação de gipsita em anidrita, com aumento de pressão e temperatura, cerca de 60% do volume da rocha é perdido e há compactação. No processo inverso, na transformação de anidrita em gipsita, há um aumento de 60% no volume de rocha, com formação de estrutura enterolítica (Mohriak, 2008a).

**Halita:** é o mineral evaporítico mais abundante e começa a se depositar quando sua concentração na salmoura atinge 27%. Devido ao seu baixo potencial iônico, possui alta mobilidade e capacidade de fluir (Mohriak, 2008a).

**Carnalita:** precipita-se somente em salmouras altamente concentradas. Pode-se transformar em silvita com a dissolução do cloreto de magnésio (Mohriak, 2008a).

**Bischofita:** precipita-se em níveis de salinidade extremamente elevados. Nas bacias da margem brasileira e africana é substituída por taquidrita (Mohriak, 2008a).

**Taquidrita:** é um mineral altamente solúvel e, como seu nome sugere, se hidrata rapidamente, de modo que quando exposto absorve a água do ar e dissolve. Para que haja deposição de taquidrita e não bischofita, é necessário que o sulfato em solução não seja suficiente para precipitar todo o cálcio. Isto pode ocorrer pela redução do sulfato de cálcio por bactérias, a exemplo do que ocorre no Mar Morto (Mohriak, 2008a).

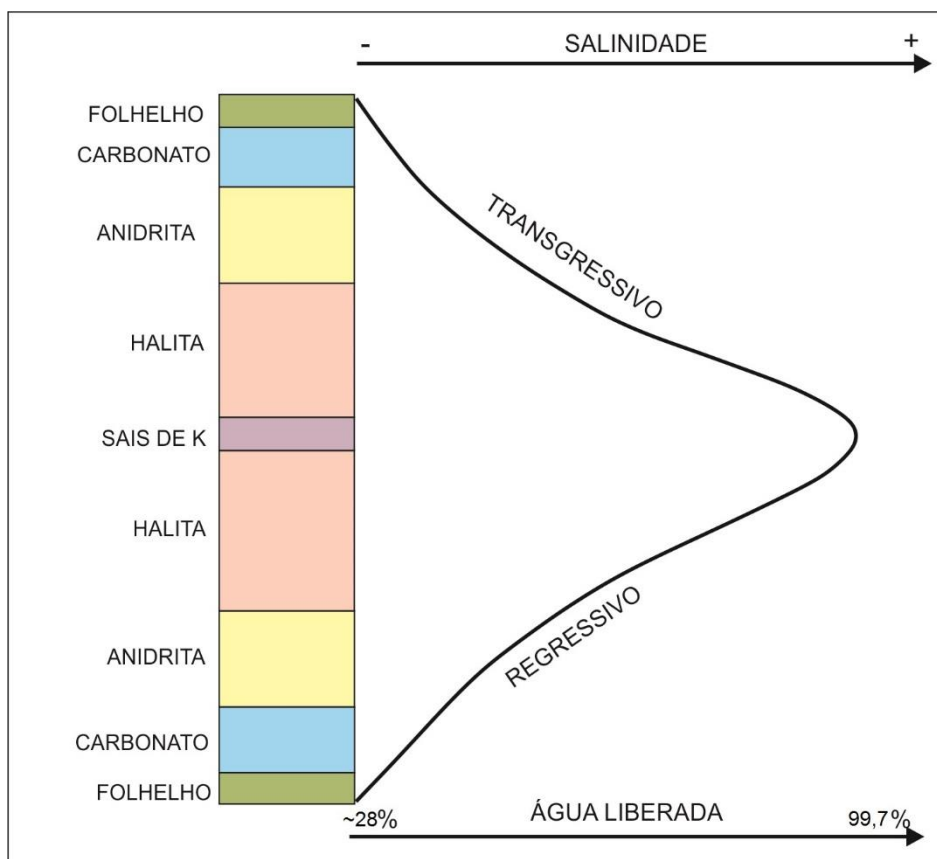
Dentre os evaporitos acima, os mais comuns são os sulfatos de cálcio, primeiros a se depositar, e em seguida, halita. Já os sais de potássio e magnésio são mais raros e os últimos a se depositar, com destaque para silvita e carnalita. Boratos são menos comuns e, geralmente, de origem não marinha (Mohriak, 2008a).

Tabela 7 - Sequência típica de deposição de minerais evaporíticos, de acordo com sua solubilidade.

Ordem de precipitação	Zona	Mineral primário formador da rocha	Minerais secundários e outros minerais associados (diagenéticos e epigenéticos)	% Evaporação da solução inicial
1	Gipsita-Anidrita	Gipsita	Anidrita	67,80%
2	Halita	Halita Gipsta	Anidrita Polihalita	87,90%
3	Sulfato de Magnésio	Epsomita Hexahidrita (sakita) Polihalita Halita	Kieserita Polihalita Bloedita	97,10%
4	Silvita	Silvita Hexahidrita (sakita) Epsomita Polihalita Halita	Kaianita Langbeinita Kieserita Polihalita Leonita (?)	97,54%
5	Carnalita	Carnalita Sulfato de Magnésio Kaianita Halita	Kieserita Langbeinita Kainita Anidrita	98,82%
6	Bischofita	Borato Eutônico Bischofita Sulfato de Magnésio Carnalita Halita Gipsita	Boracita Kieserita Anidrita	99,07%

Fonte: MOHRIAK, 2008a.

Figura 9 - Modelo esquemático de ciclo ideal de deposição de uma sequência evaporítica.



Fonte: FREITAS, 2006; HITE 1970.

### 6.2.2 Cristalinidade

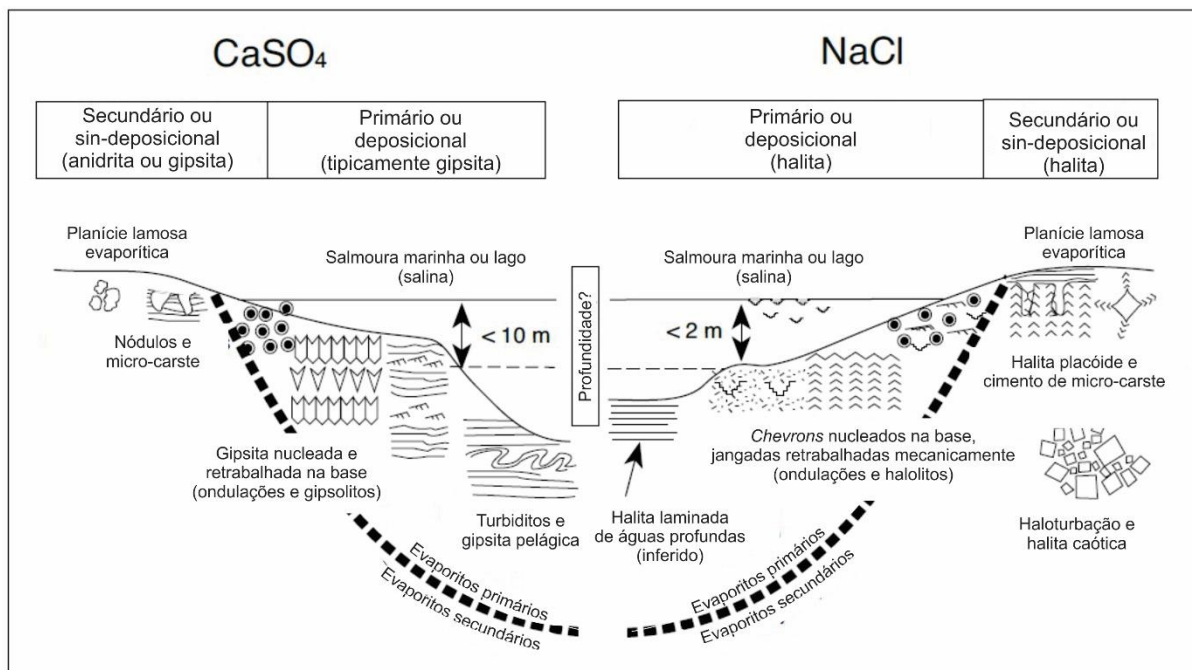
Segundo Sherman (1978 *apud* Mohriak, 2008a) a formação de cristais de sal na natureza ocorre principalmente sob três formas: (1) na interface ar-água, (2) na interface água-sedimento e (3) no interior dos sedimentos. Nestas três formas de cristalização de sais, diversas estruturas e texturas podem ser formadas, como mostra a Figura 10.

A formação de cristais na interface ar-água se dá em consequência da evaporação e aumento da salinidade, de modo que os cristais de halita formados nesta posição apresentam uma estrutura típica conhecida como *hopper* (Figura 11). Esta estrutura é caracterizada por uma depressão da superfície superior do cristal, que possui forma cúbica (Shearman, 1978 *apud* Mohriak, 2008a). Este tipo de cristal se assemelha a jangadas e se mantém flutuando na superfície da água, devido à



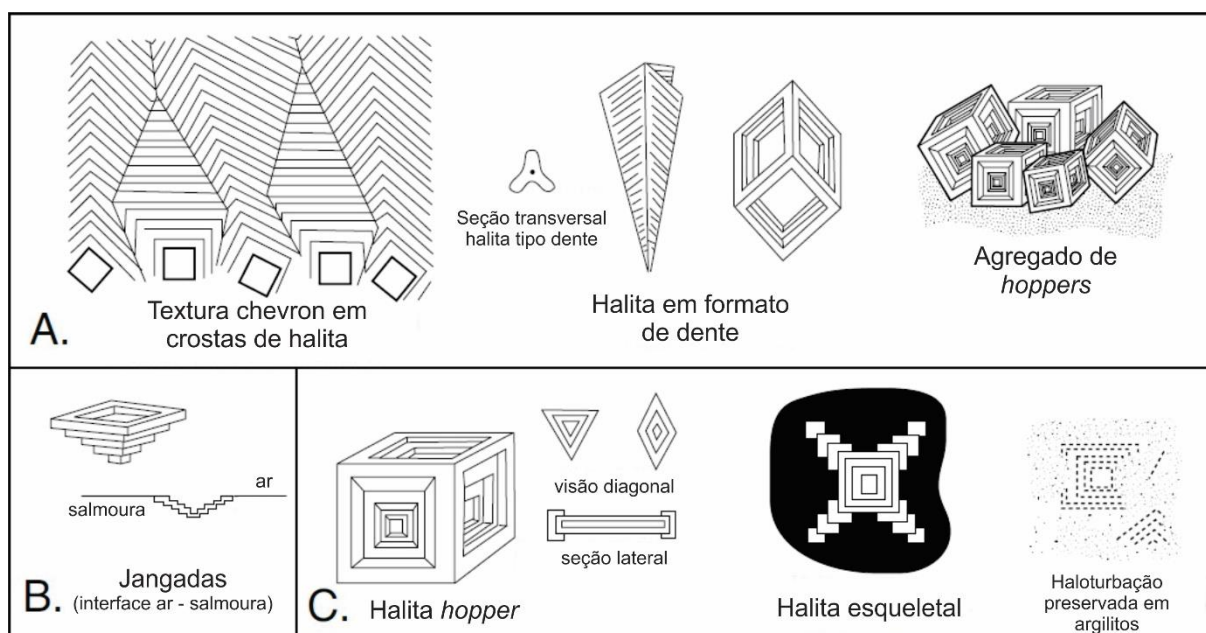
tensão superficial, mas posteriormente decanta para o fundo da bacia, por conta do próprio peso ou da turbulência da água. Este tipo de cristal é muito comum e ocorre geralmente em águas tranquilas e sem grande interferência de ventos.

Figura 10 - Tipos de cristalização primária e secundária de halita e gipsita.



Fonte: WARREN, 2006. Adaptada pela autora, 2016.

Figura 11 - Estrutura hopper, típica de cristais de halita.



Fonte: WARREN, 2006. Adaptada pela autora, 2016.

Em águas sob forte influência de ventos, os cristais de halita são precipitados com forma de triângulo invertido, com a base voltada para cima e o vértice para baixo. Neste processo, os novos cristais geralmente aproveitam outros como base para crescimento e a competição por espaço faz surgir novas faces que formam uma morfologia conhecida como esquelética (Figura 11) (Mohriak, 2008a).

Na interface água-sedimento a formação de cristais de evaporitos se deve à movimentação de salmouras mais densas, que se deslocam para o fundo da bacia. Ao longo deste movimento descendente, a salmoura resfria e se cristaliza, exibindo estruturas específicas que variam de acordo com a distância percorrida pela salmoura e com a profundidade da bacia (Silva & Santos, 1997; Silva *et al.*, 2000 *apud* Mohriak, 2008a).

A formação de evaporitos no interior dos sedimentos é comum em planícies costeiras conhecidas como *sabkhas*, onde precipitam nódulos nos espaços porosos destes. Os cristais recém-formados tendem a perturbar a estrutura dos sedimentos que os hospedam e se tornam elementos secundários (Mohriak, 2008a).

A morfologia dos cristais de halita pode indicar o nível de saturação da salmoura, de modo que em condições de baixa saturação os cristais são uniformes e possuem formar cúbicas perfeitas e transparentes. Por outro lado, se a saturação de cloretos é elevada, predominará halita do tipo *hopper* e com muitas inclusões fluidas (Szatmari *et al.* 1974; Shearman, 1978; Warren, 1989 *apud* Mohriak, 2008a).

Outras maneiras de cristalização de evaporitos são em vazios intersticiais de rochas ou cavidades de dissolução, preenchimento de fraturas e eflorescências salinas (crostas em superfícies lamosas de lagos salgados). As eflorescências mais comuns apresentam halita e gipsita, porém também ocorrem crostas carbonáticas, de boratos ou nitratos. Devido à alta solubilidade, as eflorescências salinas raramente são preservadas tanto em ambientes atuais, como pretéritos (Mohriak, 2008a).

### 6.2.3 Densidade

A densidade varia para cada mineral evaporítico e está relacionada à composição química de cada um destes (Tabela 8), mas também é influenciada pela mistura com outros sedimentos (impurezas). Estas diferenças de densidade entre os

diversos minerais evaporíticos são importantes, pois contribuem para a diferenciação entre estes em perfis elétricos de poços.

Tabela 8 - Densidade típica e composição química de alguns dos principais minerais evaporíticos.

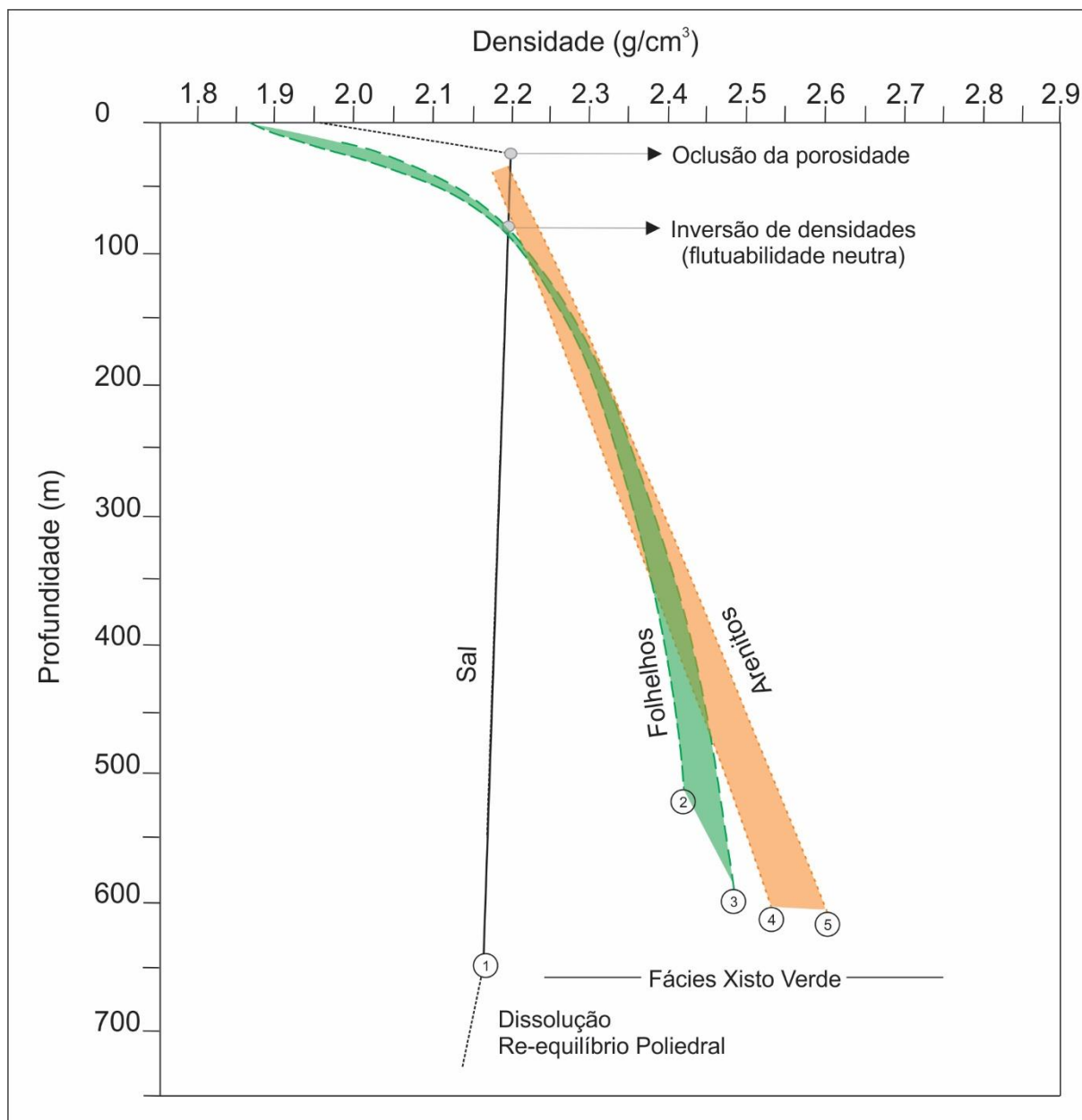
<b>Mineral</b>	<b>Composição</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	2.30 - 2.33
Anidrita	CaSO <sub>4</sub>	2.82 - 2.93
Halita	NaCl	2.10 - 2.20
Silvita	KCl	1.90 - 2.00
Carnalita	KMgCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	1.60 - 1.70

Fonte: MOHRIAK, 2008a. Adaptada pela autora, 2016.

A evolução da densidade do sal com a profundidade de soterramento difere dos outros sedimentos, pois esta se mantém praticamente constante, enquanto nos demais há um aumento devido à compactação (Figura 12). Por exemplo, a halita perde sua porosidade efetiva até 100 – 200 m e a partir desta profundidade mantém sua densidade de 2,2 g/cm<sup>3</sup>, sem sofrer compactação, até cerca de 6 a 8 km, onde se inicia a zona xisto verde de metamorfismo. Por outro lado, folhelhos, arenitos e carbonatos, sofrem perda de porosidade constante com o soterramento (sofrem compactação) e por conta disso, a densidade destas rochas aumenta com a profundidade (Warren, 2006).

No momento da deposição o sal tem densidade maior que os demais sedimentos, mas devido ao fato de não se compactar, há uma inversão de densidades em torno de 1200 – 1300 m, onde a densidade deste passa a ser menor do que rochas sedimentares como arenito e folhelho. Isto implica que, quando soterrado a mais de 1 km de profundidade o sal apresenta uma flutuabilidade positiva em relação às rochas circundantes e este ponto onde ocorre a inversão é conhecido como ponto de flutuabilidade neutra (Warren, 2006).

Figura 12 - Variação da densidade em relação à profundidade para sal, folhelho e arenito em rochas do Golfo do México, Estados Unidos.



Legenda: (1) Curva de densidade para rocha salina, com predominância de halita e pequena porcentagem de anidrita submetida a gradiente geotérmico de 30°C/Km. Nestas condições o sal se expande pelo calor, mais do que comprime pela pressão confinante, por isso há uma pequena diminuição na densidade (Clark, 1966 e Gussow, 1968). (2) Curva de densidade para folhelho preenchido por salmoura (Gardner *et al.* 1974). (3) Curva de densidade para folhelho terciário preenchido por salmoura (Dickinson, 1953). (4) e (5) Curvas de densidade para arenitos do Terciário inferior, baseadas em 4393 amostras de arenitos preenchidos por salmoura e sem matriz e 3171 amostras de arenitos com matriz foram calculadas a partir de dados de porosidade de Loucks *et al.* (1979) pela equação 1 de Chapman (1974), assumindo densidade do grão de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e da matriz de 1,07 g/cm<sup>3</sup>.

Fonte: JACKSON; TALBOT, 1986 e WARREN, 2006. Adaptada pela autora, 2016

### 6.2.4 Viscosidade

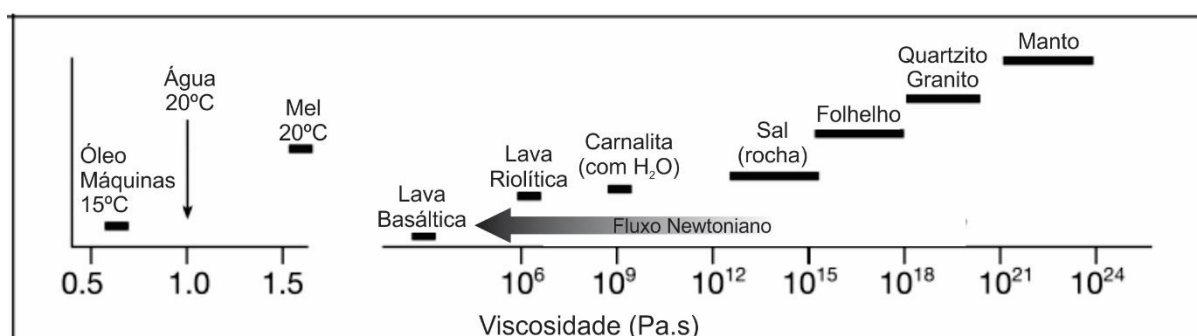
Viscosidade é a resistência interna de um material ao fluxo e é medida pela razão entre tensão cisalhante e taxa de deformação (Warren, 2006). A equação abaixo, criada por Newton descreve a viscosidade, onde  $\tau$  é a tensão cisalhante,  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade e  $\frac{dv}{dy}$  é a variação de velocidade no fluido em sua direção mais rápida. De acordo com esta equação, quanto maior a viscosidade de um fluido, menor será a velocidade com que este se movimentará.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

Todos os materiais que atendem aos critérios da equação acima, assim como água e alguns gases são conhecidos como fluidos newtonianos. Já os que não seguem as leis da viscosidade newtoniana possuem comportamento mais complexo e não linear (Corrêa, 2009).

Dentre os materiais presentes na crosta terrestre, há uma grande variação de viscosidade e o sal é bem menos viscoso que outras rochas (Figura 13), de modo que seu comportamento é plástico e pode ser considerado quase como um fluido quando submetido a esforços ao longo do tempo geológico (Mohriak, 2008a). É importante ressaltar que na figura abaixo são comparados materiais em diferentes temperaturas e que o sal tem capacidade de fluir mesmo a baixas temperaturas.

Figura 13 - Viscosidade do sal comparada com outros materiais.



Fonte: WARREN, 2006. Adaptada pela autora, 2016.

Sedimentos sofrem deformação principalmente por conta da carga sedimentar sobreposta, de modo que o sal começa a se deformar após aplicação de um esforço crítico, em torno de 100 a 150 bars (equivalente a uma lâmina de água de 1000 m), dependendo de sua composição. Então, em uma camada de 500 m de sal, que possui densidade duas vezes maior que a água, a pressão pode atingir 107 bars e o sal começaria a fluir.

#### 6.2.5 Resistência a esforços distensionais e compressionais

Em comparação com outras rochas, o sal possui comportamento fluido, sendo plástico e dúctil sob tensões acima de 100 bars. Porém, abaixo dessa tensão costuma ser rúptil, inclusive podendo ser rompido por falhas. Outro fator que influencia na plasticidade do sal é taxa de deformação, de modo que submetido a temperatura e pressão ambientes o sal se comporta de maneira tão rígida quanto um concreto, mas se torna plástico ao longo do tempo geológico, à medida que é submetido a diferentes taxas de deformação (Mohriak, 2008a).

#### 6.2.6 Condutividade térmica

A condutividade térmica do sal também é uma de suas características físico-químicas que o torna uma rocha peculiar, pois é cerca de três vezes maior do que em outras rochas sedimentares. Deste modo, corpos de sal são bons condutos de calor e podem afetar a temperatura das rochas adjacentes. Geralmente, a variação de temperatura de um diápiro de sal é positiva no topo e negativa na base (Mohriak, 2008a). No caso do pré-sal nas bacias brasileiras, a alta condutividade térmica do sal permitiu a preservação dos hidrocarbonetos trapeados abaixo deste.

#### 6.2.7 Velocidade sísmica

Na halita, a onda sísmica compressional primária ( $V_p$ ) possui velocidade de cerca de 4500 m/s (15000 pés/s), de forma que o contraste de impedância acústica com as rochas encaixantes pode ser grande, pois, por exemplo, a velocidade de folhelhos costuma ser abaixo de 3000 m/s. No caso da anidrita, a velocidade

sísmicas pode chegar a 6500 m/s. O tempo de trânsito medido por perfis sônicos em halita é em torno de 221  $\mu\text{s}/\text{m}$  (67  $\mu\text{s}/\text{pé}$ ) (Mohriak, 2008a).

## 7. AMBIENTES DE SEDIMENTAÇÃO DE EVAPORITOS

### 7.1 Características gerais e taxa de sedimentação

No que diz respeito à formação e preservação de evaporitos, são necessárias algumas condições essenciais: (1) a taxa de evaporação deve ser maior do que a soma da taxa de precipitação pluviométrica e do influxo de água, ou seja, existência de um ambiente desértico ou árido; (2) isolamento da bacia, para permitir a progressiva concentração e deposição de sais (Mohriak, 2008b); (3) espaço de acomodação em uma bacia sedimentar e (4) um ambiente de soterramento que não permita circulação de soluções subsaturadas suficientemente para dissolver o sal (Warren, 2006).

Uma vez existindo as condições essenciais para formação de evaporitos, observa-se que estes se depositam sob uma taxa bastante elevada em comparação com outros tipos de sedimentos (Tabela 9). Por exemplo, no Mar mediterrâneo foi depositada, no Mioceno, uma sequência evaporítica de no mínimo 1 km de espessura em menos de 200.000 anos (Schreiber, 1986). Na Bacia de Paradox, Estado Unidos, Hite & Buckner (1981) estimaram uma taxa de deposição de 40 m de halita em 1.000 anos. Já os estudos de Logan (1987) mostraram valores mais realistas, com taxas de deposição de halita entre 3 e 20 m por 1.000 anos, com média de 8 m e taxas de deposição de gipsita entre 0,6 e 3 m por 1.000 anos.

Tabela 9 – Taxas de sedimentação de diferentes tipos de sedimentos

<b>Tipo de sedimento</b>	<b>Taxa de sedimentação típica</b>
Pelitos de mar profundo	0,1 cm /mil anos
Carbonato e lama de plataforma	1 a 3 cm /mil anos
Clásticos de talude	4 cm /mil anos
Turbiditos de mar profundo	10 a 100 cm /mil anos
Gipsita sub-aquosa	10 a 40 m /mil anos
Halita sub-aquosa	10 a 100m /mil anos

Fonte: WARREN, 1989. Adaptada pela autora, 2016.

A rapidez com que os evaporitos se depositam, principalmente quando se trata das grandes bacias evaporíticas pretéritas (e.g. Atlântico Sul, Mar do Norte e Mar



Mediterrâneo), faz com que este corresponda temporalmente quase que a um evento vulcânico na história da bacia (Mohriak, 2008b).

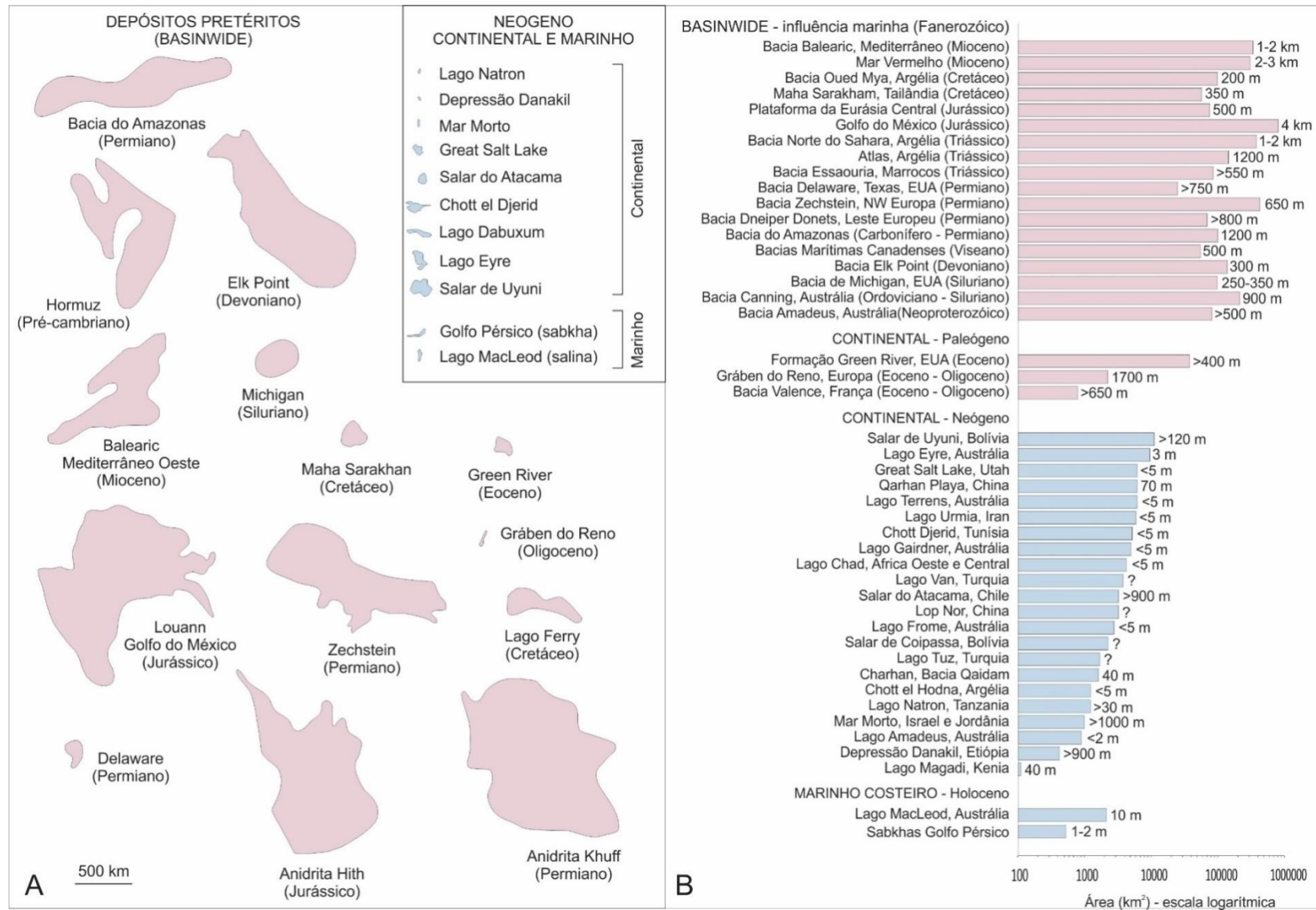
No entanto, os depósitos evaporíticos modernos se mostram bem menores e menos espessos em relação aos depósitos antigos (Figura 14) e, quando tentamos procurar um análogo quaternário para estes, as opções se mostram bastante limitadas. Duas razões podem explicar esta discrepância: (1) vivenciamos atualmente um período de “*icehouse*” caracterizado por mudanças no nível médio do mar de alta frequência e amplitude, influenciadas pelo clima, de modo que contextos marinhos só podem formar lagunas costeiras e “*mudflats*” de pequena escala com limitado potencial de preservação; (2) não há áreas consideravelmente grandes na superfície terrestre atualmente em que a combinação tectônica e clima tenha permitido isolar hidrograficamente e dissecar toda uma bacia oceânica, tornando esta deixando esta abaixo do nível do mar e alimentada por infiltrações marinhas (Warren, 2006).

Diante destes fatos, alguns modelos geodinâmicos que expliquem o ambiente tectono-sedimentar controlador da deposição de evaporitos tanto em bacias pretéritas, quanto em modernas, foram propostos por diversos autores, como segue adiante.

Os estudos sobre evaporitos tiveram início ao longo do século XIX, devido a avanços do conhecimento em química, sendo o principal representante desse período e pioneiro nos estudos sobre evaporitos, o químico e geólogo Ochsenius (Mohriak, 2008b).

Atualmente os modelos de deposição de evaporitos mais aceitos para bacias de grandes dimensões do passado geológico admitem sua formação em bacias sedimentares isoladas por barreiras naturais, que impediriam a livre circulação das salmouras, apesar de alguns modelos relacionados a processos magmáticos também terem sido reportados na literatura (Mohriak, 2008b). Conforme será detalhado adiante, os principais autores proponentes do modelo de bacias isoladas por barreiras são Schmalz (1969), Hsü (1972), Baar (1977), Taylor (1985), Warren (1989) e Kendall (1992).

Figura 14 – Distribuição de depósitos evaporíticos modernos e antigos.



Legenda: (A) Comparação da extensão em área de evaporitos antigos e modernos (em parte depois de James & Kendall, 1992; Warren, 1999). (B) Comparação entre área e espessura de evaporitos antigos e modernos (depois de Herdendorf, 1984; Hardie, 1990; Warren, 1999). Fonte: WARREN, 2006. Adaptada pela autora, 2016.

Ainda em relação a bacias evaporíticas pretéritas, existem também outros modelos que contemplam os demais depósitos, que não apresentam tamanha ordem de grandeza, sendo estes evaporitos de plataforma e evaporitos lacustres (*playa* continental) (Warren, 2006). Entre os autores que publicaram modelos de deposição para evaporitos lacustres, os que mais se destacam são Bohacs *et al.* (2000). Dentre os modelos de evaporitos de plataforma podem ser citados Purser & Evans (1973) com um modelo sobre a Costa Trucial no Golfo Pérsico.

Quanto aos depósitos quaternários, os modelos mais importantes são os que envolvem corpos aquosos efêmeros, podendo ser do tipo *sabkha* ou lagos salinos efêmeros (*ephemeral saline pans* e *playa*) e corpos aquosos perenes, do tipo salinas e lagos salinos perenes (*perennial saline pans*).

Dentre os depósitos em meios aquosos efêmeros, os autores pioneiros na proposição dos modelos sedimentológicos para *sabkhas* foram Curtis *et al.* (1963) para o Golfo Pérsico, Phleger (1969) e Shearman (1970) para a costa da Baja Califórnia no México e Gavish (1974) e Levy (1977 a, b) para a costa do Sinai. Já os modelos de *playa* foram propostos pioneiramente, para diversos locais no mundo, por Moiola & Glover (1965) e Surdam & Wolfbauer (1975).

Para os depósitos em meios aquosos perenes, os principais autores que propuseram modelos de deposição baseados em várias ocorrências no mundo, incluindo Baja Califórnia no México, Mediterrâneo, sul e oeste da Austrália e Oriente Médio são Von der Haar & Gorsline (1977), Aharon *et al.* (1977), Schreiber & Kinsman (1975), Von der Borch *et al.* 1977 e Arakel (1980).

## **7.2 Modelos de deposição para bacias evaporíticas pretéritas**

### **7.2.1 Bacia com barreira em uma das entradas “*basinwide deposits*”**

Trata-se de um modelo no qual a bacia evaporítica possui uma barreira restritiva em uma das entradas de modo a impedir a livre circulação de águas com o mar aberto. Há três tipos de bacias que podem ser incluídas neste modelo (Figura 15): (1) bacia profunda com água profunda, (2) bacia rasa com água rasa e (3) bacia profunda com água rasa (Mohriak, 2008b).

Segundo o modelo de bacia profunda com água profunda (Figura 15A), os evaporitos se formam na interface água-ar e depositam-se no fundo da bacia, o que justificaria as grandes espessuras de evaporitos encontradas nas bacias da margem atlântica, por exemplo. No entanto, este é um modelo muito contestado, já que evaporitos atuais estão sempre associados com ambiente subaéreo ou marinho raso, por vezes apresentando estruturas que indicam exposição subaérea (Mohriak, 2008b).

Já o modelo de bacia rasa com água rasa (Figura 15B) não apresenta os questionamentos sedimentológicos apresentados acima, porém não explica a formação de espessas sequências evaporíticas em tão reduzidos espaços de acomodação. Não é razoável admitir que a subsidência destas bacias seria tão elevada a ponto de acumular enorme espessura de sedimentos em apenas alguns milhares de anos (Mohriak, 2008b).

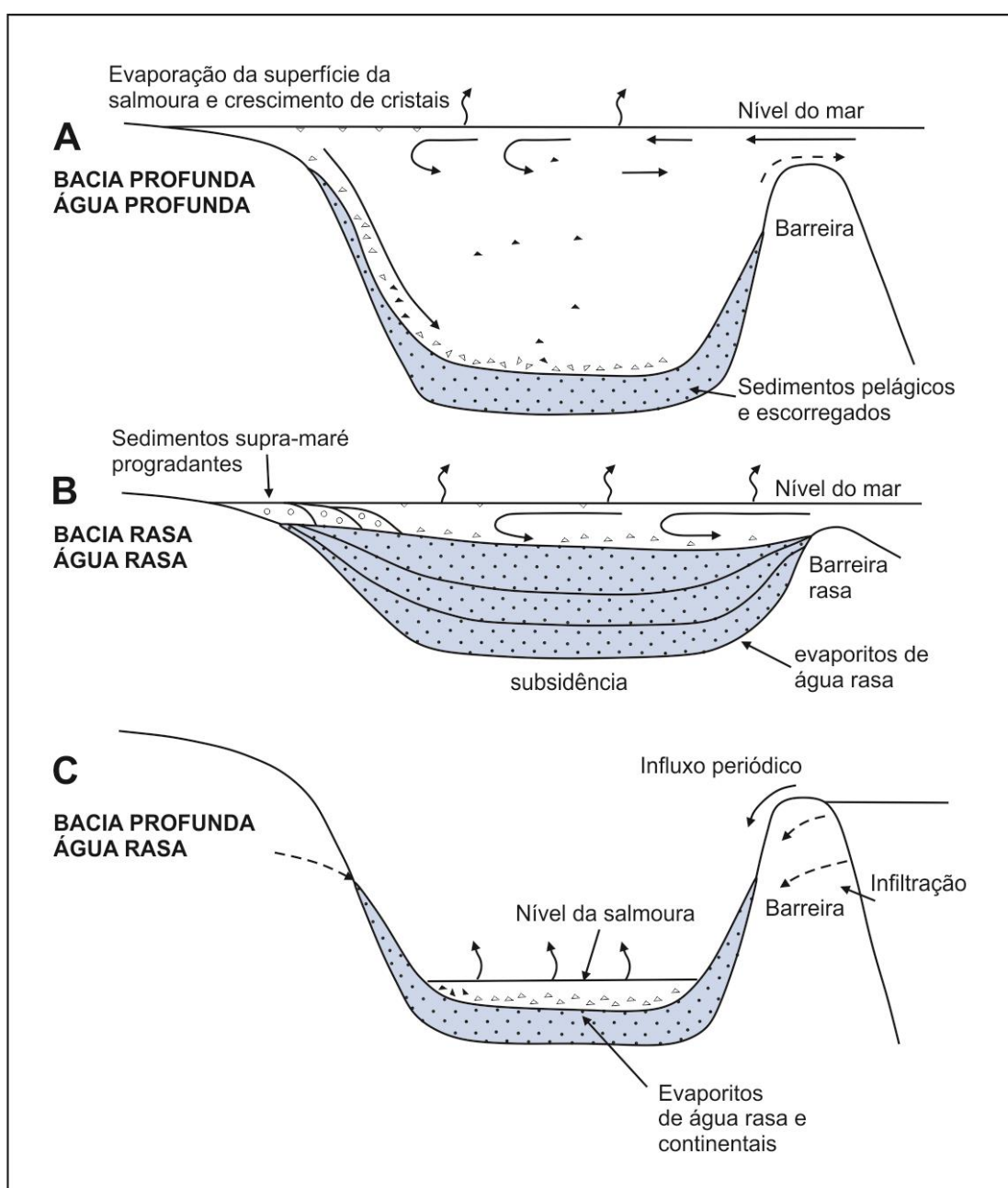
Por fim, o modelo de bacia profunda com água rasa (Figura 15C), baseado no modelo de dissecação do Mar Mediterrâneo proposto por Hsü (1972), sugere que a bacia evaporítica estaria, inicialmente, abaixo do nível médio dos mares, separada do oceano global por uma barreira e sob clima árido. Esta configuração resultaria em ausência de aporte de águas do mar, rios ou chuvas, levando a bacia a um ressecamento quase completo, culminando com a precipitação de sais solúveis em áreas restritas. Com a subida do nível do mar ultrapassando a barreira em uma das entradas da bacia, iniciaria novo ciclo de transgressão marinha e evaporação da salmoura, com dissolução de parte dos sais depositados anteriormente e precipitação de novas sequências evaporíticas. Este modelo também assume que a barreira pode ser parcialmente permeável, de modo que permita o influxo e o refluxo parcial da salmoura por meio dos poros e fraturas das rochas. Nesse caso a comunicação da bacia com o oceano independe da subida do nível do mar (Mohriak, 2008b).

O modelo de deposição evaporítica em bacia com barreira em uma das entradas apresenta dois padrões típicos de distribuição de fácies: padrão de “olho de touro” (livre tradução do termo original *bull's eye pattern*) e padrão “gota de lágrima” (livre tradução do termo original *tear drop pattern*) (Mohriak, 2008b).

O padrão “olho de touro” representa uma deposição concêntrica dos evaporitos obedecendo à sequência de deposição dos minerais menos solúveis para os mais

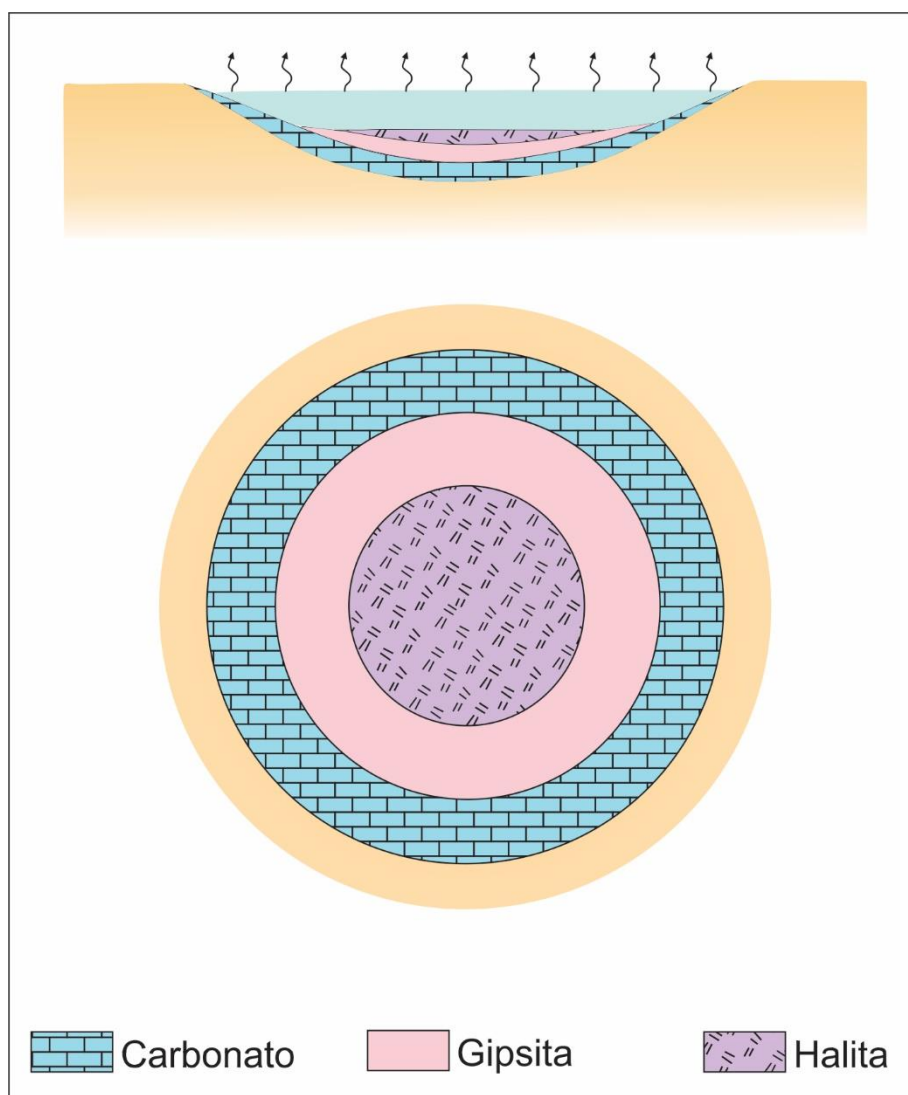
solúveis, pressupondo evaporação de certa quantidade de água, sem aporte adicional durante o processo de evaporação, até a completa dessecação da bacia e é típica de bacias completamente fechadas (Figura 16). Neste padrão as fácies sedimentares exibem um zoneamento associado às distintas fases de evaporação da salmoura, refletindo o nível de aridez e a presença de íons, de modo que os sais menos solúveis se depositam nas bordas da bacia e os mais solúveis nas partes mais centrais (Hsü, 1972; Mohriak, 2008b).

Figura 15 - Modelos de bacia evaporítica com barreiras.



Fonte: TAYLOR, 1985; MOHRIAK, 2008b. Adaptada pela autora, 2016.

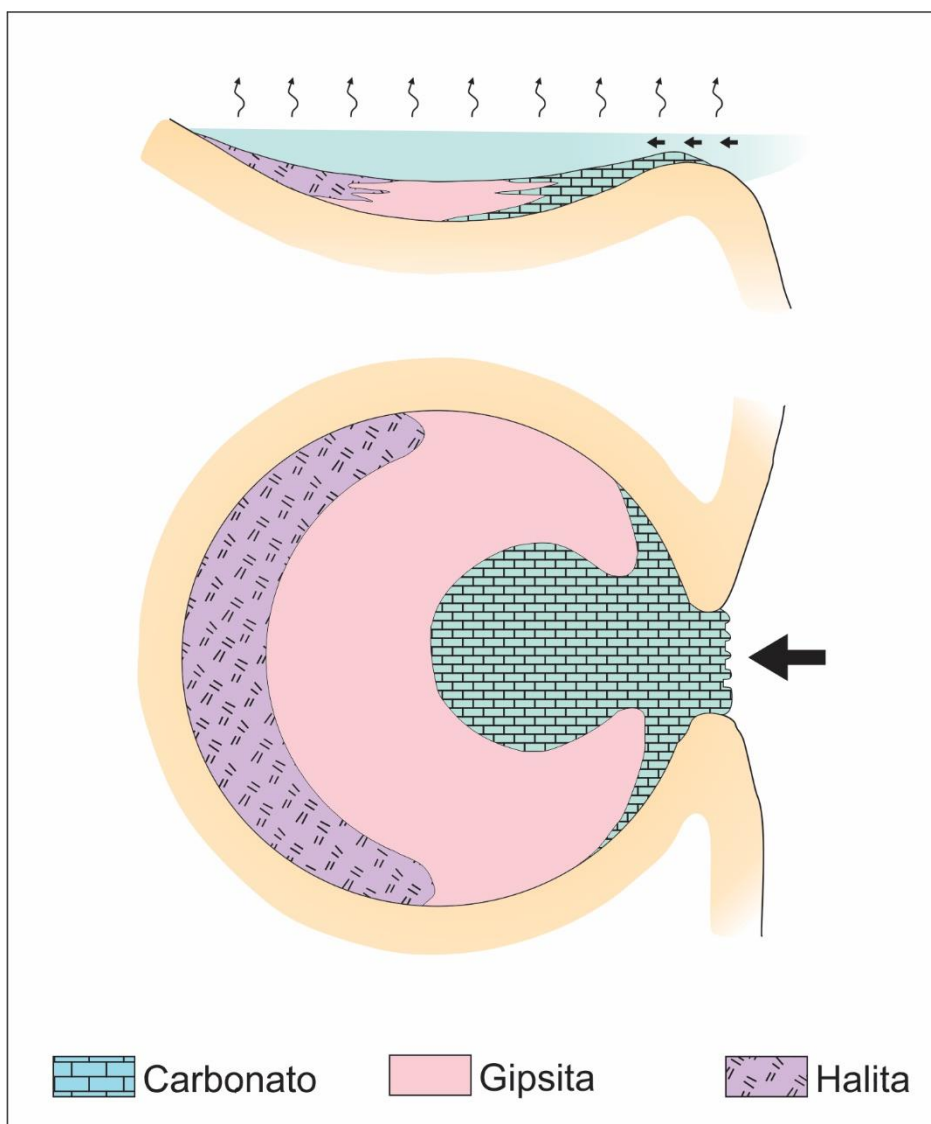
Figura 16 – Modelo idealizado do padrão de distribuição de fácies “olho de touro” (termo original: *bull's eye pattern*), típico de bacias completamente fechadas (depois de Schmalz, 1970).



Nota: Este padrão exibe um zoneamento salino, onde o sal mais solúvel se deposita no centro da bacia. (A) Visão do modelo em corte transversal. (B) Visão do modelo em planta.  
 Fonte: HSÜ, 1972. Adaptada pela autora, 2016.

O padrão “gota de lágrima” é típico de bacias restritas com um canal de entrada de água salgada que alimenta a bacia. A distribuição de fácies se dá de maneira mais assimétrica, com os sais solúveis localizados na porção mais distal da bacia e os menos solúveis mais próximos do canal de entrada (Figura 17). Neste caso, o influxo de água repõe continuamente perdas efetivas por evaporação (Hsü, 1972; Mohriak, 2008b).

Figura 17 – Modelo idealizado do padrão de distribuição de fácies “gota de lágrima” (termo original: *tear-drop pattern*), típico de bacias restritas (depois de Schmalz, 1970).



Nota: Este padrão exibe um zoneamento, no qual os sais mais solúveis se depositam através das salmouras mais concentradas, nas porções mais afastadas da entrada da bacia.

Fonte: HSÜ, 1972. Adaptada pela autora, 2016.

Dentre os modelos de bacia evaporítica com barreira em uma das entradas, também se destaca o modelo de Schmalz (1969), que assume deposição de evaporitos em águas profundas, sugerindo que grandes espessuras como as encontradas no Mar Vermelho necessitam de um grande espaço deposicional.

Ainda no contexto de bacias com barreiras na entrada, pode ser citado o modelo de bacia com múltiplos estágios de evaporação (Warren, 1989), que representa um conjunto de bacias interconectadas por várias barreiras, tendo precipitação fracionada ao longo do trajeto da salmoura com concentração

progressiva, de modo que os sais mais solúveis seriam depositados nas bacias mais afastadas da ligação com o oceano (Mohriak, 2008b).

Outro fator muito importante a se considerar ao interpretar bacias evaporíticas pretéritas de grande porte (*basinwide basins*) é o regime tectônico ao qual estas estavam associadas à época de deposição dos evaporitos. Ao longo da história das grandes bacias evaporíticas houve deposição em três contextos tectônicos: (1) divergente com processo de rifteamento, (2) convergente com colisão de placas e (3) áreas de “*sag*” intraplacas ou intracontinentais geralmente refletindo *stress* na borda da placa, como por exemplo bacias do tipo *foreland* (Warren, 2006).

### 7.2.2 Plataformas Evaporíticas

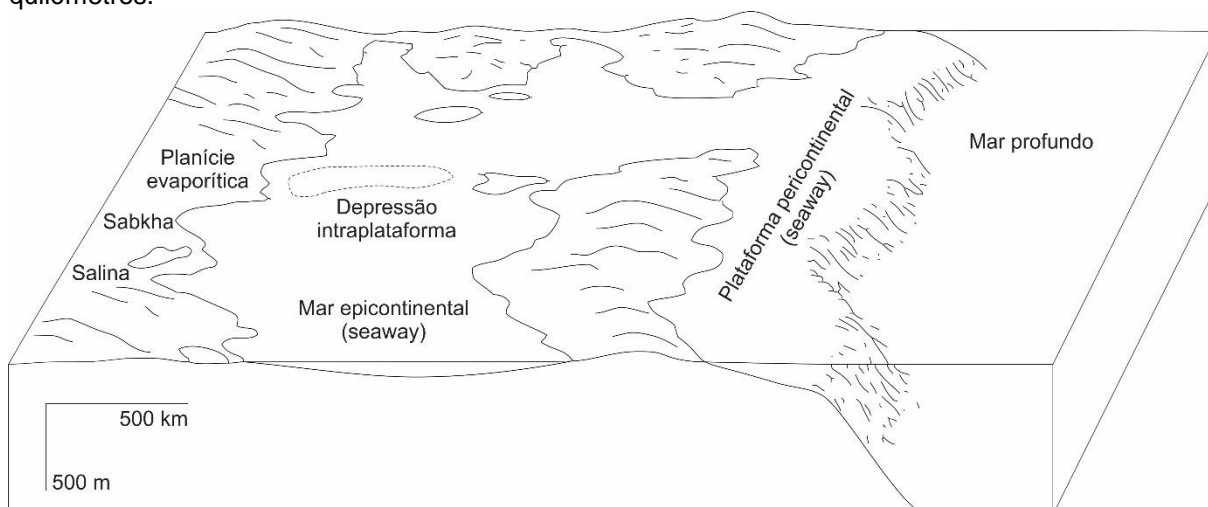
Evaporitos plataformais são acumulados em contextos de mares epicontinentais e pericontinentais e constituem camadas de sal em ciclos empilhados de plataformas marinhas rasas, com intercalação de carbonatos marinhos rasos e siliciclásticos continentais (Warren, 2006).

Mares epicontinentais são mares interiores e plataformas enormes e muito rasos, com até milhares de quilômetros de extensão e apenas dezenas de metros de profundidade (Figura 18), ainda muito mais rasos durante as fases de isolamento hidrográfico com deposição de sal (Warren, 2006).

Quando um mar epicontinental é desconectado do oceano aberto, ocorre a deposição de evaporitos em amplas planícies (*mudflats*) cercadas por desertos de dunas e planícies de *wadi* ou então, sob lenta circulação de lençóis perenes de salmoura marinha que cobrem as partes mais baixas da bacia, especialmente próximo da cunha salina marinha. A superfície da água pode se tornar suficientemente salina para precipitar e acumular camadas de sal com espessuras maiores que 5 a 10 metros. Terraços carbonáticos ou planícies de areia tipicamente separam a salmoura do oceano aberto (Warren, 2006).



Figura 18 – Mares epicontinentais (*seaways*), cobrindo grandes áreas no interior dos continentes com águas marinhas rasas e plataformas pericontinentais, que formam amplas bordas continentais de inclinação suave. Caracterizados por águas muito rasas e áreas de centenas a milhares de quilômetros.

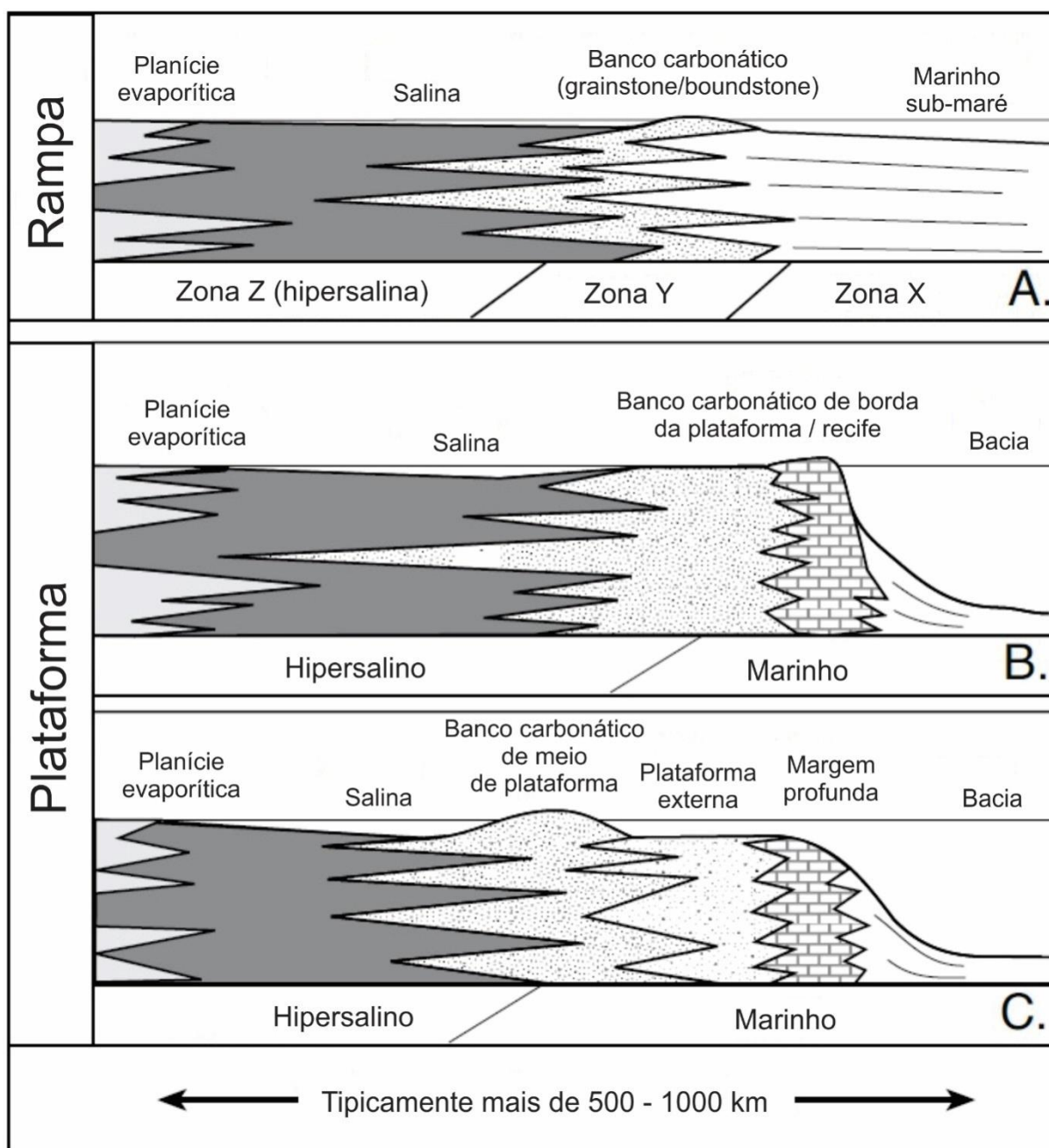


Nota: Não há análogos modernos para estes mares e plataformas, mas são feições bastante comuns durante os períodos de *green house*. Com o isolamento hidrográfico, estes mares e plataformas podem se tornar bacias evaporíticas (depois de Heckel, 1974).

Fonte: WARREN, 2006. Adaptada pela autora, 2016.

A deposição evaporítica nesse contexto geralmente apresenta duas configurações: plataforma ou rampa, sendo que a plataforma pode ser dividida em zonas hipersalina e marinha, e a rampa, em zonas X, Y e Z (Figura 19). A zona X é uma região ampla, de baixa energia situada abaixo do nível de base na plataforma de mar aberto e os sedimentos geralmente são *mudstones* e *wackestones* marinhos bioturbados. Também pode ocorrer a deposição de sedimentos ricos em matéria orgânica. Já a zona Y é estreita e posiciona-se na região intermediária, desde o banco carbonático de alta energia onde as primeiras ondas tocam o substrato até o limite de ação de marés em direção ao continente. Os sedimentos característicos incluem areia, *grainstones* e recifes. Estes sedimentos podem formar bancos alongados que em alguns momentos podem restringir a entrada de água marinha. A zona Z é extremamente rasa, restrita à zona de baixa energia, adjacente à zona Y em direção ao continente. Em climas áridos, se a zona Z for isolada da zona X, extensos evaporitos podem ser depositados.

Figura 19 – Estilos deposicionais de evaporitos em rampas e plataformas.



Legenda: (A) Rampa com inclinação suave, com restrição causada pela exposição de bancos de alta energia da zona Y. (B) Plataforma protegida com restrição causada pela exposição de recifes ou bancos carbonáticos que definem a margem da plataforma. (C) Plataforma protegida, com margem profunda e restrição causada pela exposição de bancos do centro da plataforma.

Fonte: WARREN, 1999. Adaptada pela autora, 2016.