**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**GEOLOGIA DOS EVAPORITOS PARIPUEIRA
NA SUB-BACIA DE MACEIÓ, ALAGOAS,
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Cláudio Pires Florencio

Orientador: Prof. Dr. Evaristo Ribeiro Filho

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

**SÃO PAULO
2001**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOLOGIA DOS EVAPORITOS PARIPUEIRA NA
SUB-BACIA DE MACEIÓ, ALAGOAS, REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL**

CLÁUDIO PIRES FLORÊNCIO

Orientador: Prof. Dr. Evaristo Ribeiro Filho

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Evaristo Ribeiro Filho
Examinadores:	Prof. Dr. Claudio Riccomini
	Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho
	Prof. Dr. Jorge Alberto Trigüis
	Prof ^a . Dr ^a . Luzia Koike

SÃO PAULO
2001

NÃO CIRCULA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOLOGIA DOS EVAPORITOS PARIPUEIRA
NA SUB-BACIA DE MACEIÓ, ALAGOAS,
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

DEDALUS - Acervo - IGC

30900008367

Cláudio Pires Florencio

Orientador: Prof. Dr. Evaristo Ribeiro Filho

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2001

Ao meu orientador,
Prof. Dr. Evaristo Ribeiro Filho,
pelos seus 45 anos de Geologia,
com admiração e respeito,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxílio na forma de bolsa de doutoramento (Processo 96/03157-0), fundamental para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Evaristo Ribeiro Filho pela orientação e apoio recebidos, dando continuidade ao meu projeto de pesquisa, e por ter sido o responsável pelo meu aprimoramento profissional durante todo o período de pós-graduação.

Ao diretor da Salgema Mineração, engenheiro de minas Paulo Roberto Cabral de Melo, pelo apoio recebido e por permitir o acesso aos testemunhos de sondagens e dados da empresa.

Ao Prof. Dr. Juan José Pueyo, por me aceitar em seu laboratório, na Universidade de Barcelona - Espanha, oferecer todas as condições de trabalho, pelo acesso irrestrito a todos os procedimentos analíticos, e transmitir de forma exemplar parte da sua experiência, ampliando consideravelmente os meus conhecimentos em geologia de depósitos salinos, o meu especial agradecimento.

Ao Prof. Dr. José Antonio Beltrão Sabadía, principal responsável pelo sucesso obtido durante a minha temporada na Espanha, agradeço de coração o apoio, companhia e sugestões recebidas. Também à Ilvna e ao Victor pela agradável convivência.

À Lourdes Miralles e Carles de las Cuevas, integrantes do Laboratório de Investigação em Formações Salinas (LIFS), da Faculdade de Geologia - Universidade de Barcelona e, em especial, a Josep Maria Groso Garcia, Virginia Carmona e Dione Cendon Sevilla.

À Daniela Salvagio Malta (Palermo - Sicília) pela agradável companhia durante a minha primeira temporada no LIFS.

Aos integrantes do *Servei d'Anàlisi Química* (Universidade de Barcelona), especialmente a *cap* Rosa Maria Marimon Corbella, Raquel, Eulàlia Balart Masgrau e Eva Maria Aracil Verdugo, além de Maite Romero, Monica Fernández, Santiago Sanchez Garcia e Jordi Illa pela atenção e apoio nos procedimentos analíticos e, em especial, a Pilar Teixidor Casamitjana pelas análises cromatográficas.

À Maria Pilar Fernandez Gardiola e Isidre Casals Ribes, integrantes da *Unidad de Cromatografia y Microanálisis (Serveis Científico-Tècnics)* da Universidade de Barcelona, pelas explicações técnicas, atenção e paciência durante a realização das análises elementares e de TOC.

Ao Prof. Dr. Francisco Pinheiro Lima Filho (UFRN) pelas valiosas discussões sobre estratigrafia de seqüências e geologia de depósitos evaporíticos.

Ao geólogo Renato Sena de Carvalho por me conduzir ao fantástico mundo dos evaporitos.

À Profa. Eva Batista Caldas pela inestimável amizade, apoio aos meus estudos e incentivo na pesquisa de depósitos evaporíticos.

À Profa. Dra. Luzia Koike (UNICAMP) pelo auxílio na identificação de parte dos biomarcadores.

Ao Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild (IG-USP) pela leitura crítica de parte do texto.

Ao amigo, geólogo e doutorando Alexandre Magno Feitosa Sales pelos excelentes comentários ao longo da pós-graduação, pela grande amizade e convivência do dia-a-dia, na luta por um futuro melhor.

Aos amigos Paulo e Flávia Albuquerque pela constante presença e agradável companhia.

À Ana Paula e Magali, secretárias da pós-graduação do IG/USP, pela atenção, simpatia, dedicação e profissionalismo nas suas atividades.

Ao Sr. José Gonçalves Neto, do serviço de fotocópias da gráfica do IG/USP, pelo excelente atendimento às inúmeras solicitações.

À geóloga e pós-graduanda Márcia Mika Saito pelo inestimável auxílio técnico na fase final dos trabalhos.

A todos aqueles que fazem parte do Instituto de Geociências da USP, especialmente os integrantes de sua biblioteca.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Soledade e à Leonor, por longos anos de ótima convivência.

Aos meus familiares, especialmente Carmel, Francisco, Miran e Arthur.

E, finalmente, à Adriana, pela longa e paciente espera.

SUMÁRIO

Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Pranchas	xi
Lista de Gráficos	xi
Resumo	xii
Abstract	xiii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Metodologia	1
1.4 Importância econômica dos evaporitos	2
1.4.1 Recursos minerais associados a evaporitos	4
1.5 Distribuição espacial e temporal dos evaporitos	5
1.6 Principais depósitos evaporíticos	7
1.7 Depósitos evaporíticos no Brasil	7
2 - A MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA	10
2.1 Introdução	10
2.2 Aspectos gerais	10
2.3 Histórico dos modelos antigos	13
2.4 Síntese da evolução estratigráfica	15
2.4.1 Megassequência continental	15
2.4.1.1 Sequência <i>sin-rift</i> I	16
2.4.1.2 Sequência <i>sin-rift</i> II	17
2.4.1.3 Sequência <i>sin-rift</i> III	17
2.4.2 Megassequência transicional evaporítica	17
2.4.3 Megassequência marinha	18
2.5 Os evaporitos da margem leste	18
3 - ASPECTOS RELEVANTES DA SEDIMENTAÇÃO EVAPORÍTICA	22
3.1 Gênese de depósitos evaporíticos	22
3.1.1 Princípios fundamentais de sedimentação evaporítica	26
3.1.2 Formação dos cristais	26
3.1.3 Modelos deposicionais	29
3.1.4 Composição dos evaporitos	33
3.1.5 A importância dos teores de bromo	34
3.2 O cristal de halita	34

4 - OS EVAPORITOS DA BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS	37
4.1 Trabalhos anteriores	37
4.2 A Bacia de Sergipe/Alagoas	39
4.2.1 Estratigrafia	40
4.3 As fases evaporíticas	42
4.3.1 Histórico das descobertas	43
4.3.2 A Formação Muribeca	43
4.3.3 Os evaporitos Paripueira	44
4.3.3.1 A sub-bacia evaporítica de Mosqueiro	46
4.3.3.2 A sub-bacia evaporítica de Coruripe	47
4.3.3.3 A sub-bacia evaporítica de Maceió	48
4.3.3.4 A sub-bacia evaporítica de Paripueira	48
4.3.4 Os evaporitos Ibura	49
4.4 Métodos de mineração	51
4.4.1 A mineração dos evaporitos Paripueira	52
4.4.2 A mineração dos evaporitos Ibura	55
5 - A SUB BACIA EVAPORÍTICA DE MACEIÓ	56
5.1 Aspectos gerais	56
5.2 Avaliação dos dados de sondagens	56
5.2.1 Métodos de perfilagens	59
5.2.2 Evaporitos da área de produção	60
5.2.2.1 Localização dos poços	62
5.2.2.2 Interpretação dos dados de sondagens	62
5.2.3 Tentativa de determinação de marcos litológicos	64
5.2.4 Unidades evaporíticas	64
5.3 Evaporitos da área de pesquisa	66
5.4 Petrologia e mineralogia	72
5.4.1 Preparação de amostras para análises	72
5.4.1.1 Amostras salinas	72
5.4.1.2 Amostras não salinas	73
5.4.2 Estudos petrológicos	73
5.4.3 Identificação de inclusões fluidas	76
5.4.4 Difração por raios X	79
5.4.5 Microscopia eletrônica	82
5.4.6 Determinação dos teores de CaCO_3	85
5.5 Estudos estratigráficos	86
5.5.1 Estratigrafia de seqüências	86
5.5.2 Conceitos fundamentais	87
5.5.2.1 Seqüências	87
5.5.2.2 Parasseqüências	88
5.5.2.3 Conjunto de Parasseqüências	89
5.5.2.4 Correlações	89
5.5.2.5 Unidades estratais	90
5.5.2.6 A curva eustática	90

5.5.2.7 Tratos de sistema	91
5.5.3 Aplicação dos conceitos na sub-bacia de Maceió	91
6 - ESTUDOS GEOQUÍMICOS	98
6.1 Geoquímica inorgânica	98
6.1.1 Preparação das amostras	98
6.1.2 Procedimentos analíticos	98
6.1.2.1 Determinação dos teores de bromo	98
6.1.2.2 Determinação dos teores de Cl, K e Mg	99
6.1.3 Resultados obtidos	100
6.1.3.1 Teores de bromo	100
6.1.3.2 Teores de resíduos insolúveis	104
6.1.3.3 Teores de Cloro	107
6.1.3.4 Teores de magnésio e potássio	110
6.2 Geoquímica orgânica	113
6.2.1 Conceitos básicos	113
6.2.1.1 O ambiente anóxico	113
6.2.1.2 A acumulação da matéria orgânica	115
6.2.1.3 A fonte de matéria orgânica	115
6.2.1.4 Evaporitos e matéria orgânica	116
6.2.1.5 Matéria orgânica e hidrocarbonetos	117
6.2.1.6 Marcadores biológicos	119
6.2.1.7 Análise dos biomarcadores	120
6.2.1.8 Tipos de biomarcadores	120
6.2.2 Aplicações da geoquímica orgânica na sub-bacia de Maceió	121
6.2.2.1 Análise elementar	122
6.2.2.2 Extração da matéria orgânica	125
6.2.2.3 Fracionamento do extrato orgânico	126
6.2.2.4 Cromatografia líquida	128
6.2.2.5 Determinação do $\delta^{13}\text{C}$ em extratos orgânicos	128
6.2.2.6 Cromatografia gasosa e espectrometria de massas (CG-MS)	130
7 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	135
7.1 A sedimentação evaporítica na área de Maceió	135
7.2 As rochas da sub-bacia de Maceió	135
7.3 A gênese do sal	136
7.4 A ausência de sulfatos	140
7.5 A deposição salina	141
7.6 A evolução da salinidade	142
7.7 A matéria Orgânica	142
7.8 O modelo deposicional	143
7.9 Sugestões para pesquisas posteriores	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Paleolatidade	6
Figura 1.2 Distribuição mundial dos grandes depósitos evaporíticos	9
Figura 2.1 Distribuição das bacias sedimentares na margem continental brasileira	11
Figura 2.2 Coluna estratigráfica generalizada das bacias da margem continental brasileira	12
Figura 2.3 Estrutura crustal baseada na subsidência tectônica e modelagem gravimétrica	14
Figura 2.4 Reconstruções paleogeográficas para as megassequências continental e marinha	16
Figura 2.5 Esboço paleogeográfico no final do Eoaptiano	19
Figura 2.6 Coluna sedimentar esquemática do <i>rift</i> proto-Atlântico Sul	20
Figura 3.1 Composição normativa dos sais dissolvidos na água do mar, em função de sua solubilidade	25
Figura 3.2 Relação entre salmoura original e a concentração necessária para precipitar minerais evaporíticos	25
Figura 3.3 Forma dos cristais <i>hopper</i> de halita e esquema de deposição	27
Figura 3.4 Esquema de formação de cristais de halita no fundo da bacia evaporítica	28
Figura 3.5 Deposição em ambiente de <i>sabkha</i>	28
Figura 3.6 Padrões de bacias barradas	29
Figura 3.7 Seção esquemática de bacias múltiplas	31
Figura 3.8 Modelos deposicionais: região de <i>sabkha</i> e de salina costeira	32
Figura 3.9 Esquema de crescimento de um cristal de halita do tipo <i>hopper</i>	35
Figura 3.10 Distribuição de diferentes tipos de inclusões fluidas em cristal de halita	36
Figura 4.1 Mapa de localização da Bacia de Sergipe/Alagoas	39
Figura 4.2 Litoestratigrafia geral da Bacia de Sergipe/Alagoas	42
Figura 4.3 Distribuição das sub-bacias evaporíticas da primeira fase Paripueira na porção alagoana da bacia	45
Figura 4.4 Perfil litológico parcial de um poço perfurado na área do Baixo Estrutural de Mosqueiro	46
Figura 4.5 Mapa de gravidade residual da área de Maceió, com destaque para o Baixo de Maceió	40
Figura 4.6 Distribuição dos evaporitos da fase Ibura em Sergipe	50
Figura 4.7 Esquema de um poço de produção de salmoura	52
Figura 4.8 Configuração ideal e fases de crescimento das cavidades geradas pela dissolução salina	54
Figura 4.9 Esquema de operação de lavra na mina de potássio	55
Figura 5.1 Localização da sub-bacia evaporítica de Maceió	57
Figura 5.2 Mapa de localização dos poços na área da sub-bacia de Maceió	58
Figura 5.3 Divisão do pacote evaporítico com base nos padrões de Perfilagens em raios gama	67

Figura 5.4 Mapas das razões insolúveis/halita das três unidades	68
Figura 5.5 Perfil do poço de pesquisa 1 (PP-1)	69
Figura 5.6 Perfil do poço de pesquisa 2 (PP-2)	70
Figura 5.7 Perfil do poço de pesquisa 3 (PP-3)	71
Figura 5.8 Detalhe de imagem de MEV para halita com cristais fibrosos	83
Figura 5.9 Esquema do aparelho usado para determinação dos teores de CaCO_3 em rochas sedimentares	85
Figura 5.10 Comparação entre correlação cronoestratigráfica e litoestratigráfica	89
Figura 5.11 A curva eustática	90
Figura 5.12 Detalhamento do perfil do poço "A" com base na Estratigrafia de Seqüências	94
Figura 5.13 Seção estratigráfica norte-sul	95
Figura 5.14 Seção estratigráfica nordeste-suldoeste	96
Figura 5.15 Mapa de localização das seções estratigráficas	97
Figura 6.1 Gráficos dos teores de bromo em amostras moídas a seco e com imersão em etanol	100
Figura 6.2 Perfil dos teores de bromo do PP-1.	103
Figura 6.3 Gráfico dos teores de resíduos insolúveis	104
Figura 6.4 Gráfico dos teores de cloro	107
Figura 6.5 Gráficos dos teores de magnésio e de potássio	110
Figura 6.6 Fluxograma das análises para geoquímica orgânica	121
Figura 6.7 Gráfico de frequência dos teores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	129
Figura 6.8 Cromatograma da amostra 2NA (gráfico A) e identificação dos principais componentes da relação m/z 191 (gráficos B e C)	132
Figura 6.9 Evolução da presença de Dinosteranos ao longo do intervalo evaporítico	133
Figura 6.10 Fragmentograma (m/z 98) referente ao Dinosterano (amostra 33.4)	134
Figura 7.1 Mapa de contornos da base e topo do atual corpo salino referente à área de produção	137
Figura 7.2 Evolução dos biomarcadores ao longo do perfil PP-2	144
Figura 7.3 Evolução dos biomarcadores ao longo do perfil PP-2	145
Figura 7.4 Modelo deposicional para a sub-bacia evaporítica de Maceió	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Teor médio dos sais contidos na água do mar	24
Tabela 3.2 Composição média dos principais rios do mundo	24
Tabela 4.1 Dados gerais para os sais da sub-bacia evaporítica de Coruripe	47
Tabela 4.2 Dados gerais para os sais da sub-bacia de Paripueira	49
Tabela 5.1 Valores dos registros, em diferentes perfilagens, para minerais evaporíticos e rochas associadas	61
Tabela 5.2 Amostras do PP-2 selecionadas para DRX	80
Tabela 6.1 Resultados analíticos dos teores de bromo (amostras 1 a 31)	101
Tabela 6.2 Resultados analíticos dos teores de bromo (amostras 32 a 63)	102
Tabela 6.3 Resultados dos teores de resíduos insolúveis (amostras 1 a 31)	105
Tabela 6.4 Resultados dos teores de resíduos insolúveis (amostras 32 a 63)	106
Tabela 6.5 Resultados analíticos dos teores de cloro (amostras 1 a 31)	108
Tabela 6.6 Resultados analíticos dos teores de cloro (amostras 32 a 63)	109
Tabela 6.7 Resultados analíticos dos teores de magnésio e de potássio (amostras 1 a 31)	111
Tabela 6.8 Resultados analíticos dos teores de magnésio e de potássio (amostras 32 a 63)	112
Tabela 6.9 Amostras selecionadas para análise elementar	122
Tabela 6.10 Resultados das análises elementar, TOC e teores de CaCO_3	124
Tabela 6.11 Primeiro grupo de amostras	125
Tabela 6.12 Segundo grupo de amostras	125
Tabela 6.13 Resultados da análise isotópica	129
Tabela 6.14 Tipo de componente conforme relação m/z	131
Tabela 7.1 Valores de K (coeficiente de partição) para os mais importantes minerais evaporíticos	138

LISTA DE PRANCHAS

Prancha 5.1 Testemunhos de sondagem e fotomicrografias	77
Prancha 5.2 Fotomicrografias de inclusões fluidas	78
Prancha 5.3 Imagens de MEV	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 Difratoograma de raios X para a amostra 11	81
Gráfico 5.2 Difratoograma de raios X para a amostra 21	81

RESUMO

Esta tese teve como principal objetivo a caracterização dos evaporitos da Fm. Muribeca que ocorrem na região de Maceió, Cretáceo Inferior da Bacia de Sergipe/Alagoas, em seus aspectos estratigráficos, mineralógicos e geoquímicos, além da distribuição, geometria e origem do corpo salino. Foram usadas informações de subsuperfície, como perfilagens de poços e testemunhos de sondagens. Verificou-se que os evaporitos são constituídos essencialmente por halita, em camadas de espessuras variáveis, de até 288 m, com intercalações de rochas siliciclásticas e carbonáticas, sendo encontrados em profundidades maiores que 850 m. Não foi constatada a presença de sais mais solúveis, como silvinita ou carnalita. Com base nas análises químicas foi construído um perfil completo para teores de bromo, cujos valores mostram um máximo de 58 ppm, sugerindo recristalização. A ausência de sulfatos é uma característica marcante desses evaporitos. A ausência de ciclos bem marcados, impediu a divisão dos evaporitos em ciclos correlacionáveis. As fases de baixa concentração salina são marcadas pela acumulação de folhelhos e margas, resultantes de novos influxos. A Estratigrafia de Seqüências permitiu a definição das superfícies de inundação máxima e divisão do pacote em tratos de sistema. A geoquímica orgânica mostrou a presença de biomarcadores como o dinosterano, predominância de fitano sobre pristano e teores de $\delta^{13}\text{C}$ próximos a -26‰ , caracterizando ambiente lacustrino/marinho. São registrados teores de TOC de até 33,8%, típicos de meio fortemente redutor. Supõe-se que essa área fazia parte de um sistema de lagunas, parcialmente isoladas do proto-oceano, com periódicos influxos marinhos e ocasionais aportes continentais.

ABSTRACT

This thesis characterizes the stratigraphical, mineralogical and geochemical aspects of Lower Cretaceous evaporites of the Muribeca Formation, Sergipe/Alagoas Basin in the region of Maceió, Alagoas, as well as the geometry, distribution and origin of this saline deposit on the basis of subsurface information from well logs and core samples. The main evaporite mineral is halite in layers of variable thickness with intercalations of siliciclastic and carbonate rocks. The salt is found in deposits up to 288 m thick at depths of more than 850 m and is probably recrystallized, as suggested by the low values for bromide (≤ 58 ppm). More soluble salts (such as silvinite or carnallite) are absent. The absence of sulfates is an important characteristic of these salts, and the lack of well-marked cycles precludes correlation with well-known evaporite cycles. Phases of low salinity are marked by accumulation of shale and marl. Sequence stratigraphic analysis allowed the definition of three maximum flooding surfaces and the identification of system tracts. Organic geochemistry revealed biomarkers such as dinosteranes (marine influence), phytane predominance over pristane (high salinity), $\delta^{13}\text{C}$ values near -26‰ (marine to lacustrine environment) and high TOC values (33,8% - anoxic sedimentary environment). Deposition is interpreted as having taken place within a lagoon system partially isolated from the southern Atlantic proto-ocean, with periodic marine influxes and occasional continental influences.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

Na Bacia de Sergipe/Alagoas são reconhecidas duas importantes fases evaporíticas denominadas de Paripueira e Ibura, ambas inseridas na Formação Muribeca, correspondendo, respectivamente, aos membros Maceió e Ibura, conforme definição estratigráfica proposta para a bacia (Schaller, 1969). Tais fases evaporíticas são representadas por diversos tipos litológicos, exibindo características bem distintas entre si, sejam de natureza mineralógica, geoquímica ou estratigráfica. A deposição dessas camadas ocorreu no Cretáceo Inferior, durante a fase transicional, de condições continentais para marinhas, onde são registrados espessos pacotes de sais solúveis.

Na sub-bacia evaporítica de Maceió, os estratos salíferos são encontrados em profundidades superiores a 850 metros, sendo representados, predominantemente, por halitas, intercaladas por folhelhos e rochas carbonáticas.

A presença de evaporitos nessa área foi constatada pela primeira vez por sondagens realizadas pela DRILEX, em 1941, como parte dos programas pioneiros de prospecção desenvolvidos, na época, pelo Conselho Nacional do Petróleo.

1.2 - Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral a caracterização geológica da sub-bacia evaporítica de Maceió, por meio de estudos petrológicos, mineralógicos, estratigráficos e geoquímicos.

Os objetivos específicos visaram reconhecer os seus aspectos estratigráficos, distribuição e geometria, sua composição e origem, a definição de prováveis ciclos evaporíticos, a evolução da salinidade e a caracterização geoquímica do corpo salino.

1.3 - Metodologia

Os trabalhos tiveram início com um minucioso levantamento bibliográfico sobre geologia de depósitos evaporíticos, envolvendo modelos, sedimentação, gênese, estratigrafia, petrologia, geoquímica e exemplos mundiais.

Para o desenvolvimento dos estudos a principal base de dados foi o acervo de informações de subsuperfície, constituído por perfilagens de poços e por testemunhos de sondagens, cedidos pela SALGEMA MINERAÇÃO e PETROBRÁS.

Foram obtidos os dados geofísicos de 32 poços, correspondendo a perfilagens de raios gama, sônico, neutrão, densidade, *caliper* e *dipmeter*, dos quais 30 poços correspondiam à área da sub-bacia de Maceió. Três poços perfilados e com testemunhagem contínua, atravessando todo o intervalo salífero, correspondendo a aproximadamente 600 metros, foram cedidos para estudos. A partir desses dados foram realizadas as descrições dos intervalos testemunhados e comparadas com os perfis dos poços sem testemunhos.

Os perfis dos poços foram usados para delimitação da área de ocorrência da sub-bacia evaporítica, identificação da natureza das camadas salíferas e realização de estudos estratigráficos. Na análise das perfilagens foram utilizados diagramas, gráficos e tabelas apropriadas fornecidos pela Schlumberger.

A seleção dos intervalos para amostragem teve como objetivo a realização de estudos petrográficos e geoquímicos de partes representativas da seção evaporítica. Foram efetuados exames petrográficos, difratometria por raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise elementar, teores isotópicos, análises de elementos maiores em sais solúveis, fluorescência de raios X, calcimetria e geoquímica orgânica.

Os procedimentos geoquímicos, e as técnicas utilizadas em cada caso, serão descritos durante a abordagem das etapas do trabalho.

1.4 - Importância econômica dos evaporitos

Os evaporitos são economicamente importantes por serem fontes de matéria-prima para a fabricação de diversos produtos. Uma sucessão evaporítica, com salinidade crescente, inclui a deposição de carbonatos, sulfatos, cloreto de sódio, culminando com cloretos de potássio e magnésio.

Os depósitos de sulfato de cálcio são encontrados em abundância na natureza, ocorrendo como anidrita (CaSO_4), ou sob forma hidratada, denominada de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), contendo 79% de sulfato de cálcio e 21% de água em sua composição.

A gipsita é a forma natural mais comum de ocorrência de minerais evaporíticos de sulfato, sendo utilizada na fabricação do cimento como agente retardador. Quando

submetida à calcinação, dá origem ao gesso, produto empregado na construção civil, na forma de painéis e paredes divisórias, forro de tetos e decoração, além do uso em moldagens, em ortopedia e em próteses. Tanto a gipsita quanto a anidrita são muito empregadas na agricultura como corretivo de solos deficientes em enxofre. No passado, esses minerais foram usados como fonte para a produção de ácido sulfúrico e sulfato de amônia (Pressler, 1985).

Dentre os sais solúveis destacam-se o cloreto de sódio e o cloreto de potássio. O cloreto de sódio produzido pela natureza recebe a denominação de sal-gema ou de halita (NaCl). É a principal fonte de cloro e derivados importantes, como ácido clorídrico e cloretos diversos, hipoclorito (água sanitária), cloratos e percloratos. Por suas propriedades germicidas, o cloro é usado na purificação de águas. A eletrólise do cloreto de sódio fornece, também, o sódio metálico e a soda cáustica que é utilizada na fabricação de sabões, tratamento de óleos e celulose (Abreu, 1973). Com a obtenção do cloro pode-se produzir o DCE (dicloroetano), a partir da reação de eteno petroquímico que é matéria-prima para a fabricação de PVC (policloreto de vinila).

Uma unidade industrial de cloro-soda se torna competitiva quando o seu processo integra a produção de PVC, um dos termoplásticos mais consumidos no mundo. Suas aplicações incluem, desde artigos rígidos, como tubos e conexões, até produtos flexíveis e elásticos, como calçados, embalagens, capas de fios e cabos, pois suas propriedades podem ser alteradas conforme as proporções de misturas com outros componentes (FIERN, 1998).

A barrilha, *soda-ash* ou carbonato de sódio (Na_2CO_3) pode ser obtida por processos químicos, ou produzida diretamente a partir de recursos naturais, cujas principais fontes são a trona ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a nacolita (NaHCO_3). A indústria de barrilha é uma indústria de base que pode ser associada a vários segmentos industriais, principalmente para a produção de vidros, detergentes e abastecimento do setor químico.

Os depósitos evaporíticos são importantes fontes para a obtenção do potássio. Nesses depósitos o potássio pode ocorrer sob a forma de cloretos e de sulfatos, sendo os mais importantes a silvinita (KCl), com 63,2% de K_2O , a carnalita ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), com 16,9% de K_2O , a cainita ($\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), com 18,9% de K_2O e a langbeinita [$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$], com 22,7% de K_2O (Searls, 1985). A silvita é o mineral mais explotado para a produção de potássio, pois a sua estrutura química de cloreto simples favorece

o seu aproveitamento industrial (Friedrich, 1997). Na natureza, a silvita freqüentemente pode ocorrer associada à halita, recebendo a denominação de silvinita (KCl+NaCl).

A maior parte do potássio produzido no mundo é utilizada na produção de fertilizantes. Outras aplicações são voltadas para a fabricação de sabões e detergentes, vidro e cerâmica, medicamentos, corantes químicos e borracha sintética.

O bromo contido nas águas-mães das salinas artificiais pode ser recuperado e utilizado na fabricação de produtos químicos de múltiplas aplicações, como retardantes de chama, defensivos agrícolas, fotografias, produtos farmacêuticos e produção de petróleo (Williams-Stroud, 1991).

O magnésio, metal muito utilizado nas ligas metálicas leves, pode ser obtido por processos térmicos, utilizando-se a dolomita e a magnesita, ou por processos eletrolíticos, tendo como fonte o cloreto de magnésio obtido a partir da cloração da magnesita ou de salmouras concentradas da água do mar.

1.4.1 - Recursos minerais associados a evaporitos

Existe uma íntima associação entre evaporitos, carbonatos e hidrocarbonetos. Apesar dos evaporitos constituírem menos de 2% das plataformas sedimentares do mundo (Ronov *et al.*, 1980), cerca de 70% dos grandes campos de petróleo em rochas carbonáticas têm relação com evaporitos, e todos os grandes campos de gás situados em *thrust-belts* possuem um selante evaporítico (Zhang Yi-gang, 1981). Os ambientes evaporíticos são capazes de gerar e preservar abundantes quantidades de matéria orgânica. Szatmari (1980) acredita que as acumulações de petróleo podem ter origem a partir da matéria orgânica contida nos depósitos salinos, posteriormente liberada pela dissolução do sal.

Em geral, as principais províncias produtoras de petróleo do hemisfério norte são coincidentes com as principais áreas de deposição evaporítica. Essa coincidência pode ser atribuída a: causas ambientais, como clima, condições reduzidas de deposição e relativa estabilidade tectônica; mobilidade dos depósitos salinos, tendo como resultante a variedade de armadilhas estruturais; à excelente capacidade dos evaporitos atuarem como selantes, mesmo durante períodos de repetidas atividades tectônicas. (Kozary *et al.*, 1968)

Em domos salinos, o recurso mineral mais importante é o petróleo. Além dos minerais evaporíticos, outros bens minerais podem ser obtidos, como por exemplo:

enxofre, chumbo, zinco, prata e sulfetos de manganês, sulfatos de bário e de estrôncio, dentre outros (Kyle & Price, 1986). Os depósitos de enxofre podem ser gerados a partir da redução do sulfato da gipsita, ou da anidrita, por bactérias anaeróbicas, em presença de hidrocarbonetos, precipitando o enxofre elementar com a oxidação causada por águas em circulação (Carvalho, 1987a).

Nas regiões de *sabkhas*, as mineralizações de sulfetos resultam da precipitação de íons metálicos, presentes na salmoura, quando em contato com uma zona redutora rica em H_2S (Renfro, 1974).

Os evaporitos também podem ter grande importância na formação de depósitos minerais, quando em associação com magmatismo, como por exemplo os depósitos de níquel, cobre e platinóides na plataforma siberiana (Kyle, 1991).

1.5 - Distribuição espacial e temporal dos evaporitos

Os evaporitos estão distribuídos desde o Pré-Cambriano ao Recente, em todos os continentes, e sua presença é registrada em mais da metade das bacias sedimentares com estratos marinhos, existindo uma dominância de depósitos salinos no hemisfério norte, o que pode ser explicado pela menor presença de terras emersas e mares rasos nas latitudes do hemisfério sul (Irving & Briden, 1962).

Os evaporitos também tem um significado especial nos estudos paleoclimáticos devido às condições de restrição onde se desenvolve. Ao longo da linha equatorial, a evaporação é elevada e, por isso, as áreas chuvosas equatoriais, de baixa pressão atmosférica, são regiões deficientes em acumulação evaporítica. Em consequência, os evaporitos só são formados em latitudes mais baixas e estão concentrados entre paleolatitudes de 10° a 40° (Fig. 1.1) . Na atualidade, a deposição evaporítica é típica de baixas a médias latitudes, em zonas de alta pressão, onde a pluviosidade é deficiente (Gordon, 1975; Parrish & Barron, 1986).

A alta incidência de evaporitos no Paleozóico Superior e no Mesozóico Inferior pode ser justificada pela existência do Pangea. Durante este relativo curto tempo de existência, o Pangea esteve situado sobre cinturões de baixas e médias latitudes de ambos os hemisférios.

Fig. 1.1 - Distribuição dos depósitos evaporíticos no tempo e por latitude, relacionados por: latitudes atuais (A); paleolatitudes (B); distância do paleoequador (C). Durante o Holoceno o gráfico (B) representa áreas desérticas com menos de 25 mm de precipitação anual, excluindo-se os desertos de altas latitudes (adaptado de Gordon, 1975)

1.6 – Principais depósitos evaporíticos

Muitas das grandes bacias sedimentares do mundo foram preenchidas por espessos depósitos evaporíticos que, em alguns casos, superam 1000 metros de espessura. Essas bacias são citadas como “gigantescas salinas” (Hsü, 1972) e os exemplos incluem a Bacia de Zechstein, do NW da Europa, e as bacias de Michigan, Elk Point, Williston e Delaware, todas situadas na América do Norte (Fig. 1.2). Outros depósitos ocorrem interdigitados com sedimentos não evaporíticos em escudos e plataformas estáveis e em bacias subsidentes.

O Mar Morto é um local bem conhecido de atual precipitação salina. A bacia salífera do Triássico das Ilhas britânicas e os depósitos terciários da França e da Alemanha são exemplos de evaporitos formados em *rifts* intracratônicos. Por outro lado, os evaporitos do Terciário do Mar Vermelho e os do Cretáceo, ao longo das margens leste e oeste do Oceano Atlântico, foram depositados em *rifts* antes da formação da crosta oceânica (Tucker, 1988).

1.7 - Depósitos evaporíticos no Brasil

No Brasil são encontrados depósitos evaporíticos nas principais bacias sedimentares, destacando-se a presença de gipsita, anidrita, halita, silvinita e carnalita, com idades que variam desde o Paleozóico ao Cenozóico.

Os depósitos mais significativos ocorrem nas bacias do Amazonas, Solimões, Acre, Tacutu, Parnaíba, Araripe, Recôncavo e nas bacias da margem continental leste e equatorial. Outros depósitos de menor expressão são formados por gipsita, no Cretáceo da Bacia Potiguar, e por anidrita, no Permiano da Bacia do Paraná.

Nas bacias do Amazonas e de Solimões (Caputo & Silva, 1990), as seções evaporíticas foram geradas durante o Permo-Carbonífero e são representadas por extensos depósitos de calcário, anidrita, halita e sais de potássio e de magnésio, encontrados em profundidades que variam de 980 a 1200 metros (SAD *et al.*, 1997).

Na Bacia do Acre, os evaporitos são constituídos por anidrita e halita do Juro-Triássico e por anidrita do Permiano (Feijó & Souza, 1994). A Bacia de Tacutu, situada no limite do Estado de Roraima com a República da Guiana, registra a presença de gipsita, anidrita e halita em intervalo atribuído ao Jurássico Superior (Eiras e Kinoshita, 1990).

Na Bacia do Parnaíba, a ocorrência de evaporitos contém seções do Permo-Carbonífero (Lima Filho, 1999) e do Mesozóico (Baquil, 1997), com extensos pacotes de anidrita e de gipsita.

Os evaporitos da Bacia do Recôncavo são referidos como depósitos continentais (Ghignone & Assis, 1997), contendo calcário, anidrita e silvinita, atribuídos por esses autores ao Jurássico Superior, mas mencionados por Caixeta *et al.* (1994) como depósitos marinhos do Permo-Carbonífero.

A seção evaporítica da margem continental leste do Brasil distribui-se desde a Bacia de Santos até a Bacia de Sergipe-Alagoas, representada principalmente por anidrita e halita e, localmente, por sais mais solúveis depositados durante o Cretáceo Inferior. Na margem equatorial são registrados depósitos de halita na Bacia do Ceará (Regali, 1989).

Várias ocorrências salinas, sem maior expressão, estão distribuídas por diversas regiões, como as crostas salinas em Minas Gerais e a trona na Bacia do Paraná (Etchbehere, 1991).

Fig. 1.2 - Distribuição mundial dos grandes depósitos evaporíticos (adaptado de Tucker, 1988).

2 - A MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA

2.1 - Introdução

A origem e a evolução das bacias sedimentares da margem continental brasileira estão ligadas aos processos de fraturamento e migração continental divergente que resultaram na separação das atuais placas da África e América do Sul, conforme modelo evolutivo de margem continental tipo Atlântica (Asmus & Porto, 1972).

Nessas bacias são encontrados depósitos evaporíticos cuja distribuição envolve variáveis como tectônica, clima, fisiografia e aspectos físico-químicos reinantes à época de formação do proto-oceano Atlântico Sul.

Neste capítulo são apresentadas algumas informações a respeito dos processos que conduziram à formação dessas bacias; os aspectos evolutivos da abertura do Atlântico Sul; os fatores que determinaram a sedimentação evaporítica, sua distribuição e exemplos das principais ocorrências.

2.2 - Aspectos gerais

O fraturamento do Pangea teve início no Neotriássico-Eojurássico (210 milhões de anos) com a separação de diversos blocos, dentre eles as atuais América do Norte e América do Sul, permanecendo, contudo, a ligação entre esta última e a África. Cerca de 70 milhões de anos depois, no final do Jurássico e começo do Neocomiano (140 milhões de anos), teve início a fragmentação do Gondwana, separando a África da América do Sul, com a conseqüente formação do Oceano Atlântico Sul (Figueiredo, 1985).

As bacias da margem continental brasileira, ou “bacias marginais”, são aquelas formadas durante a fragmentação dos continentes e que evoluíram, desde a fase *rift*, até a fase francamente marinha. São caracterizadas por estarem implantadas na transição entre crosta continental e crosta oceânica de uma mesma placa litosférica (Asmus & Porto, 1972; Chang & Kowsmann, 1987). O *rifteamento* gerou uma série de *grabens* e *horsts*, o que constitui a característica estrutural mais expressiva desse conjunto de bacias.

No processo evolutivo das bacias da margem continental brasileira são reconhecidos diferentes aspectos tectônicos, sedimentares e paleontológicos, o que permite a individualização de dois grupos distintos: a) margem leste, para o trecho que tem início na Bacia de Pelotas até a Bacia de Sergipe/Alagoas; b) margem equatorial, para aquelas bacias situadas ao norte da Bacia de Pernambuco/Paraíba, até a Plataforma do Amapá.

Na margem continental leste brasileira, as bacias sedimentares (Pelotas, Santos, Campos, Espírito Santo, Bahia Sul, Bahia Norte e Sergipe/Alagoas) ocupam a planície costeira, a plataforma continental e o talude da porção oeste do oceano Atlântico Sul (Fig. 2.1).

Nessas áreas, com exceção da Bacia de Pelotas, ocorre uma seção evaporítica que antecede a fase de deposição marinha, sendo representada por depósitos de anidrita, halita, com sedimentos clásticos e carbonáticos intercalados e, localmente, por depósitos de silvinita, carnalita e taquidrita.

Fig. 2.1 - Distribuição das bacias sedimentares na margem continental brasileira (adaptado de Koutsoukos & Dias-Brito, 1987).

A coluna estratigráfica dessas bacias, em sua maioria, abrange sedimentos de um intervalo de tempo posicionado desde o Jurássico Superior ao Holoceno, depositados em ambientes que variam de continentais a marinhos (Viana, 1980).

A estratigrafia básica do Mesozóico, para essa área, foi caracterizada por Asmus (1975) que definiu três intervalos distintos: a) clástico flúvio-lacustrino; b) evaporítico marinho restrito; c) clástico marinho franco.

Ponte *et al.* (1978), sintetizando a evolução dessas bacias, dividiram a coluna estratigráfica em três grandes seqüências: a) clástica não marinha; b) evaporítica; c) marinha. Esta última foi subdividida em três subseqüências, denominadas de carbonática, transgressiva e regressiva (Fig. 2.2).

Asmus & Porto (1980) apresentaram uma coluna estratigráfica agrupada em quatro intervalos, depositados em condições ambientais relacionados à respectiva denominação: seqüências do Continente, do Lago, do Golfo e do Mar.

IDADE	SEQÜÊNCIAS	SUB-SEQÜÊNCIAS	LITOLOGIA	AMBIENTES DEPOSICIONAIS
TERCIÁRIO/ ALBIANO	MARINHA	PROGRADANTE OU REGRESSIVA		LITORAL PLATAFORMA E TALUDE
		TRANSGRESSIVA		TALUDE
		CARBONÁTICA		PLATAFORMA MARINHA RASA
APTIANO	EVAPORÍTICA			MARINHO RESTRITO E TRANSICIONAL
NEOCOMIANO	CLÁSTICA	SUPERIOR		DELTAICO LACUSTRE
JURÁSSICO	NÃO-MARINHA	INFERIOR		FLÚVIO-LACUSTRE

Fig. 2.2 - Coluna estratigráfica generalizada das bacias da margem continental brasileira (Ponte *et al.*, 1978).

2.3 - Histórico dos modelos evolutivos

A evolução tectono-sedimentar, da margem continental brasileira, tem sido descrita por diversos autores, tendo como ponto de partida a divergência de placas, com o conseqüente estiramento e rompimento da litosfera.

Estrella (1972) aborda os aspectos da evolução tectônica das bacias do leste brasileiro, durante o Mesozóico, em suas fases *pré-rift* e *rift*.

Asmus (1975) reconhece quatro fases evolutivas, estabelecidas a partir do relacionamento de causa e efeito, entre manifestações tectônicas e o arcabouço das bacias resultantes com os intervalos sedimentares.

Asmus & Porto (1980) discutem as fases evolutivas da margem continental, analisando as fases *pré-rift*, *rift*, *proto-oceânica* e *oceânica*.

Ojeda (1981) também destaca as quatro fases evolutivas, enfatizando os eventos das fases de fraturamento e transicional, além de introduzir novos conceitos.

Chang & Kowsmann (1987) demonstram que a evolução tectônica dessas bacias pode ser dividida em duas fases (*rift* e *termal*), sendo a estratigrafia resultante uma combinação de fatores que incluem a subsidência tectônica e a variação eustática no nível do mar, além de fenômenos como taxa de suprimento sedimentar e condições paleoclimáticas.

Este último modelo tem mostrado resultados satisfatórios, no estudo das bacias do leste brasileiro (Chang & Kowsmann, 1986), demonstrando que o estiramento da litosfera, a subsidência em duas fases (*rifteamento* mecânico seguido de contração termal), reforçada pela carga flexural dos sedimentos, explicam, favoravelmente, o padrão evolutivo dessas bacias.

Conceição *et al.* (1988), avaliando o processo de abertura do Oceano Atlântico Sul, individualizaram dois ciclos principais de *rifteamento*, cada um predominando em determinadas áreas do Gondwana, num intervalo de tempo situado entre 225 e 160 milhões de anos e, outro, de 160 a 115 milhões de anos. Para esses autores, o *rifteamento* atuou de forma independente em duas frentes distintas: de sul para norte, até a Bacia de Sergipe/Alagoas, na porção meridional; e de oeste para leste, até a Bacia Potiguar, na porção setentrional.

A aplicação de modelagens gravimétricas e tectônicas, ao longo da margem leste, sugere que cada bacia sofreu, individualmente, distintos graus de estiramento

(Chang *et al.*, 1990). As diferenças entre essas bacias teriam sido compensadas por meio das zonas de transferência, representadas por rejeitos aparentes que podem ser observados nos traçados das zonas de charneira das bacias (Fig. 2.3).

Fig. 2.3 - Estrutura crustal baseada na subsidência tectônica e modelagem gravimétrica (Chang *et al.*, 1990).

As zonas de charneira foram definidas por Ojeda (1981) como sendo eixos de flexura, de extensão regional em cada bacia, caracterizados por um grande rejeito dos estratos no sentido da bacia profunda. Essas zonas de charneira separam a crosta continental não estirada daquela que sofreu estiramento, sendo reconhecidas por um aprofundamento acentuado do embasamento e um soerguimento da descontinuidade de Moho (Chang *et al.*, 1990).

As zonas de transferência prolongam-se para o leste, como zonas de fraturas oceânicas, tendo como exemplos aquelas que ocorrem ao sul da margem leste, entre as bacias de Pelotas, Santos e Campos. A zona de transferência Pelotas-Santos é evidenciada pelo complexo Alto de Florianópolis - Dorsal de São Paulo que, provavelmente, atuou como barreira ao avanço do mar na fase inicial da formação do Oceano Atlântico Sul.

A subsidência geral pós-*rift* pode ser representada por uma curva de declínio exponencial, correspondendo ao resfriamento e contração da litosfera (Chang & Kowsmann, 1987), tendo produzido o basculamento generalizado da margem continental para o oceano, a qual foi preenchida por uma cunha espessa de sedimentos marinhos, sendo posteriormente afetados por falhamentos lístricos, horizontalizados na base dos depósitos evaporíticos do Andar Alagoas.

Como feições estruturais mais significativas, encontradas no arcabouço das bacias marginais brasileiras, destacam-se estruturas diastróficas e adiastróficas, tais como: blocos escalonados com basculamento sintético e antitético; zonas de inversão de mergulho regional; charneiras com *grabens* de compensação; estruturas homoclinais; plataformas rasas; falhas de crescimento com *rollovers*; diápiros de folhelho ou sal; e estruturas arqueadas relacionadas à atividade ígnea (Ojeda, 1981).

2.4 - Síntese da evolução estratigráfica

Uma síntese da evolução das bacias da margem leste do Brasil foi discutida por Chang *et al.* (1990), em trabalho no qual foram apresentadas as mega-unidades litoestratigráficas, definidas anteriormente por outros autores (Asmus, 1975; Ponte *et al.*, 1978; Chang & Kowsmann, 1987), porém com algumas modificações abaixo descritas.

2.4.1 - Megassequência continental

O intervalo continental, mencionado por Ponte *et al.* (1978) como clástico não marinho, foi dividido em três seqüências sin-*rift*, tendo como base suas associações de fácies características e estilos estruturais (Figueiredo, 1981 *apud* Chang *et al.*, 1990), semelhante ao esquema evolutivo proposto para o *rift* do lado africano (Fig. 2.4).

Fig. 2.4 - Reconstruções paleogeográficas para as megassequências continental (sin-rift I: Dom João; sin-rift II: Rio da Serra; sin-rift III: Buracica-Jiquiá); transicional evaporítica (Alagoas); e marinha (Albiano), conforme Chang *et al.*, 1990.

2.4.1.1 - Sequência sin-rift I

Durante a Idade Dom João, teve início o processo de ruptura do continente Gondwana. Nessa fase, ao norte da Bacia do Espírito Santo, formou-se uma enorme depressão conhecida como Depressão Afro-Brasileira, resultante de adelgaçamento crustal e/ou falhamentos incipientes, provocados por deformações na crista de intumescência (Ponte *et al.*, 1971; *apud* Asmus & Porto, 1972). Essa depressão foi rapidamente preenchida por leques aluviais de clima árido e depósitos fluviais, com quantidade subordinada de evaporitos, representando ambientes locais de lagos interiores.

Segundo Estrella (1972), na região atualmente ocupada pelas bacias do Espírito Santo e Campos, formou-se um centro de intumescência, sendo as bacias jurássicas sinclinais periféricos formados ao redor desse centro. Essa hipótese explica a atual distribuição dos sedimentos jurássicos, podendo-se ainda justificar a sua ausência na parte sul da Bacia de Santos e Bacia de Pelotas, nas quais, devido ao intenso vulcanismo cretácico, poderia existir outro centro de intumescência.

2.4.1.2 - Seqüência sin-rift II

A fase principal do *rift* ocorreu durante o Cretáceo Inferior (idades Rio da Serra e Aratu), gerando por toda a margem continental uma série de meio-*grabens* de rápida subsidência. Na porção norte, formaram-se lagos profundos que foram preenchidos por folhelhos ricos em matéria orgânica, e turbiditos associados a clásticos flúvio-deltaicos, tendo ainda, em menor proporção, calcarenitos ostracoidais relacionados a inundações episódicas. Na parte sul, o vulcanismo foi muito ativo, sendo a seqüência vulcano-sedimentar formada por derrames de basaltos, clásticos vulcânicos e rochas sedimentares com idades variando de 120 a 130 milhões de anos (Chang *et al.*, 1990).

2.4.1.3 - Seqüência sin-rift III

Esse intervalo foi depositado durante os andares Buracica e Jiquiá, caracterizando-se pela presença de coquinas e concentrações fossilíferas de grande extensão lateral, formadas por calcarenitos e calcirruditos compostos por ostracodes, pelecípodos e gastrópodes, intercalados com material siliciclástico de granulação grossa a fina.

2.4.2 - Megasseqüência transicional evaporítica

A megasseqüência transicional evaporítica foi depositada durante o Andar Alagoas (Aptiano), sendo formada por sedimentos típicos de ambientes de transição entre continental e marinho, depositados sobre uma ampla discordância pós-*rift*, responsável pela erosão generalizada pela topografia pré-aptiana (Schaller, 1969; Asmus, 1975). A diminuição da intensidade tectônica resultou no equilíbrio entre o nível de base erosional do continente e o nível de base deposicional dessas bacias.

Os sedimentos correspondentes a essa fase são constituídos por evaporitos, sedimentos clásticos e carbonáticos, ou simplesmente por carbonáticos e finas camadas de anidrita. Esse intervalo encontra-se distribuído ao longo de toda a margem continental leste, a partir da Bacia de Santos até a Bacia de Sergipe/Alagoas. A sua deposição foi condicionada pelo complexo Alto de Florianópolis - Dorsal de São Paulo

(ou cadeia Rio Grande - Walvis, segundo Asmus & Ponte, 1971; *apud* Estrella, 1972) que, provavelmente, atuou como barreira restritiva ao completo avanço do mar.

O intervalo evaporítico é pouco conhecido, com exceção daquele da porção norte, que foi estudado na Bacia de Sergipe/Alagoas, destacando-se os trabalhos de Fonseca (1973) e de Carvalho *et al.* (1974), sobre os evaporitos Ibura, e de Florencio (1996a), sobre os evaporitos Paripueira.

2.4.3 - Megasseqüência marinha

A megasseqüência marinha desenvolveu-se a partir do Albiano, por ocasião do término das condições restritivas impostas até o final do Aptiano, quando, provavelmente, ocorreu a ruptura completa da crosta continental, resultando na implantação de condições francamente marinhas (Estrella, 1972).

Assim, os evaporitos foram sucedidos por uma extensa plataforma carbonática, formada por calcários de águas rasas, com oncolitos, pelotas, oolitos e bioclastos. Sistemas clásticos do tipo *fan-delta* são observados ao longo da antiga linha de costa, intercalados com rochas carbonáticas.

Ao fim do Albiano, a deposição carbonática foi sucedida por uma seqüência composta por calcilutitos, margas e folhelhos, depositados em um ambiente gradativamente mais profundo (Koutsoukos & Dias-Brito, 1987). Nessa fase, a sedimentação turbidítica arenosa está presente em toda a margem, principalmente na Bacia de Campos.

A partir do Cenozóico, teve início uma fase regressiva, cujo ponto máximo foi atingido no Oligoceno (Asmus & Porto, 1972). Na margem sul, predominam os sistemas siliciclásticos e, ao norte, desenvolveram-se plataformas carbonáticas (Chang *et al.*, 1990).

2.5 - Os evaporitos da margem leste

A presença de evaporitos nas bacias da margem leste brasileira é resultado de um evento de grande abrangência, relacionado com as primeiras fases do processo de migração continental divergente, aliado às condições marinhas restritivas, desenvolvidas numa fase de extrema aridez, durante a formação do Oceano Atlântico Sul. Situação semelhante é reconhecida na margem oeste africana, onde também são

Na Bacia de Santos o intervalo evaporítico encontra-se inserido na Formação Ariri, sendo caracterizado por espessos pacotes de halita associados a anidrita, calcários, margas e folhelhos. As datações apontam uma idade neo-Alagoas (Pereira & Feijó, 1994). As reconstituições halocinéticas, para esse intervalo, mostram espessuras máximas originais da ordem de 2.000 a 2.500 metros (Pereira & Macedo, 1990).

Na Bacia de Campos os evaporitos estão inseridos no Membro Retiro (Formação Lagoa Feia), compostos essencialmente por halita e anidrita. As halitas, em geral remobilizadas, formam grandes domos de sal que perfuram as rochas sobrejacentes. Na interpretação paleoambiental para essa seção foi reconhecida, também, a presença de planícies de *sabkhas* (Rangel *et al.*, 1994).

Fig. 2.6 - Coluna sedimentar esquemática do *rift* proto-Atlântico Sul (Asmus, 1975).

Na Bacia do Espírito Santo os evaporitos são encontrados na Formação Mariricu, representados por anidrita, halita e folhelhos intercalados, de idade neo-Alagoas, depositados em *sabkhas* e sub-bacias restritas. Suas maiores espessuras são registradas na plataforma continental, em áreas de intensa halocinese, formando domos e muralhas de sal (Vieira *et al.*, 1994).

Nas bacias correspondentes a Bahia Sul (Camamu e Almada), os evaporitos estão inseridos no Membro Igrapiúna, com mais de 200 metros de halita e anidrita associadas a calcários, dolomitos e folhelhos intercalados. Nas porções mais profundas, a presença de halocinese é reconhecida por meio de dados sísmicos. As datações, com base em palinomorfos, posicionam esses depósitos no Andar Alagoas (Netto *et al.*, 1994).

Na Bacia de Sergipe/Alagoas são registrados espessos pacotes evaporíticos, principalmente de halita, com sedimentos clásticos intercalados (Florencio, 1995). A idade desses depósitos é considerada como sendo aptiana, o que corresponde ao Andar Alagoas segundo a definição cronoestratigráfica local (Regali & Viana, 1989). Tal idade teve como base o estudo de palinomorfos encontrados em clásticos intercalados aos pacotes de halita nessa bacia (Caldas & Florencio, 1994).

Os evaporitos Paripueira ocorrem na porção inferior da Formação Muribeca (Membro Maceió), sendo considerados mais antigos que aqueles da fase Ibura (Uesugui, 1987). Correspondem a camadas relativamente espessas de halita, com rochas carbonáticas e siliciclásticos intercalados. Os evaporitos Ibura estão relacionados a uma nova fase evaporítica (Carvalho *et al.*, 1974) que, na Bacia de Sergipe/Alagoas, constitui-se no Membro Ibura da Formação Muribeca, sendo bem distintos dos evaporitos Paripueira, tanto nos tipos litológicos quanto nas relações estratigráficas.

Admite-se que os evaporitos Paripueira sejam equivalentes aos demais existentes nas bacias da margem leste, com base em inferências paleogeográficas, geológicas e geofísicas (Ojeda, 1981). Assim, seus equivalentes estariam situados além da borda da plataforma atual, correspondendo, por exemplo, aos alinhamentos diapíricos nas bacias de Santos e do Espírito Santo.

Pelos dados apresentados verifica-se que a distribuição dos evaporitos nas bacias sedimentares da margem leste brasileira esteve ligada à formação de um proto-oceano de circulação restrita, durante o Cretáceo Inferior, condicionado a barreiras topográficas pré-existentes, tendo como limites a Bacia de Sergipe/Alagoas, ao norte, e a Bacia de Santos, ao sul.

3 – ASPECTOS RELEVANTES DA SEDIMENTAÇÃO EVAPORÍTICA

3.1 – Gênese de depósitos evaporíticos

Os evaporitos são rochas formadas a partir da intensa evaporação de uma massa d'água, em bacias de circulação restrita que, em condições climáticas apropriadas, resulta na concentração de salmouras que passam a precipitar os sais nelas dissolvidos. Para que isso ocorra é necessária a existência de um ambiente essencialmente árido, onde a taxa de evaporação supere o influxo d'água, seja esta de origem marinha, fluvial, meteórica ou subterrânea (Hardie, 1984; Sonnenfeld, 1992). Além do clima apropriado, também é necessário um dispositivo que isole a salmoura, para permitir a sua progressiva concentração.

Os termos “salmouras” e “evaporitos” têm sido mencionados na literatura para descrever, respectivamente, soluções concentradas de íons e precipitados químicos a partir dessas soluções.

De acordo com Sonnenfeld (1984), o termo “evaporitos” está restrito a rochas geradas a partir da concentração de soluções aquosas, ou seja, correspondem a precipitados hidroquímicos de soluções concentradas por evaporação, formados com ou sem influência biogênica. Estão intimamente interrelacionados com as condições geológicas e ambientais de sua formação, ocorrência geográfica, propriedades físicas e químicas. Tais rochas representam um importante grupo de depósitos sedimentares, com relevante valor econômico (Parrish & Barron, 1986).

A geração de minerais evaporíticos pode ocorrer em ambientes marinhos e não marinhos. Esses ambientes podem estar localizados em regiões polares, lagos continentais, aquíferos subterrâneos e regiões marinhas subtropicais. Nos ambientes marinhos, a concentração de salmouras e a formação de evaporitos, podem ocorrer em zonas costeiras de intermaré, zonas de supramaré (*sabkhas*), lagunas alimentadas pelo influxo direto do mar e lagunas costeiras alimentadas pela percolação de água através de barreiras naturais (Handford, 1991). Também há registros de evaporitos em bacias profundas e em bacias situadas abaixo do nível do mar, mas com influxo do oceano (Javor, 1989).

A contínua evaporação aumenta, gradativamente, a concentração dos sais em solução, os quais são precipitados, seletivamente, à medida que são atingidos os seus respectivos pontos de saturação. Assim, os sais menos solúveis, como os carbonatos e

sulfatos, são os primeiros a serem depositados, seguidos pelos sais de cloreto de sódio, potássio e magnésio, respectivamente, em ordem crescente de solubilidade.

Para a formação de espessos depósitos torna-se necessária a constante reposição da água extraída por evaporação, durante um significativo período de tempo. Braitsch (1971) considera que o influxo da água do mar é o mais importante fator dentre as diversas hipóteses que procuram explicar as origens de depósitos salinos de grande espessura. Rápidos influxos ocasionais, com salmouras mais diluídas, podem conter argilas em suspensão que irão se dispersar por toda a bacia e, ao decantar, vão formar extensos marcadores de tempo que podem ser utilizados para correlação estratigráfica detalhada (Sonnenfeld, 1984).

A maioria dos depósitos evaporíticos, de relevante importância econômica, foi formada a partir da concentração da água do mar, em bacias de circulação restrita, separadas do oceano por barreiras que impediam a sua livre circulação (Stewart, 1963). Depósitos menos significativos podem ser gerados pela evaporação de lagos no interior dos continentes, denominados de *playa lakes* ou “lagos salinos dessecados” (Valyashko, 1972), alimentados por cursos d’água de composição iônica de natureza diversa.

A água do mar possui, em média, uma concentração salina de 35 gramas por litro e composição aproximadamente constante. As águas continentais possuem concentrações e composição variáveis que dependem da natureza das rochas da área de drenagem (Ayora *et al.*, 1993). Os íons mais comuns presentes na água do mar, representados por Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , Cl^- e SO_4^{--} , diferem muito dos teores médios encontrados nos principais rios do mundo (Tab. 3.1 e 3.2).

Apesar desses depósitos terem sido originados de uma mesma fonte (no caso o oceano), cuja composição não teve variações significativas desde o Pré-Cambriano (Baar, 1977; Holser, 1979), os evaporitos mostram uma diferenciação na sua composição química. Tal fato é atribuído principalmente às diferentes solubilidades dos componentes originais da água do mar (Richter-Bernburg, 1972). Assim, em condições de intensa evaporação os componentes menos solúveis são precipitados, enquanto aqueles altamente solúveis permanecem em solução na salmoura. Outros motivos estariam ligados às diferentes condições ambientais de evaporação da água do mar, além de mudanças pós-deposicionais na composição original dos precipitados.

Tab. 3.1 - Teor médio dos sais contidos na água do mar (Baar, 1977).

Íon	Teor (ppm)	Íon	Teor (ppm)
Cl^-	18.980	Ca^{++}	400
Na^+	10.560	K^+	380
SO_4^{--}	2.650	HCO_3^-	140
Mg^{++}	1.270	Br^-	65

Tab. 3.2 - Composição média dos principais rios do mundo, conforme Livingston (1963), *apud* Holser (1979).

Íon	Teor (ppm)	Íon	Teor (ppm)
Cl^-	7,5	Ca^{++}	15
Na^+	6,3	K^+	2,3
SO_4^{--}	11	HCO_3^-	58
Mg^{++}	4,1	SiO_2	13

A precipitação dos evaporitos segue uma seqüência bem definida, de acordo com a solubilidade de cada componente (Fig. 3.1 e 3.2). Os principais depósitos, formados a partir da progressiva evaporação da água do mar, são: calcário, gipsita, halita e sais de potássio e magnésio, tais como silvita, carnalita e taquidrita.

Fig. 3.1 - Composição normativa dos sais dissolvidos na água do mar, em função de sua solubilidade (adaptado de Carvalho *et al.*, 1974).

Fig. 3.2 - Relação entre a salmoura original e a concentração necessária para precipitar os principais minerais evaporíticos (adaptado de Blatt *et al.*, 1980).

3.1.1 - Princípios fundamentais da sedimentação evaporítica

Os primeiros estudos sobre a formação de depósitos evaporíticos foram desenvolvidos na metade do século dezenove, com os experimentos do químico italiano Usiglio (Warren, 1991), que estabeleceu a ordem de cristalização de sais a partir da concentração da água do mar, e de Van't Hoff (Braitsch, 1971), com a finalidade de determinar o campo de estabilidade e controles de precipitação dos minerais. A idéia de que espessas camadas de evaporitos eram formadas em bacias com barreiras, que impediam o livre influxo de salmouras, foi mencionada por Bischof em 1854 e, posteriormente, explicada por Ochsenius, em 1877 (Raup, 1970; Figueiredo, 1979), quando apresentou estudos sobre a "Teoria de Barras". Este modelo baseava-se no princípio de que a restrição à circulação normal das águas seria estabelecida por barreiras posicionadas na área de influxo e a deposição salina ocorreria em lagunas rasas.

Na formação desses depósitos, segundo Hite (1970), três princípios básicos devem ser considerados:

- a) as fácies evaporíticas obedecem a uma ordem de precipitação;
- b) uma bacia evaporítica sempre sofre refluxo;
- c) o refluxo é controlado, principalmente, pela variação do nível do mar.

Durante a evaporação, com o aumento da concentração dos íons em solução, ocorre uma precipitação seletiva dos sais à medida em que são atingidos os seus respectivos pontos de saturação. Assim, são depositados, inicialmente, os calcários e sulfatos, seguidos pelos sais mais solúveis, em ordem crescente de solubilidade. Tal sucessão vertical também pode ser observada lateralmente, conforme Lei de Walther (Kendall, 1988), com calcários e sulfatos próximos à entrada do mar, e os mais solúveis, tais como os cloretos, nas áreas centrais e distais da bacia. Nessas áreas centrais e distais podem se formar depósitos economicamente importantes de potássio e magnésio.

3.1.2 - Formação dos cristais

A formação dos cristais pode ocorrer de várias maneiras, destacando-se três situações distintas: a) na interface ar / salmoura; b) na interface salmoura / sedimento; c) no interior dos sedimentos (Handford, 1991).

A formação de cristais na interface ar / salmoura é o resultado do aumento da salinidade em consequência da evaporação. Os cristais assim formados, denominados de *hopper* (Dellwig, 1955; Shearman, 1978), são constituídos por um conjunto de formas piramidais, de base invertida, que flutuam até decantarem no fundo da bacia, em decorrência do peso ou turbulência da água. Tais cristais constituem um dos principais modos de formação de halita nas salinas (Fig. 3.3).

Fig. 3.3 - Forma dos cristais *hopper* de halita e esquema de deposição (Shearman, 1978).

Na interface salmoura / sedimento, a formação de cristais no fundo da bacia deve-se ao movimento das salmouras mais densas, da superfície para baixo e da margem para o centro da bacia (Fig. 3.4). Tais salmouras, ao se resfriarem ao longo do percurso, cristalizam-se e exibem estruturas específicas, cujas características dependem da distância percorrida pela salmoura saturada e da profundidade (Carvalho *et al.*, 1974).

Os cristais gerados no interior dos sedimentos são aqueles de regiões de *sabkhas*. Essas regiões correspondem a planícies costeiras que margeiam o mar, ou lagoa hipersalina, numa região árida (Fig. 3.5). Nesse ambiente, a salmoura intersticial, por evaporação, aumenta de salinidade na zona capilar, provocando a precipitação dos sais mais solúveis nos poros dos sedimentos, tendo início com aragonita, prosseguindo com gipsita e halita, conforme a solubilidade relativa (Renfro, 1974).

A cristalização também pode ocorrer em vazios ou cavidades de dissolução, no preenchimento de fraturas (forma fibrosa), ou como eflorescências salinas (Handford, 1991).

Fig. 3.4 - Esquema de formação de cristais de halita no fundo da bacia evaporítica (Carvalho *et al.*, 1974).

Fig. 3.5 - Deposição em ambiente de *sabkha* (Renfro, 1974).

Eflorescências salinas, formando crostas na superfície, são componentes presentes em superfícies lamosas de salinas lacustrinas modernas e *sabkhas* costeiras, constituindo-se numa importante feição em solos salinos (Handford, 1991). Essas crostas são formadas pela completa evaporação da água, existente nos espaços porosos do solo, e sua mineralogia reflete a assembléia dos solutos contidos na água que, comumente, contém uma variedade de minerais altamente solúveis (Eugster & Hardie, 1978). As eflorescências mais comuns são formadas, principalmente, por halita e por gipsita. Ocorrem também crostas salinas formadas por trona, boratos e nitratos (Smoot & Castens-Seidell, 1994). Em decorrência da alta solubilidade, as crostas salinas raramente são preservadas e recebem pouca atenção nos estudos de ambientes salinos atuais.

3.1.3 – Modelos deposicionais

Diversos modelos têm sido propostos para explicar a gênese dos depósitos evaporíticos. O primeiro foi apresentado no século dezenove, com a famosa **bar theory**, segundo a qual a deposição evaporítica ocorria em lagoas rasas, com circulação restrita, controlada por uma barreira topográfica que impedia a livre comunicação com o mar (Ochsenius, 1877; *apud* Raup, 1970; Figueiredo, 1979). Posteriormente, vários modelos foram apresentados, dentre os quais o de bacias barradas de águas rasas e águas profundas, de plataformas rasas, de *sabkhas* e de bacias múltiplas.

a) Bacia barrada

Trata-se de um modelo muito simplificado, onde a bacia evaporítica teria uma barreira restritiva impedindo a livre circulação com o mar aberto. Este modelo admite dois padrões: a) padrão olho de boi e b) padrão gota de lágrima (Fig. 3.6).

Fig. 3.6 - Padrões de bacias barradas: a) olho de boi; b) gota de lágrima (Schreiber, 1986).

O padrão olho de boi (*bull's eye pattern*), também denominado de modelo de bacia profunda dessecada, pressupõe uma evaporação direta de certa quantidade de água, sem nenhum aporte durante todo o processo de evaporação, até a completa dessecação (Schmalz, 1970; *apud* Schreiber, 1986).

Assim, na primeira fase (fase I), apenas pequenas quantidades de carbonatos são precipitadas devido à pouca quantidade de íons HCO_3^- presentes na água do mar. Na segunda fase (fase II) ocorre a precipitação de CaSO_4 . Na terceira fase (fase III), com o aumento da concentração, são formadas as halitas. Finalmente, na última fase (fase IV), são precipitados os cloretos de Na, K e Mg, onde a bischofita ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) é o último mineral a se cristalizar devido a sua alta solubilidade.

Durante o período seco dos anos 50 o Golfo de Kara Bogaz foi interpretado como tendo uma distribuição aproximadamente circular, com depósitos de sulfatos de cálcio e de sódio, bem como de halita, sendo considerado um pequeno exemplo de modelo de sedimentação evaporítica do tipo *bull's-eye* (Sonnenfeld, 1984).

No padrão gota de lágrima (*tear drop pattern*) as perdas efetivas por evaporação são continuamente compensadas por influxo d'água, porém, o refluxo das salmouras concentradas para o oceano é pouco ou até mesmo inexistente. O nível da bacia de evaporação é pressuposto como sendo o nível do mar. Esse tipo de bacia poderia ser completamente preenchida por evaporitos (Baar, 1977).

Para o modelo acima, a precipitação prevista na fase I deve ter lugar próximo à zona de influxo, com a deposição de carbonatos. Na fase II a precipitação dos sulfatos ocorreria em uma região intermediária, sendo os demais sais (halita principalmente) formados apenas próximos à porção mais distal da bacia (Barr, *op. cit.*). Assim, observa-se, nesse modelo, que a concentração cresceria regularmente à medida que aumentasse o afastamento da entrada.

Hite (1970) deu especial atenção ao modelo de bacia barrada, destacando os princípios da deposição evaporítica adaptados às fases transgressivas e regressivas na evolução de uma bacia, enfatizando os efeitos dos bancos de carbonatos e recifes sobre o regime de influxo-refluxo. Tais princípios são utilizados para explicar a sedimentação de evaporitos na Bacia de Paradox, Estados Unidos.

b) Bacias múltiplas

Esse modelo é representado por um conjunto de bacias interconectadas, com várias barreiras, o que permitiria uma precipitação fracionada ao longo do trajeto da salmoura. Assim, nas bacias proximais, seriam depositados os carbonatos. Já os sais mais solúveis, numa concentração progressiva, seriam precipitados nas bacias mais afastadas da ligação com o oceano aberto (Fig. 3.7). Admite-se que a comunicação entre as diversas sub-bacias poderia ser controlada por movimentos tectônicos nas zonas de barra (Baar, 1977) ou, numa situação menos provável, a hipótese de ressacas também é admitida (Carvalho *et al.*, 1974).

Fig. 3.7 - Seção esquemática de bacias múltiplas (Carvalho *et al.*, 1974, adaptado por Lima Filho, 1999).

Evidências dessa precipitação fracionada têm sido observadas nos grandes depósitos evaporíticos, como o potássio do Reno Superior, nos evaporitos Prairie, do Canadá Ocidental, dentre outros (Braitsch, 1971; Sonnenfeld, 1984).

c) *Sabkha*

O termo *sabkha* é a tradução literal do árabe que significa “superfície plana” e foi sugerido por Kinsman (1969) para ser utilizado na literatura geológica. O modelo de *sabkha* procura explicar a cristalização de sais nos sedimentos porosos, das regiões de planícies costeiras ou margens de lagos hipersalinos, em uma região árida.

O crescimento desses sais, nos interstícios porosos, tende a perturbar a textura e estrutura do sedimento hospedeiro, até que este passa a constituir um elemento secundário, restringindo-se a ocupar espaços em torno dos corpos neoformados.

O termo *sabkha* foi usado, inicialmente, na década de 60, somente para a deposição de gipsita/anidrita, distribuídas ao longo da *Trucial Coast*, zona costeira do Golfo Árabe (Butler, 1969; Shearman, 1978). Porém, o processo de cristalização pode ocorrer em qualquer etapa de maturação da salmoura, formando, por exemplo, nódulos de halita, nódulos de carnalita e cristaloblastos.

Uma região de *sabkha* é bem diferente de uma salina costeira (Fig. 3.8). No primeiro caso, a deposição ocorre no interior dos sedimentos, enquanto no segundo caso, a deposição é subaquosa (Warren & Kendall, 1985). O termo “continental playa” tem sido utilizado como sinônimo de *sabkha* continental (Kendall, 1984).

Fig. 3.8 - Modelos deposicionais: região de *sabkha* (A) e de salina costeira (B), (conforme Renfro, 1974).

3.1.4 – Composição dos evaporitos

A composição do material dissolvido na água do mar, calculada em sais normativos, pode ser apresentada em função de dois parâmetros: proporção e solubilidade. Dessa forma, observa-se que a frequência de deposição de sais aumenta com a proporção e com a diminuição da solubilidade de cada sal.

A mineralogia dos evaporitos precipitados na fase da salmoura mais concentrada (fase IV), com sais de K e Mg, é tão complexa quanto as condições físico-químicas dessa fase. Isso se deve, parcialmente, ao fato de que muitos constituintes menores da salmoura permanecem em solução, até que seja alcançado o estágio final de concentração. Outros minerais raros, ocasionalmente encontrados em depósitos evaporíticos, cristalizam-se a partir de soluções que tiveram acesso a evaporitos de outras formações (Baar, 1977).

Embora tenham sido registrados cerca de quarenta sais em depósitos evaporíticos, mais da metade desse número está freqüentemente presente em quantidades pouco maiores que traços. Alguns são sais simples, outros são duplos ou mesmo mais complexos, podendo ser anidros ou hidratados (Borchert & Muir, 1964).

Desses sais, os mais comuns (excluindo-se calcita, dolomita e magnesita) são os sulfatos de cálcio (gipsita e anidrita). O próximo, em ordem de abundância na natureza é a halita, comumente conhecido como sal de rocha, sal comum ou sal-gema. Os sais de potássio são mais escassos, destacando-se a silvita e a carnalita como os mais importantes. Os boratos são minerais menos comuns e, geralmente, são de origem não marinha (Borchert & Muir, *op. cit.*).

A alternância de fases de alta e baixa salinidades, em uma bacia evaporítica, divide a seqüência em intervalos ou ciclos correlacionáveis. Os ciclos de primeira ordem são definidos pelo aumento da salinidade ambiental, desde o seu mais baixo teor, até o mais alto, voltando novamente para o mais baixo (Carvalho, 1987b). Cada ciclo é marcado, no topo e na base, por camadas contínuas de folhelhos pretos, altamente orgânicos, extremamente favoráveis à geração de hidrocarbonetos. O seu conteúdo elevado em H₂S torna-os preferenciais para depósitos de sulfetos metálicos. Os ciclos evaporíticos formam a peça-base para o estudo sistemático e o entendimento paleogeográfico de uma bacia evaporítica (Carvalho, *op. cit.*).

3.1.5 – A importância dos teores de bromo

O teor de bromo na água do mar é de aproximadamente 65 ppm, sendo considerado muito baixo se comparado ao teor de cloro que, em média, é de 18.980 ppm. Tais valores têm se mantido praticamente constantes desde o final do Pré-Cambriano (Baar, 1977), não havendo mudanças significativas na relação Cl/Br até os dias atuais (Holland, 1972 e 1974; Horita *et al.*, 1991).

Ao ocorrer a evaporação, a salmoura conserva o bromo na sua forma iônica e, como a sua solubilidade é elevada, apenas uma pequena fração de bromo (Br^-) precipita-se com os cristais de sal, substituindo o cloro, aumentando gradualmente a sua concentração na salmoura residual (Valiashko, 1956). Portanto, na seqüência de precipitados também haverá um acréscimo gradual do teor de bromo, pois o total desse íon na fase sólida dos cloretos dependerá da sua concentração na solução original (Raup & Hite, 1978).

Com base nestes conhecimentos pode-se relacionar o teor de bromo de um cloreto ao teor de bromo da salmoura, a partir da qual esse cloreto se cristalizou. Tal relação pode ser expressa por um coeficiente de distribuição (ou partição), que representa a percentagem em peso de Br^- na fase líquida, a partir da qual ocorreu a cristalização (Braitsch, 1971). Ou seja, o coeficiente representa a relação entre o conteúdo de bromo no precipitado e na salmoura, sendo diferente para cada evaporito e até para um mesmo mineral.

3.2 – O Cristal de halita

A halita é formada por íons de cloro e de sódio, unidos por ligação iônica. Estruturalmente pertence ao sistema cristalino cúbico, apresentando seus cátions e ânions em coordenação octaédrica, formando uma rede cúbica de faces centradas. A halita, também conhecida por “sal-gema” ou “sal comum”, possui as seguintes propriedades: quando pura é incolor ou branca, hábito normalmente cúbico, raramente {111}, clivagem perfeita {100}, fratura conchooidal, dureza relativamente baixa (2,5), densidade moderada (2,164 g/cm³) e baixo índice de refração (Braitsch, 1971; Dana & Dana, 1997).

A morfologia de crescimento dos cristais de halita depende, em parte, do nível de saturação da solução e da taxa de difusão iônica (Handford, 1991). Quando gerados

sob condições de baixa saturação, o crescimento dos cristais de NaCl é uniforme, formando cubos perfeitos e transparentes, sem inclusões fluidas. Sob condições de elevadas saturações predomina o crescimento de arestas e vértices, como resultado do menor grau de coordenação dos íons situados nessas posições. Com isto são gerados cristais cúbicos de faces deprimidas e escalonadas, conhecidos como *skeletal hopper crystals*, caracterizados por conterem abundantes inclusões fluidas (Dellwig, 1955).

As inclusões fluidas são pequenas cavidades preenchidas por salmouras, formadas durante o crescimento do cristal. Sua geração está condicionada a diversas variáveis, responsáveis pelo crescimento do cristal. Em sua fase inicial, as inclusões fluidas exibem cavidades irregulares, geralmente alongadas segundo $\{100\}$. Posteriormente, com o equilíbrio do sistema cristal-solução, as paredes são reorganizadas para configuração de cavidades cúbicas regulares (*negative crystals*), (Fig. 3.9). Quando abundantes, as inclusões fluidas representam episódios de rápido crescimento do cristal. Em zonas com poucas inclusões, a taxa de crescimento pode ser mais lenta (Handford, 1991).

Fig. 3.9 - Esquema de crescimento de um cristal de halita do tipo *hopper*.
(Garcia-Veigas, 1993)

Garcia-Veigas (1993) reconhece três tipos distintos de inclusões fluidas, presentes nas rochas salinas (Fig. 3.10), abaixo caracterizadas.

a) Inclusões fluidas primárias (P) - são inclusões geradas durante a fase de crescimento cristalino, e estão orientadas em paralelamente às faces de crescimento, marcando texturas deposicionais. A composição dos fluidos é idêntica àquela da salmoura original, onde os cristais foram formados. A maior parte das inclusões

correspondentes a texturas primárias exibem cavidades cúbicas, preenchidas por líquido ou como inclusões multifásicas em fase sólida.

b) Inclusões fluidas secundárias (S) - essas inclusões são formadas por fluidos que não correspondem àqueles da salmoura original, aprisionados durante o desenvolvimento do cristal. A distribuição dessas inclusões pode coincidir com os planos de crescimento, porém, geralmente, se mostram orientadas seguindo direções de microfraturas, muitas vezes atravessando vários cristais, podendo ocorrer sem qualquer orientação, preenchendo cavidades de dissolução. Podem ter a mesma composição das salmouras originais, no caso de não ter havido a interferência de outros tipos de fluidos, ou reação com outras fases minerais, e podem ser resultantes da remobilização dos fluidos contidos nas inclusões primárias.

c) Inclusões fluidas intercristalinas (I) - essas inclusões estão posicionadas nos bordos de grãos, constituindo cavidades de pequeno volume (diâmetro menor que $10\mu\text{m}$), com morfologias vermiculares. Tais inclusões representam processos de recristalização, e sua composição pode ser variável ao longo do tempo, em consequência das reações fluido-fluido e fluido-mineral.

Fig. 3.10 - Distribuição de diferentes tipos de inclusões fluidas em um cristal de halita. P = primárias, S = secundárias e I = intercristalinas (Garcia-Veigas, 1993).

A maior parte das inclusões correspondente a texturas primárias ocorre como cavidades cúbicas (*negative crystals*), preenchidas unicamente por líquido ou como inclusões multifásicas em fase sólida. Nos sais recristalizados, submetidos à ação de fluidos diagenéticos, hidrotermais ou metamórficos, pode-se reconhecer inclusões fluidas secundárias que, ao serem resfriadas, geram minerais de diferentes naturezas tais como a bischofita (Fabricius, 1989; *apud* Garcia-Veigas, 1993).

4 - OS EVAPORITOS DA BACIA DE SERGIPE / ALAGOAS

4.1 - Trabalhos anteriores

São poucas as publicações que tratam pormenorizadamente da geologia dos sais na Bacia de Sergipe-Alagoas, principalmente dos evaporitos Paripueira. A maioria refere-se às ocorrências salíferas da margem continental brasileira, de forma indistinta, tal como Estrella (1972) que menciona a sua distribuição ao discutir o estágio *rift* nas bacias marginais, ou Asmus & Porto (1972), Asmus (1975), e Asmus & Porto (1980) quando expõem suas idéias sobre o processo evolutivo dessas áreas, além de Guerra (1989) quando comenta a estruturação da Bacia do Espírito Santo. Trabalhos específicos são creditados a empresas de mineração, em relatórios internos, com divulgação restrita.

O estudo pioneiro de sais solúveis na Bacia de Sergipe/Alagoas foi realizado por Teixeira & Saldanha (1968), baseado em dados de gravimetria e de poços perfurados pela PETROBRÁS, no qual são apresentadas as áreas de ocorrência, posição estratigráfica, litologia e reservas estimadas.

Schaller (1969), considerando os trabalhos realizados pela Comissão de Revisão Estratigráfica da Petrobrás, para a Bacia de Sergipe/Alagoas, apresenta os evaporitos Paripueira como uma designação informal, correspondendo a camadas de sal-gema que ocorrem no Membro Maceió, base da Formação Muribeca, sendo diagnóstica para esta unidade.

Rarick & Richner (1970), em relatório reservado, apresentam uma discussão sobre as características do depósito de sal-gema na área de Maceió, descrevendo a litologia do Poço 4 da Salgema Mineração, além de representar a geometria dos corpos evaporíticos nessa área, a partir de dados de sete poços.

Fonseca (1973) descreve os ciclos evaporíticos dos sais Ibura, apresentando mapas e seções diversas, com teores e reservas de KCl.

Deve-se a Carvalho *et al.* (1974) a realização de um criterioso estudo sobre os evaporitos Ibura que ocorrem em Sergipe, onde são discutidos os aspectos genéticos, mineralógicos, estratigráficos, estruturais e geoquímicos, além de uma breve distinção entre estes e os sais Paripueira.

Ojeda & Fugita (1974), interpretando a geologia regional da Bacia de Sergipe/Alagoas, reconstituíram a sua história geológica, desde o Pré-Cambriano ao Recente, sugerindo um esboço paleogeográfico para a Idade Alagoas, com indicações das prováveis áreas afetadas pelas primeiras incursões marinhas que resultaram na deposição dos evaporitos.

Szatmari *et al.* (1979) fazem uma comparação faciológica entre os evaporitos paleozóicos da Bacia do Amazonas e aqueles do Cretáceo de Sergipe.

Ojeda (1981), ao discutir a estrutura, estratigrafia e evolução das bacias marginais brasileiras, destaca a seqüência evaporítica, citando a Bacia de Sergipe/Alagoas como bacia-tipo para o intervalo evaporítico que ocorre ao longo da margem continental brasileira, dando ênfase às duas fases evaporíticas, com considerações sobre litologia, gênese, idade e correlações.

Amaral & Melo (1984) descrevem o depósito de sal-gema de Bebedouro, em Maceió, apresentando algumas características do minério, teores e reservas, método de lavra, construção dos poços e desenvolvimento das cavidades geradas pela dissolução do sal.

Cerqueira *et al.* (1986) apresentam uma avaliação, em termos de geologia e mineração, da jazida de potássio de Santa Rosa de Lima (Sergipe), estratigraficamente ligada aos evaporitos Ibura, avaliando suas reservas e perspectivas de lavra.

Uesugui (1987) discute a idade dos evaporitos Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe/Alagoas, com base no zoneamento bioestratigráfico adotado pela PETROBRÁS, confirmando a existência de dois intervalos evaporíticos distintos (Paripueira e Ibura) e afirmando que o primeiro depositou-se no Eo-Mesoalagoas.

Regali (1989) faz comparações em termos de idade entre os evaporitos da plataforma do Ceará e demais bacias nordestinas, confirmando sua contemporaneidade com os sais Ibura de Sergipe, baseando-se em dados palinológicos e admitindo serem estes mais novos que os sais Paripueira.

Caldas & Florencio (1992 e 1994), a partir de dados palinológicos obtidos em folhelhos intercalados aos sais Paripueira, registram, dentre outras, a presença da forma-guia P-240, confirmando para esses sais a Idade Alagoas.

Florencio (1995), Melo & Florencio (1995), Florencio (1996a e 1996b) e Florencio *et al.* (2000) apresentam dados petrográficos preliminares sobre o intervalo Paripueira em Alagoas, discutindo alguns aspectos geoquímicos, gênese, estratigrafia e mineração desses sais.

4.2 - A Bacia de Sergipe / Alagoas

A Bacia de Sergipe / Alagoas está situada na região Nordeste do Brasil, limitada pelos paralelos 9° e 11°30' de latitude sul, e meridianos 35° e 37° de longitude oeste, aproximadamente, abrangendo a parte leste dos estados de Sergipe e de Alagoas (Fig. 4.1). A bacia possui uma forma alongada, com direção N 45° E, extensão de 350 km e largura média de 35 km na porção emersa. Considerando-se a isóbata de 2.000 metros, a área total da bacia atinge 34.600 km², dos quais cerca de 12.000 km² correspondem à parte emersa (Lana, 1990).

Fig. 4.1 - Mapa de localização da Bacia de Sergipe / Alagoas (adaptado de Ojeda e Fugita, 1974).

4.2.1 - Estratigrafia

A estratigrafia da Bacia de Sergipe/Alagoas foi reestruturada em 1968 pela Comissão de Revisão Estratigráfica (CRE) da Petrobrás, em virtude dos problemas criados com as definições existentes, por ocasião da fase pioneira dos estudos da bacia (Schaller, 1969).

Alguns autores dividem a bacia em duas áreas distintas, denominadas de **Bacia de Sergipe** e **Bacia de Alagoas**, individualizadas com base em diferenças estruturais e estratigráficas (Feijó, 1992 e 1994). Porém, de acordo com as recomendações contidas no Código de Nomenclatura Estratigráfica (Petri *et al.*, 1986a), e do Guia de Nomenclatura Estratigráfica (Petri *et al.*, 1986b), é preferível manter, neste trabalho, a caracterização estratigráfica original para a bacia proposta pela Comissão de Revisão Estratigráfica (Fig. 4.2).

O preenchimento sedimentar da Bacia de Sergipe / Alagoas não ocorreu de maneira uniforme, tendo variado de acordo com as características de cada compartimento tectônico, com envolvimento de subsidência ou eventual soerguimento, resultando em desiguais distribuições das unidades crono e litoestratigráficas (Lana, 1990).

Seus primeiros sedimentos, provavelmente depositados no Permo-Carbonífero, estão relacionados à fase de sinéclise desenvolvida no interior do antigo continente Gondwana, onde a Bacia de Sergipe/Alagoas integrava a extremidade leste da grande sinéclise do Parnaíba (Ojeda & Fugita, 1974). Durante essa fase, foram depositados os sedimentos das formações Batinga e Aracaré, de características glacial, fluvial e marinho (Lana, *op. cit.*).

Quando toda a depressão afro-brasileira encontrava-se em condições relativamente estáveis, foram depositados, por processos fluviais e lacustres, durante o Andar Dom João, sedimentos de grande extensão lateral representados pelos arenitos, folhelhos e calcários das formações Candeeiro, Bananeiras e Serraria (Schaller, 1969; Estrella, 1972).

Ao fim da Idade Dom João, teve início uma grande reativação que afetou a depressão afro-brasileira, gerando uma série de falhas normais (tectonismo tensional) e individualização das atuais bacias costeiras. Esse tectonismo causou o represamento da planície fluvial, iniciando a formação de um imenso lago, no qual foram depositados

os sedimentos pelíticos e arenosos das formações Barra de Itiúba e Penedo (Carvalho *et al.*, 1974).

Durante os andares Aratu e Buracica foram depositados os sedimentos conglomeráticos e areníticos da Formação Rio Pitanga (Lana, *op. cit.*), com distribuição restrita à porção sergipana da bacia.

Entre os andares Buracica e Jiquiá depositaram-se os sedimentos carbonáticos da Formação Morro do Chaves, seguidos pelos siliciclásticos variados da Formação Coqueiro Seco, sendo estes restritos à porção alagoana da bacia e distribuídos desde o andar Jiquiá ao Eoalagoas. Também, com ocorrência restrita à porção alagoana, são encontrados os folhelhos da Formação Ponta Verde, de Idade Alagoas (Schaller, *op. cit.*).

A partir da Idade Alagoas toda a bacia passou a sofrer os efeitos da invasão marinha que se processava de sul para norte, inundando o *graben* central existente, denominado de Golfo Paripueira (Ojeda, 1981). Em consequência dessa invasão, foram depositados os sedimentos transicionais da Formação Muribeca, representados por folhelhos betuminosos, calcários laminados, evaporitos, arenitos e conglomerados (Schaller, *op. cit.*).

Admite-se que o avanço do mar sobre a bacia teria se processado, inicialmente, pelo baixos estruturais de Mosqueiro (porção sergipana) e Pontal de Coruripe, Maceió, e Alagoas (porção alagoana), nos quais foram depositados os primeiros pacotes evaporíticos da fase Paripueira.

Posterior à fase evaporítica inicial, na porção sergipana da bacia, foram criadas condições de restrição em diversas áreas, proporcionando a formação de espessos depósitos evaporíticos, onde foram precipitados os sais altamente solúveis da fase Ibura. Com o final da fase evaporítica, a bacia sofreu um lento afundamento, com sedimentação competitiva entre terrígenos e evaporitos (Carvalho *et al.*, 1974).

A partir do Albiano, com o afastamento progressivo das placas sul-americana e africana, e os seus consequentes resfriamento e subsidência, teve início a instalação definitiva de condições marinhas na bacia, com o mar ultrapassando as antigas barreiras e restrições do proto-oceano (Cainelli *et al.*, 1987).

Entre o Albiano e o Cenomaniano instalou-se a plataforma carbonática e o talude, representados pelos sedimentos da Formação Riachuelo, da Formação Cotinguiba (Turoniano/Santoniano) e os siliciclásticos da Formação Piaçabuçu, abrangendo um intervalo de tempo do Campaniano ao pós-Mioceno (Schaller, 1969).

Recobrimdo, discordantemente, as unidades mais antigas da bacia, ocorrem os depósitos siliciclásticos continentais da Formação Barreiras (ou Grupo Barreiras, conforme Saldanha *et al.*, 1975), de idade pós-miocênica. Depósitos quaternários, representados por sedimentos fluviais, eólicos, lacustres e marinhos, estão distribuídos por toda a bacia (Schaller, *op. cit.*).

TEMPO / ANDAR		LITOLOGIA	FORMAÇÃO	SEQÜÊNCIA
Q	HOLOCENO		S P A	COBERTURA
T	PLIOCENO		BARREIRAS	
	MIOCENO A ALBIANO		PIAÇABUÇU	MARINHA
COTINGUIBA				
RIACHUELO				
Ks	ALAGOAS		MURIBECA	PROTO-OCEANO
Ki	JUIQUIÁ		PONTA VERDE	RIFT
			C. SECO	
			M. CHAVES	
BURACICA ARATU RIO DA SERRA	PENEDO			
	BARRA DE ITIÚBA			
JURÁSSICO		SERRARIA	PRÉ-RIFT	
		BANANEIRAS		
PALEOZÓICO	CANDEEIRO			
	ARACARÉ			
	BATINGA			

Fig. 4.2 - Litoestratigrafia geral da Bacia de Sergipe/Alagoas (adaptada de Schaller, 1969, por Uesugui, 1987).

4.3 - As fases evaporíticas

Na Bacia de Sergipe / Alagoas são registradas duas importantes fases evaporíticas, denominadas de Paripueira e de Ibura, ambas inseridas na Formação Muribeca, correspondendo, respectivamente, aos membros Maceió e Ibura, conforme definição estratigráfica proposta para a bacia (Schaller, 1969). Tais fases evaporíticas são representadas por diversos tipos litológicos, exibindo características bem distintas entre si, sejam de natureza mineralógica, geoquímica ou estratigráfica. A deposição salífera ocorreu durante a fase transicional, de condições continentais para marinhas, onde são registrados espessos pacotes de sais solúveis, com intercalações de rochas carbonáticas e siliciclásticas.

4.3.1 - Histórico das descobertas

Datam de 1941 as primeiras descobertas de sal-gema na Bacia de Sergipe/Alagoas. A sua presença foi revelada, quase que simultaneamente, a partir da perfuração de poços com objetivos petrolíferos, nas proximidades das cidades de Maceió e de Aracaju.

Em Alagoas, as primeiras ocorrências salíferas foram identificadas nos poços AL-2 e AL-3, perfurados, na época, para o Conselho Nacional do Petróleo. Em Sergipe, a companhia particular ITATIG constatou a presença de sal em Cotinguiba, atual município de Socorro (Abreu, 1960). Posteriormente, por meio de sondagens realizadas pela PETROBRÁS, foram identificadas outras ocorrências, dentre as quais a da localidade de Paripueira, na porção norte da bacia (Teixeira & Saldanha, 1968).

4.3.2 - A Formação Muribeca

A Formação Muribeca representa a transição entre as fases *rift* e pós-*rift*, durante a qual foi registrado considerável aumento na sedimentação (Lana, 1990). Sua litologia é formada por folhelhos betuminosos, calcários laminados, evaporitos, arenitos e conglomerados, depositados durante o Andar Alagoas. Essa formação foi dividida em cinco membros (Schaller, 1969), relacionados a seguir pela ordem de empilhamento estratigráfico:

a) Membro Maceió - formado por intercalações de arenitos, folhelhos betuminosos e calcário dolomítico, além de espessos depósitos evaporíticos, informalmente denominados de Paripueira, objetos do presente estudo. Ao longo da base desse membro ocorre uma camada-chave de calcários laminados, informalmente denominada de calcário Mundaú.

b) Membro Tabuleiro dos Martins - caracterizado pela predominância de folhelhos castanhos, betuminosos, em parte síltico, com intercalações de calcários.

c) Membro Carmópolis - formado por conglomerados cinzentos e castanhos, com grãos, seixos e matacões de tamanho e composição variados. É o principal reservatório de hidrocarbonetos na porção sergipana da bacia.

d) Membro Ibura - é constituído por anidrita, halita e sais de potássio e magnésio, com intercalações de folhelhos betuminosos e calcários. A sua ocorrência na porção alagoana da bacia é restrita, sem a presença de sais solúveis.

e) Membro Oiteirinhos - predominam clásticos finos, destacando-se folhelhos cinzentos e castanhos, com interlaminações de calcário castanho claro, além de intercalações locais de siltitos e arenitos.

4.3.3 - Os evaporitos Paripueira

Os evaporitos Paripueira correspondem aos primeiros depósitos salíferos registrados no Cretáceo Inferior da Bacia de Sergipe / Alagoas, estratigraficamente inseridos no Membro Maceió, porção inferior da Formação Muribeca. Sua deposição ocorreu durante a fase transicional, de condições continentais para marinhas, sendo o resultado das primeiras incursões das águas do mar, provenientes do "Golfo Paripueira" (Ojeda, 1981), existente na fase embrionária do oceano Atlântico Sul. A invasão marinha, aliada às condições climáticas e circulação restrita favoráveis, permitiram a precipitação de halita em diversas partes da bacia.

Os evaporitos da fase Paripueira são encontrados em áreas distintas e sempre associados aos baixos estruturais regionais (Teixeira & Saldanha, 1968), como o de Mosqueiro, em Sergipe, e aos baixos estruturais de Coruripe, de Maceió e de Paripueira, todos em Alagoas, formando sub-bacias evaporíticas aparentemente isoladas das demais (Fig. 4.3).

As características mais marcantes desses evaporitos são as espessas camadas de halita e a ausência de anidrita e de sais mais solúveis que a halita, como a silvinita e a carnalita. Contudo, a presença de sais de potássio na bacia ainda não pode ser descartada.

A deposição dos evaporitos Paripueira, em geral, foi marcada pelo intenso aporte de terrígenos, representados por inúmeras intercalações de folhelhos. Esse evento pode ser atribuído à acentuada subsidência da bacia durante essa fase (Lana, 1990; Ojeda, 1981), ocasionais mudanças climáticas (Almeida *et al.*, 1992) e periódicos influxos marinhos, estes últimos, provavelmente, responsáveis pela formação de folhelhos orgânicos.

Fig. 4.3 - Distribuição das sub-bacias evaporíticas da fase Paripueira na porção alagoana da bacia.

4.3.3.1 - A sub-bacia evaporítica de Mosqueiro

No Baixo Estrutural de Mosqueiro, em Sergipe, os sais da fase Paripueira encontram-se separados da fase Ibura por uma seção de 600 metros de siliciclásticos (poço MO-1-SE da PETROBRÁS), situados em um intervalo de 3.475 a 3.560 metros de profundidade (Ojeda, 1981). Em consequência da grande profundidade de ocorrência e à não divulgação dos dados de sondagens, pouco se sabe a respeito dos sais nessa área (Fig. 4.4).

Fig. 4.4 - Perfil litológico parcial de um poço perfurado na área do Baixo Estrutural de Mosqueiro, com destaque para os níveis evaporíticos Paripueira e Ibura (adaptado de Ojeda, 1981).

4.3.3.2 - A sub-bacia evaporítica de Coruripe

A sub-bacia evaporítica de Coruripe encontra-se a nordeste da foz do Rio São Francisco, situando-se, em sua maior parte, na atual porção submersa da Bacia de Sergipe/Alagoas.

A presença de evaporitos, nessa área, foi constatada mediante a perfuração do poço PDC-1-AL, pela PETROBRÁS (Teixeira & Saldanha, 1968). Posteriormente, em outras sondagens realizadas a leste desse poço, foram identificadas novas ocorrências salíferas, a mais de 3000 metros de profundidade, com espessuras de halita superiores a 250 metros (Carvalho *et al.*, 1974).

A sub-bacia de Coruripe situa-se em uma área de grande complexidade estrutural, exibindo enorme variação nos limites do topo do Membro Maceió (Abreu & Potter, 1990). Essa área encontra-se no limite interno da *linha de charneira* Alagoas, feição resultante dos processos distensivos e termais sofridos pela crosta durante a fase *rift*, onde a maior subsidência estaria nos limites da zona de maior afinamento crustal (Chang & Kowsmann, 1986).

Provavelmente, essa é uma das áreas mais profundas da bacia, pois os topos dos níveis salíferos são encontrados a profundidades superiores a 2.600 metros, atingindo mais de 3.900 metros em sua porção sul (Tab. 4.1).

Tab. 4.1 - Dados gerais para os sais da sub-bacia evaporítica de Coruripe

Poço	Topo do sal (m)	Base do sal (m)	Espessura total (m)	Espessura efetiva (m)
C-1	-2.623	-2.647	24	14
C-2	-2.826	-3.069	243	117
C-3	-3.323	-3.367	45	43
C-4	-3.061	-3.973	912	62
C-5	-3.924	-3.945	21	16

4.3.3.3 - A sub-bacia evaporítica de Maceió

A sub-bacia evaporítica de Maceió localiza-se na porção oeste da cidade de Maceió, e está inserida nos limites NE do baixo estrutural homônimo (Fig. 4.5), identificado claramente em mapa de gravidade residual (Teixeira, 1967).

A ocorrência de sais solúveis, nessa área, foi constatada durante sondagens realizadas para prospecção de petróleo, nos poços "A", "B" e "C" (denominação adotada neste trabalho). São registradas espessas camadas de halita, com rochas siliciclásticas e carbonáticas intercaladas, cujos detalhes serão apresentados nos capítulos posteriores.

Fig. 4.5 - Mapa de gravidade residual da área de Maceió, com destaque para o Baixo de Maceió (modificado de Teixeira, 1967).

4.3.3.4 - A sub-bacia evaporítica de Paripueira

A sub-bacia evaporítica de Paripueira está situada na porção norte da Bacia de Sergipe/Alagoas, inserida em um baixo estrutural denominado Baixo de Paripueira (Teixeira & Saldanha, 1968), facilmente reconhecido em mapas gravimétricos, fazendo parte de um amplo conjunto de blocos escalonados, denominado de Baixo Regional de Alagoas (Lana, 1985). Essa área encontra-se limitada, a oeste, por rochas do embasamento, mediante falhas normais com rejeitos superiores a 2.000 metros. Estima-se que, nessa área, a espessura total de sedimentos atinja cerca de 8.000 metros (Chang & Kowsmann, 1986), ou até 10.000 metros (Lana, *op. cit.*).

A exemplo das demais áreas de ocorrência da fase Paripueira, os sais solúveis são formados, essencialmente, por halita, tendo-se como base a interpretação dos dados de perfilagens de poços. Nessa área os evaporitos exibem uma distribuição vertical irregular, com diversos níveis estratigráficos, de espessuras, profundidades e número de camadas variáveis, intercalados por espessos pacotes de siliciclásticos.

As maiores profundidades para esses depósitos são verificadas na porção NE, onde as camadas salíferas são encontradas nas profundidades de 1.614 a 2.843 metros em relação ao nível do mar. Na porção SW, a profundidade diminui, ocorrendo entre 1.075 e 1.285 metros de profundidade, respectivamente topo e base. O intervalo mais espesso é encontrado ao norte, com 1.646 metros de espessura total, e o de menor espessura total corresponde a 45 metros, encontrado ao sul da área.

Tab. 4.2 - Dados gerais para os sais da sub-bacia de Paripueira.

Poço	Topo do sal (m)	Base do sal (m)	Espessura total (m)	Espessura efetiva (m)
P-1	-1.396	-2.449	1.053	348
P-2	-1.614	-2.843	1.229	195
P-3	-1.075	-1.285	210	25
P-4	-1.304	-1.349	45	35
P-5	-1.460	-1.640	180	56
P-6	-1.363	-2.168	805	329
P-7	-1.262	-2.908	1.646	349

4.3.4 - Os evaporitos Ibura

Após a deposição dos conglomerados do Membro Carmópolis, a bacia sofreu uma invasão marinha, principalmente na área de Sergipe, cobrindo completamente as áreas atingidas pela discordância pré-aptiana (Carvalho *et al.*, 1974). Sob condições de restrição, associadas à contínua subsidência de determinadas áreas, formou-se uma série de sub-bacias nas quais foram precipitados espessos pacotes de sais solúveis (Cerqueira *et al.*, 1997).

Os evaporitos da fase Ibura estão inseridos no Membro Ibura da Formação Muribeca, caracterizada pela variedade de minerais evaporíticos, em nítido contraste com a fase Paripueira, com presença de anidrita, halita, silvinita, carnalita e taquidrita, e diversas intercalações de folhelhos e de rochas carbonáticas.

Na porção sergipana da bacia, os evaporitos da fase Ibura encontram-se distribuídos nas áreas de Mosqueiro, Taquari-Vassouras, Santa Rosa de Lima, Pirambu-Aguilhada, Timbó-Piranhas e Ilha das Flores-Arambipe (Fig. 4.6). Em Alagoas, a fase Ibura está limitada a ocorrências de anidrita, distribuídas em subsuperfície, nas áreas do Tabuleiro dos Martins e atual plataforma continental.

Fig. 4.6 – Distribuição dos evaporitos da fase Ibura em Sergipe (adaptado de Cerqueira *et al.*, 1997).

De uma maneira geral, os evaporitos Ibura podem ser divididos em três partes (Cerqueira *et al.*, 1997):

- a) Inferior – formada por folhelho, calcário e anidrita com halita intercalada.
- b) Média – constituída por camadas de halita, com intercalações de carnalita e com taquidrita no topo.
- c) Superior – formada por depósitos de halita, intercalações de silvinita e raramente carnalita, recobertas por anidrita, halita, calcário e folhelho.

As alternâncias de fases de alta e baixa salinidade permitiram a divisão dos sais Ibura em intervalos ou ciclos correlacionáveis (Carvalho *et al.*, *op. cit.*). Um ciclo de primeira ordem caracteriza-se pelo aumento de salinidade, desde o mais baixo teor, até o mais alto, retornando novamente ao teor inicial. Variações menores de salinidade permitem subdividir os ciclos principais em secundários, terciários e outros ciclos inferiores (Cerqueira *et al.*, 1997).

Tendo-se como base as sub-bacias de Santa Rosa de Lima e de Taquari-Vassouras, os sais Ibura foram divididos por Carvalho *et al.* (*op. cit.*) em nove ciclos secundários, agrupados em um único ciclo principal. Os seis primeiros representam um período de salinidade progressiva. Os ciclos seguintes evidenciam um período de salinidade recessiva, separados por uma superfície discordante, provocada pelo aporte abrupto de águas marinhas menos saturadas, causando a dissolução dos sais depositados (Cerqueira *et al.*, 1986).

Dentre os ciclos definidos para os sais da fase Ibura, o mais relevante em termos econômicos é o Ciclo Evaporítico VII, pois contém as camadas de silvinita, importante fonte de potássio. É formado, predominantemente, por halita com camadas de silvinita e níveis centimétricos de anidrita intercalados, ocorrendo, ainda, carnalita nas porções mais inferiores.

Na área de Taquari-Vassouras, a espessura máxima para o pacote evaporítico é de 468 metros e o intervalo mineralizado em potássio atinge até 31 metros de espessura. A base da seção evaporítica encontra-se, em média, a 600 metros de profundidade, porém, alcança até 1.300 metros em algumas áreas (Fonseca, 1973).

4.4 - Métodos de mineração

A mineração de sal teve a sua maior expansão quando o sal-gema tornou-se uma importante matéria-prima para a indústria química mundial (Baar, 1977).

Com exceção da halita e dos sais de potássio, os demais recursos minerais evaporíticos, como a anidrita ou gipsita, por exemplo, não são extraídos por meio de lavra subterrânea, a não ser que a mesma esteja operando em pequenas profundidades. Os dois principais métodos de extração em subsuperfície são: dissolução subterrânea e mineração convencional por câmaras e pilares (*room and pillar*). O método de mineração por dissolução subterrânea é empregado quando as rochas evaporíticas são solúveis na água com relativa facilidade.

4.4.1 – A mineração dos evaporitos Paripueira

A mineração dos evaporitos da fase Paripueira é realizada na sub-bacia de Maceió. Em decorrência da grande profundidade dos sais existentes nessa área, as camadas mineralizadas em halita são lavradas mediante a técnica de extração por dissolução subterrânea. Essa técnica permite a mineração de jazidas a grandes profundidades, por meio de poços tubulares, com redução substancial dos custos de produção. Elimina-se o inconveniente da geração de rejeitos e pode-se obter um produto final de elevada pureza (Richner *et al.*, 1992).

Nesse método, com o poço devidamente instalado, a água é injetada sob pressão pelo tubo central e dirigida à base da camada a ser minerada (não revestida), onde o sal após dissolvido, retorna à superfície pelo espaço anular do revestimento (Fig. 4.7), sob a forma de solução saturada de cloreto de sódio, na concentração aproximada de 300 gramas/litro (Melo & Florencio, 1995).

Além disso, a indústria química que processa o minério utiliza salmoura concentrada e não sal sólido. Esse fator contribui para a redução dos custos de produção, uma vez que, caso fosse extraído o sal sólido, o mesmo deveria passar por um processo de beneficiamento, como britagem, peneiramento e dissolução para remoção dos insolúveis (Melo, 1986).

Fig. 4.7 – Esquema de um poço de produção de salmoura.

O método de mineração por dissolução, na sub-bacia de Maceió, utiliza o sistema de extração por circulação direta através de poços isolados. A construção dos poços tem início com a perfuração em diâmetro de 12 1/4", sendo o poço revestido em aço carbono de 9 5/8" de diâmetro, desde a superfície até o topo do sal. O espaçamento anular entre o diâmetro da perfuração e o do revestimento é cimentado. Posteriormente são inseridos tubos de 7" e de 4 1/2", destinados, respectivamente, a produção de salmoura e injeção de água. Essas duas colunas ficam suspensas e presas na superfície, podendo ser movimentadas para ajuste da configuração da cavidade. O final da coluna de 7" fica posicionado a alguns metros abaixo do revestimento, enquanto que a extremidade tubo de 4 1/2" situa-se a poucos metros acima da base do sal. Através do tubo central de 4 1/2" a água é injetada sob pressão e usada como solvente do sal. A solução produzida, na forma de salmoura saturada, retorna à superfície pelo tubo de 7". Como o tubo central (4 1/2") é posicionado a uma maior profundidade, bem abaixo do revestimento, a dissolução salina será maior nesse ponto. Com isso forma-se uma cavidade ovalada que, controlada adequadamente, tenderá a uma configuração cônica. O controle da forma da cavidade é realizado periodicamente com o uso de sonar. Com esse equipamento, os sinais acústicos são enviados a intervalos regulares de profundidade, o que permite verificar a evolução da configuração, o volume e a direção preferencial da dissolução, fornecendo uma imagem tridimensional da cavidade que está sendo gerada (Amaral & Melo, 1997).

A altura e o diâmetro máximo da cavidade, gerada pela retirada do sal, são definidas em função da espessura do corpo salino e da malha para a locação de cada poço. Na área de Maceió, onde são mineradas as camadas dos evaporitos Paripueira, utiliza-se um diâmetro máximo de 60 metros para todo o intervalo salífero, mantendo-se a distância de pelo menos 100 metros entre cada poço. Com isso, o espaçamento mínimo entre as duas cavernas geradas no final da fase produtiva será de 40 metros.

Se cada poço for instalado no centro de uma área de 100 x 100 metros, grande parte do sal existente em torno da cavidade será mantido, pois na fase final de extração a cavidade gerada tenderá a uma configuração cilíndrica (Fig. 4.8). Assim, considerando-se uma configuração final de 120 metros de altura por 60 metros de diâmetro, o coeficiente de recuperação será de aproximadamente 20%, o que corresponde a um total de 732 mil toneladas de sal obtidas em cada poço.

O minério lavrado é comercializado sob a forma de salmoura saturada em NaCl, sendo transportado para a indústria química através de um salmouradouto, com 12" de diâmetro e 7,5 km de comprimento. No ano de 2000 a produção foi de 751 mil toneladas, o que correspondeu a 51,8% da produção nacional de sal-gema (DNPM, 2001).

Fig. 4.8 - Configuração ideal e fases de crescimento das cavidades geradas pela dissolução salina (adaptado de Melo, 1986).

4.4.2 – A Mineração dos evaporitos Ibura

O principal objetivo com a lavra dos evaporitos Ibura é a produção de cloreto de potássio. A mineração é realizada na sub-bacia de Taquari-Vassouras, em Sergipe, por meio de extração subterrânea convencional, com a utilização do método de câmaras e pilares. Esse método consiste na escavação de câmaras com 7 metros de largura, 125 metros de comprimento e altura máxima de 3,5 metros, separadas por pilares de 14 metros a partir de um eixo tríplice de galerias. Para a produção são lavrados, simultaneamente, dois painéis, com dimensões máximas de 300 metros de largura por 500 metros de comprimento (Fig. 4.9). Este processo de lavra está sendo usado apenas em uma camada do Ciclo VII, denominada de "silvinita basal superior". Essa camada encontra-se distribuída em uma área aproximada de 260 km², com espessura máxima de 12 metros e separada da camada de "silvinita basal inferior" por uma camada de halita com espessuras variando de 3 a 6 metros. O desenvolvimento da lavra é realizado por dois mineradores contínuos. O material desmontado é levado por correias transportadoras até o poço de extração de minério (*shaft*) por onde chega à superfície. O minério é estocado para posterior britagem e moagem, e segue para a usina de processamento. No processo de beneficiamento é usada a flotação para separar o cloreto de potássio do cloreto de sódio, este último considerado como rejeito (Cerqueira *et al.*, 1997). Em 1999 a produção anual foi de 2 milhões de toneladas de minério, com 30,56 % de KCl (Carvalho & Alves, 2000).

Fig. 4.9 – Esquema de operação de lavra na mina de potássio (Cerqueira *et al.* 1997).

5 - A SUB-BACIA EVAPORÍTICA DE MACEIÓ

5.1 – Aspectos gerais

A sub-bacia evaporítica de Maceió localiza-se na porção oeste da Cidade de Maceió, Estado de Alagoas, exibindo em planta uma forma elipsoidal e direção aproximada NE-SW para o seu eixo maior (Fig. 5.1). Estruturalmente sua área coincide com parte do Baixo de Maceió, identificado por gravimetria, cujos contornos mais negativos recaem sobre os canais que interligam as lagoas Mundaú e Manguaba.

A ocorrência de evaporitos nessa região foi constatada durante sondagens realizadas para petróleo, com os poços “A”, “B” e “C” (denominação adotada neste trabalho), da PETROBRÁS. Nos demais poços, situados próximos a essa área, não foram encontrados sais solúveis. Por esta razão, os poços de produção e de pesquisa, da SALGEMA MINERAÇÃO, foram perfurados nessas imediações (Fig. 5.2).

Ao norte da área destaca-se um alto estrutural onde está situado o campo petrolífero do Tabuleiro dos Martins. Seu limite com o Baixo de Maceió se dá mediante um conjunto de blocos escalonados, com falhamentos normais (provavelmente listricos), em que a inclinação do plano estaria entre 60 a 80 graus e rejeito total de aproximadamente 350 metros (Teixeira, 1967).

5.2 - Avaliação dos dados de sondagens

Foram realizadas análises dos dados de perfilagens de 25 poços de produção e de 3 poços de pesquisa, com respectivos testemunhos, obtidos na área da mineração de sal-gema, além dos perfis de poços perfurados para petróleo, situados no interior ou nas proximidades da área abrangida por este projeto. Os dados de perfilagens analisados corresponderam aos perfis de raios gama, neutrão, sônico e densidade. Esta etapa envolveu a análise de dezenas de perfis correspondentes a milhares de metros de sondagens.

Dentre os perfis utilizados destaca-se a perfilagem em raios gama, importante ferramenta para o estudo de depósitos evaporíticos, pois permite ao intérprete estabelecer, com relativa facilidade, os intervalos portadores de halita, caracterizados pela ausência de elementos radioativos.

Fig. 5.1 - Localização da sub-bacia evaporítica de Maceió.

Fig. 5.2 - Mapa de localização dos poços na área da sub-bacia de Maceió.

5.2.1 - Métodos de perfilagens

Apesar da sua aplicação principal ser voltada para a prospecção de petróleo, diversos métodos de perfilagem de poço podem ser úteis na prospecção de evaporitos. A partir das características registradas em cada perfil geofísico é possível a identificação da litologia com razoável segurança (Alger & Crain, 1966; Schlumberger, 1969). A geofísica de poço é um método direto e preciso, porém de efeito local, restrito ao poço perfurado. Para seções com alternâncias de sais, folhelhos, calcários e arenitos, típicos de seqüências evaporíticas, o uso dos perfis densidade, neutrão, raios gama e sônico são imprescindíveis para a interpretação, podendo-se determinar a litologia dessas seções com relativa precisão (Frank & Bemerguy, 1972).

No estudo da sub-bacia evaporítica de Maceió as perfilagens radioativas e sônica foram os principais métodos disponíveis e utilizados na análise litológica e estratigráfica. Essas perfilagens permitem também que sejam reconhecidos os limites, a espessura e a profundidade de cada camada.

As perfilagens radioativas ou nucleares consistem na medição da radioatividade, natural ou induzida, das camadas atravessadas pelo furo de sondagem. Têm a grande vantagem de serem empregadas em furos secos revestidos, bem como naqueles não revestidos e com lama de perfuração. Destacam-se os perfis densidade, neutrão e raios gama. Os princípios básicos desses métodos são descritos a seguir, tendo-se como base o manual de interpretação de perfilagens (Schlumberger, 1969).

Perfil densidade - na construção deste perfil uma fonte radioativa (Co^{60} ou Cs^{137}) é descida no poço. Os raios gama emitidos pela fonte radioativa colidem com elétrons das camadas de rochas e perdem parte de sua energia. Um detector colocado a uma distância fixa, acima da fonte, conta os raios gama após a colisão, permitindo a estimativa da densidade de elétrons (número de elétrons por centímetro cúbico). A densidade das camadas percorridas pelo aparelho pode ser então calculada a partir da densidade de elétrons, cujo perfil registra esses valores.

Perfil neutrão - os perfis neutrão são utilizados principalmente para delinear camadas porosas e determinação de suas porosidades. Os perfis respondem primariamente à quantidade de hidrogênio presente na formação, entendendo-se como formação as diversas litologias percorridas pelo equipamento. O equipamento utilizado na perfilagem possui uma fonte de neutrons (plutônio-berílio) que bombardeia as camadas rochosas. A presença de núcleos de hidrogênio desacelera os neutrons por

colisão, que são posteriormente absorvidos por núcleos de cloro, hidrogênio ou silício, principalmente. O núcleo que captura o neutron se torna excitado e libera energia na forma de raios gama. Dependendo do equipamento, os neutrons não capturados ou os raios gama emitidos são contados em um detector. No perfil neutrão são registradas contagens por segundo ou, mais comumente, unidades API de neutrons, ou ainda, unidades de porosidade aferidas em calcário.

Perfil raios gama - o perfil raios gama mede a radioatividade natural das rochas. As rochas sedimentares, como argilitos e folhelhos são grandes concentradores de elementos radioativos em decorrência da presença de matéria orgânica, fosfatos ou minerais pesados portadores de elementos radioativos (Serra, 1986). Os raios gama são detectados pelo cintilômetro e seus registros são calibrados em termos de unidades API. Os valores medidos variam desde algumas unidades API, em anidrita ou halita, até 200 unidades ou mais em folhelhos. Tanto o perfil raios gama quanto o perfil neutrão podem ser usados em poços revestidos.

Outro importante método de perfilagem utiliza a propagação de ondas elásticas, sendo denominado de perfilagem sônica. O perfil sônico é um registro do intervalo de tempo (Δt) requerido para uma onda longitudinal percorrer uma certa distância através da rocha. O Δt é denominado de intervalo de tempo de trânsito, sendo uma medida do inverso da velocidade da onda que se propaga através da rocha. Esse equipamento contém, em geral, duas fontes de ondas sísmicas e dois pares de detectores. Os valores de Δt variam desde 44 $\mu\text{s}/\text{ft}$ (microssegundos por pé), para dolomitas fechadas (porosidade zero), até 190 $\mu\text{s}/\text{ft}$, para a água.

O uso combinado desses perfis, observando-se a tabela de valores (Tab. 5.1) atribuídos pela Schlumberger (Nurmi, 1978), permitiu a identificação das camadas salíferas distribuídas ao longo da seção de cada poço.

5.2.2 - Evaporitos da área de produção

A área de produção compreende os poços perfurados pela Salgema Mineração, num total de 25 sondagens para mineração de halita. Nessa área está incluído o poço "B" e, mais a sudeste, encontra-se o poço "C", ambos perfurados, na época, para o Conselho Nacional do Petróleo (CNP).

Tab. 5.1 - Valores dos registros, em diferentes perfilagens, para minerais evaporíticos e rochas associadas (Nurmi, 1978).

Minerais e rochas	Composição	Densidade (ρ_b)	Velocidade (Δt)	Porosidade ϕ_N (GNT)	Raios-gama ($^\circ\text{API}$)
Calcita	CaCO_3	2,710	47,5	0	0
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	2,876	43,5	4	0
Quartzo	SiO_2	2,648	51,5	-4	0
Calcário	(quando $\phi=10\%$)	2,540	62	10	5-10
Dolomita	(quando $\phi=10\%$)	2,683	58	13,5	10-20
Arenito	(quando $\phi=10\%$)	2,485	65,3	3	10-30
Folhelho		2,2-2,75	70-150	25-60	80-140
Halita	NaCl	2,032	67	0	0
Anidrita	CaSO_4	2,977	50	0	0
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2,351	52,5	49	0
Trona	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2,100	65	40	0
Silvita	KCl	1,863	74	0	~500
Carnalita	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1,570	78	65	200
Langbeinita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$	2,820	52	0	275
Polihalita	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2,790	57,5	15	180
Kainita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	2,120	-	45	225
Enxofre		2,030	122,0	45	0
Linhita		0,7-1,5	140-170	Alto >50%	0
Carvão		1,3-1,5	110-140	Alto >50%	0
Antracito		1,4-1,8		Alto >50%	0

5.2.2.1 - Localização dos poços

Os poços da área de produção, denominados de minas, estão distribuídos ao longo da margem sudeste da Lagoa Mundaú, área pertencente ao município de Maceió, Estado de Alagoas. Das 25 sondagens realizadas para a Salgema Mineração 19 poços são verticais e 6 poços são direcionais, em consequência de impedimentos ambientais. Desse total 4 estão desativados (minas 3, 4, 5 e 6).

5.2.2.2 - Interpretação dos dados de sondagens

A interpretação das propriedades registradas nos perfis permitiu verificar que a litologia dominante na seção evaporítica, para toda a área, corresponde a camadas de halita com intercalações de folhelhos, calcários e arenitos. Não foram constatadas anidrita nem sais de potássio.

Para este estudo foram utilizadas as informações de perfilagens geofísicas, dados de descrição de testemunhos de sondagens e de amostragens de calha. O conjunto desses dados, associado à informações da área de pesquisa, que possui três poços com testemunhagem contínua, possibilitou boa interpretação litológica da seção evaporítica.

Em função do grande número de sondagens, bem como do pequeno espaçamento entre cada furo, em geral pouco mais de 100 metros, o perfil do intervalo salífero será comentado pela coluna dos poços mais representativos e com maior número de informações.

As observações iniciais sugerem que as minas 6 e 11, situadas na porção leste da área, provavelmente estejam distanciadas do depocentro, ou seja, mais próximas às margens do paleolago salino.

Na mina 6 o topo do sal encontra-se a uma profundidade de -916 metros, já descontado a elevação local. Seu intervalo salífero possui 192 metros de espessura, dos quais, 129 metros são de halita e 63 metros de insolúveis intercalados. Essas intercalações são relativamente freqüentes ao longo de toda a coluna, sendo que a maioria é identificada como folhelho, com espessuras variáveis, atingindo um máximo de 10 metros para cada intervalo. Na base da seqüência as intercalações correspondem a folhelhos, arenitos e ocorrências de calcário, seguidos por espesso

pacote de halitas. Os evaporitos são capeados por folhelhos, calcários e arenitos do Membro Tabuleiro dos Martins.

Na mina 11, situada no extremo sudeste da área de produção, o intervalo evaporítico é mais reduzido, com apenas 122 metros de espessura, dos quais 58 metros são de halita (espessura efetiva) e 34 metros de insolúveis intercalados. Esse intervalo encontra-se entre -918 e -1040 metros de profundidade, respectivamente topo e base.

Na porção central da área de produção (mina 4), a seqüência evaporítica exhibe um intervalo bem mais espesso que aqueles situados no lado leste (minas 6 e 11), com uma espessura total de 286 metros, dos quais 197 metros correspondem a halitas e 89 de insolúveis intercalados. Nessa área o pacote evaporítico situa-se a profundidades de -887 a -1173 metros, respectivamente topo e base. Ocorrem depósitos de halita com intercalações em que predominam argilitos e folhelhos, freqüentemente calcíferos. O topo da seqüência é recoberto por folhelhos e calcários, com alguns intervalos areníticos, do Membro Tabuleiro dos Martins.

A mina 5, posicionada a sul da mina 4, tem o seu intervalo evaporítico situado a profundidades de -877 a -1108 metros, respectivamente topo e base. Sua espessura total corresponde a 231 metros, dos quais 145 metros são de halita e 86 metros de insolúveis intercalados. Os dados de perfilagens indicam que essa sondagem foi interrompida no interior do corpo salino, não sendo atingida a base da seqüência. A litologia nesse intervalo assemelha-se àquela da mina 4, com siliciclásticos finos intercalados às halitas da base, tendo nas seções intermediárias e superior, intercalações de folhelhos, calcários e ocasionais arenitos. O topo do sal é recoberto por sedimentos do Membro Tabuleiro dos Martins.

A coluna do poço "B", situado nas proximidades da mina 11, exhibe, na base do conjunto evaporítico, uma litologia representada por arenitos de granulação média a grossa, seguidos de arenito fino e folhelho, a partir dos quais são observados os primeiros pacotes de halita, com intercalações em que predominam espessos corpos siliciclásticos. Em direção ao topo os sais exibem diversas intercalações de pequena espessura, geralmente representadas por folhelhos. A seqüência salífera, em seu final, é recoberta por folhelhos finamente laminados, tornando-se mais calcíferos em direção ao topo. Nessa área o topo e base do sal são encontrados, respectivamente, a -800 e -1219 metros de profundidade, correspondendo a um intervalo de 339 metros, dos quais apenas 80 metros são de halita, o que contrasta visivelmente com as

informações dos poços circunvizinhos, como as minas 14 e 15, respectivamente com 120,5 e 172 metros de espessura efetiva de halita.

De uma maneira geral, a litologia da área de produção exibe uma forte semelhança com aquela da área de pesquisa. Porém, na área de produção, verifica-se uma presença mais acentuada de calcários nas intercalações aos pacotes de halita, o que pode sugerir uma posição mais distal desta área em relação às margens da bacia evaporítica.

5.2.3 - Tentativa de determinação de marcos litológicos

Os métodos comumente utilizados nos trabalhos estratigráficos não podem ser aplicados com a mesma facilidade nas seções salíferas, principalmente aqueles relacionados à correlação estratigráfica. A elevada salinidade não permite a diversidade de vida nesses ambientes, a qual é restrita a um limitado teor de salinidade, onde podem ser encontrados microrganismos, como algas e bactérias, dentre outros. Para a correlação, entre os diversos poços perfurados na sub-bacia de Maceió, foram individualizados os intervalos onde os perfis exibem características bem distintas, com grande extensão lateral, de forma que possam atuar como marcos de correlação cronoestratigráfica por todo o intervalo evaporítico. Para este caso foram identificadas as superfícies de inundação máxima (SIM) e aplicados os conceitos de Estratigrafia de Sequências.

A ausência de ciclos de salinidades bem marcados é um grande problema para a diferenciação das fases de alta e baixa concentração de salmouras, o que, em princípio, invalida a divisão da seção salífera em ciclos correlacionáveis. Suas fases de baixa concentração são marcadas pelas extensas acumulações de folhelhos, ou mesmo pela precipitação de calcários, em camadas relativamente delgadas, resultantes de novos influxos marinhos, com salmouras diluídas, ou pelo influxo continental.

5.2.4 - Unidades evaporíticas

Na análise dos registros de perfilagem em raios foram observadas propriedades com um padrão praticamente repetitivo, reconhecido inicialmente por Florencio (1996a), para as seções basal, média e superior, em quase todos os poços, o que

permitiu a divisão vertical do depósito em três unidades distintas. A divisão do intervalo em três unidades, numeradas em ordem crescente da base para o topo, tem apenas significado operacional e permite que sejam reconhecidas as áreas com melhores condições para mineração, traduzidas pela menor razão insolúveis/halita (I/H), exibidas em cada intervalo (Fig 5.3).

Unidade 1

Esta denominação foi atribuída à porção de halitas basais recobertas e/ou intercaladas por camadas relativamente espessas de insolúveis. Das 28 perfilagens analisadas, em poços distintos, em 22 delas foi constatada a presença do padrão adotado para esta unidade. Nas demais, a Unidade 1 não pode ser definida em função dos seguintes motivos: a) perfuração do poço finalizada no corpo de halita, sem atingir a base do intervalo; b) perfilagem incompleta por problemas técnicos.

Verifica-se, para esta unidade, que a maioria dos poços apresenta a razão insolúveis/halita superior a 1, o que corresponde, praticamente, a mais de 50% de material insolúvel inserido no intervalo (Mapa A; Fig. 5.4). Nos poços onde a sondagem não atingiu a base do intervalo salífero este tipo de avaliação ficou prejudicada.

Admite-se a idéia de que, por ocasião da deposição dos primeiros pacotes evaporíticos (halitas basais - aqui representadas pela denominação de Unidade 1), a sub-bacia ainda era incipiente, ocupando uma pequena porção da atual área de produção, prolongando-se até a atual área de pesquisa, situada ao norte da primeira.

Unidade 2

Esta unidade corresponde aos sais da seção intermediária do intervalo evaporítico, exibindo nas perfilagens em raios gama uma configuração que representa espessas camadas de halitas, com múltiplas intercalações de insolúveis em camadas relativamente delgadas. Esta unidade ocorre em todos os poços analisados, sendo sua característica marcante os baixos valores da razão insolúveis/halita, raramente ultrapassando a 0,5 , o que corresponde a uma predominância de halitas superior a 65% do intervalo total. A espessura total do intervalo é normalmente superior a 100 metros, chegando em alguns casos a ultrapassar 280 metros. A espessura efetiva de

halitas, para esta unidade, é muito superior às demais, o que, em termos de mineração, representa o intervalo de melhor qualidade (Mapa B; Fig. 5.4).

Unidade 3

Esta unidade corresponde ao intervalo do topo da seqüência evaporítica, sendo encontrada em profundidades de 850 / 950 metros. Sua configuração nas perfilagens em raios gama mostra um padrão bem distinto da unidade imediatamente inferior, assemelhando-se ao mesmo padrão definido para a unidade basal.

A Unidade 3 caracteriza-se pela elevada razão insolúveis/halita (I/H), correspondendo a uma pequena espessura do intervalo total, estando ausente em 12 dos 28 poços analisados. O alto conteúdo de insolúveis intercalados reduz a espessura efetiva de halitas, o que torna esta unidade desfavorável aos trabalhos de mineração (Mapa C; Fig. 5.4).

5.3 - Evaporitos da área de pesquisa

A área de pesquisa foi estudada a partir dos dados de sondagens de quatro poços: um destinado a obtenção de hidrocarbonetos (poço "A") e os demais voltados para a prospecção de sais solúveis. Foram perfurados 3 poços, identificados como PP-1, PP-2 e PP-3, com testemunhagem contínua, desde o topo até a base dos evaporitos, correspondendo a mais de 600 metros de testemunhos (Fig. 5.5, 5.6 e 5.7).

Esta área encontra-se a norte da sub-bacia de Maceió, nas proximidades da falha do Tabuleiro dos Martins. A sua litologia é representada predominantemente por halita, com intercalações de folhelhos e rochas carbonáticas, além de ocasionais camadas de arenitos.

Fig. 5.3 - Divisão do pacote evaporítico com base nos padrões de perfilagens em raios gama. Observar a razão I/H (insolúveis/halita) para cada unidade.

Fig. 5.4 - Mapas da razão insolúveis/halita para as unidades do topo (A), intermediária (B) e base (C), do intervalo total estudado. Observa-se que os menores valores correspondem à unidade intermediária.

Fig. 5.5 - Perfil do poço de pesquisa 1 (PP-1)

Fig. 5.6 - Perfil do poço de pesquisa 2 (PP-2)

Fig. 5.7 - Perfil do poço de pesquisa 3 (PP-3)

5.4 - Petrologia e mineralogia

5.4.1 - Preparação de amostras para análises

A preparação de amostras, em sua maioria, foi realizada nos laboratórios da Faculdade de Geologia da Universidade de Barcelona. O material estudado corresponde aos testemunhos de sondagens dos três poços de pesquisa (PP-1, PP-2 e PP-3), da Salgema Mineração. Na identificação das amostras adotou-se a seguinte nomenclatura: as letras PP seguidas de um algarismo indicam o número do poço de pesquisa; os dois algarismos seguintes indicam o número da caixa de armazenagem; e o último algarismo corresponde a sua posição na respectiva caixa, pois cada embalagem comporta de 5 a 6 metros de testemunhos. Ex.: PP-1-16.4, significa testemunho do poço de pesquisa nº 1, caixa nº 16, testemunho nº 4.

5.4.1.1 - Amostras salinas

Por serem facilmente solúveis em água e altamente higroscópicas, as amostras salinas foram manuseadas com o cuidado necessário para evitar perdas. Cerca de 80 amostras foram cortadas ao meio, no sentido longitudinal, utilizando-se como serra um fio diamantado de 0,5mm de diâmetro, em máquina de corte Well, modelo 6234, lubrificada com óleo de evaporação Shell tipo S-4919 (isoparafina de baixa viscosidade).

Após o corte, realizou-se o polimento de uma das faces de todas as amostras, em politriz rotativa, Buehler-Metaserv, modelo Motopol 12, com velocidade de 120 rpm, utilizando-se inicialmente abrasivo nº 600, em sala climatizada com máximo de 40% de umidade.

As seções polidas foram examinadas em lupa binocular WILD, modelo TYP 181300, com 1,25 x 12 vezes de aumento e luz incidindo de baixo para cima da amostra, com o objetivo de identificar a presença de estruturas primárias geradas pelos cristais *hoppers*, delimitando-se as possíveis áreas com esse tipo de inclusão.

De início não foram encontradas as inclusões fluidas primárias, provavelmente em decorrência da grande espessura das amostras, superior a 10 milímetros. Observou-se apenas a presença de inclusões fluidas de bordo de grãos, inclusões fluidas secundárias e inclusões sólidas. Mesmo assim, foram selecionadas 16 amostras

de halita para confecção de lâminas delgadas para observações em microscópio petrográfico e microscópio eletrônico de varredura. De todas as lâminas analisadas as inclusões primárias estavam presentes apenas nas amostras PP-1-40.3 e PP-2-29.4. A falta de um maior número de amostras contendo inclusões primárias inviabilizou o uso do método de análises de inclusões fluidas por congelamento.

5.4.1.2 - Amostras não salinas

Foram confeccionadas lâminas delgadas de rochas siliciclásticas e carbonáticas intercaladas aos sais solúveis com o objetivo de identificar a provável ocorrência e distribuição de anidrita, além de verificar a relação calcário/dolomita nas rochas carbonáticas. Para isto, as lâminas de rochas carbonáticas foram parcialmente tingidas com solução de alizarina.

5.4.2 - Estudos petrográficos

As análises petrográficas foram realizadas a partir da descrição macroscópica e estudo em lâminas delgadas de amostras coletadas nos testemunhos de sondagens, sendo verificada a presença dos litótipos abaixo descritos.

a) Arenitos

Os arenitos estão presentes, em sua maioria, na base da seqüência evaporítica, sendo raramente encontrados intercalados ao sal (Foto C; Prancha 5.1). Na base da seção, antecedendo a deposição salina, são encontradas camadas de arenito cinza-claro, de granulação fina a média, conforme a classificação de Wentworth, 1922 (*apud* Davis JR., 1983), com raros grãos grossos, predominando quartzo com grãos angulosos e subordinadamente sub-angulosos, além de feldspatos. Como minerais acessórios verifica-se a presença de micas e alguns opacos. A aparente ausência de feldspatos, em amostras de alguns níveis, sugere uma maturidade mineralógica, o que contrasta com a pequena maturidade textural. As estruturas sedimentares são incipientes e apenas sugestivas de estratificação cruzada tabular. Em direção ao topo a granulometria apresenta-se mais fina, permanecendo mal selecionada.

Microscopicamente verifica-se que os arenitos são compostos principalmente por quartzo e feldspato (Foto F; Prancha 5.1). Os grãos de feldspato por vezes ocorrem parcialmente alterados e vacuolizados. Os contatos entre os grãos são predominantemente retos, côncavo-convexo, alguns suturados, conferindo às rochas um empacotamento fechado. O cimento predominante é calcítico e raramente silicoso. A matriz é praticamente ausente e a porosidade apresenta baixíssimos percentuais. Como minerais acessórios aparecem muscovita, biotita, clorita, zircão, agregados de óxido de titânio e opacos. Ocorrem ainda fragmentos de vegetais. Segundo Folk (1974), tais litótipos são classificados como arcóseos e sub-arcóseos.

São identificados os seguintes eventos diagenéticos: compactação mecânica, evidenciada pelo empacotamento fechado e grãos fragmentados; compactação química, dando origem aos contatos suturados, os quais favoreceram a precipitação de *overgrowths* de quartzo; cimentação, na forma de um crescimento secundário em quartzo, seguida de cimentação calcítica. Feldspatos sericitizados, geração de óxido de titânio e presença de glauconita (como grãos e agregados) são indicativos de alterações diagenéticas.

b) Folhelhos

Depois da halita os folhelhos são os litótipos dominantes e ocorrem intercalados aos sais, em diversos níveis, desde a base até o topo do intervalo evaporítico. Apresentam-se de uma maneira geral bem laminados, raramente com laminação incipiente e ocasionalmente com delgadas intercalações de arenito fino. Raros níveis são fossilíferos, porém, destacam-se os folhelhos da base e topo do intervalo salífero, com ocorrência de conchostráceos, ostracodes e artrópodes. Os níveis intercalados ao sal possuem uma alta concentração de matéria orgânica, indicativa de um ambiente com forte anoxia (Fotos H, N, M e P; Prancha 5.1). A partir do exame macroscópico do material testemunhado podem ser individualizadas três variedades distintas:

1- folhelho cinza-claro a cinza-escuro, com níveis salíferos, por vezes calcíferos, exibindo laminações com mergulhos acentuados em partes do intervalo de ocorrência, além de ocasionais fraturas preenchidas por halita secundária de cor avermelhada;

2- folhelho marrom, calcífero, por vezes carbonoso, exibindo laminações com mergulho acentuado em partes da seqüência, apresentando em diversos níveis fraturas preenchidas por calcita secundária e finíssimos leitos de halita avermelhada;

3- folhelho orgânico negro, com laminação incipiente, exibindo ocasionais fraturas verticais preenchidas por calcita e halita secundárias.

A composição dos folhelhos é complexa e as análises realizadas por difratometria de raios X mostram a presença de argilominerais como a caulinita e illita.

c) Rochas carbonáticas

As margas são de coloração marrom e ocorrem intercalando às halitas, em diversos níveis estratigráficos, exibindo laminações micro-onduladas, com alternância de material argiloso e calcífero, assemelhando-se a esteiras algáceas. As margas contém elevado teor de carbono orgânico, conforme análises realizadas (Foto L; Prancha 5.1). São comuns as ocorrências de fraturas preenchidas por mineralizações secundárias de calcita ou de halita avermelhada (Fotos B e E; Prancha 5.1).

No material testemunhado os calcários ocorrem, em geral, na forma de lâminas ou nódulos de carbonato de cálcio intercalados nos folhelhos, ou na forma de calcita disseminada em veios que preenchem fraturas. São raros os leitos com calcário que ultrapassam 20 cm. Estes, são de coloração creme a marrom escuro, muito duros, por vezes porosos ou dolomitizados. Ao microscópio observa-se que os calcários ocorrem na forma de *mudstone* ou *wackestone*, conforme a classificação de Dunham (1962).

Os *mudstones*, em geral, são laminados, exibindo alternância de níveis com matriz micrítica e margosos, raros grãos de quartzo, biotita, pelóides e fragmentos de vegetais (Foto G; Prancha 5.1). As características gerais destas rochas sugerem que foram depositadas em condições de baixa energia.

Os *wackstones* são compostos principalmente por pelóides, por vezes laminados, com matriz micrítica recristalizada, cimentado por mosaico de calcita espática, intercalados por níveis carbonáticos e argilosos, tendo como acessórios biotita, feldspatos, quartzo e opacos. São encontrados níveis contendo ostracodes (Foto J; Prancha 5.1).

d) Halitas

Em todo o material testemunhado predominam halitas com cristais de granulação grossa, com dimensões de 4 mm aproximadamente. Em sua maioria apresentam-se com alternância de bandas claras e escuras, denominadas de halita

bandeada. As bandas claras são predominantemente incolores, com algumas impurezas, mas também exibem coloração variada, desde branca, marrom, cinza, rósea, alaranjada ou vermelha, dependendo do tipo e teor de impureza associada. As bandas escuras exibem coloração marrom a negra, rica em matéria orgânica e material argiloso (Foto A; Prancha 5.1). O termo “halita bandeada” foi definido por Dellwig (1955) sendo adotado universalmente. Secundariamente são encontrados níveis de halita com cristais bem formados, de dimensões superiores a 5 mm, imersos em uma matriz argilosa, com crescimento do tipo *displacive*, sugerindo geração em ambiente de *sabkha*, denominada de halita cristaloblástica.

Foram reconhecidas apenas duas fácies halíticas, denominadas de “bandeada” e de “cristaloblástica”. Verifica-se que as halitas são extremamente pobres em termos de variação de fácies, em contraste com o que ocorre com os sais solúveis da fase Ibura, em Sergipe, onde seis fácies são perfeitamente identificadas.

Microscopicamente os cristais de halita, em geral, exibem formas subedrais, com bordas parcialmente dissolvidos, raramente envoltos por uma finíssima rede argilosa, com inclusões sólidas de natureza diversa, principalmente cristais de calcita (Fotos D, E e F, Prancha 5.2), material argiloso, fragmentos de dolomita e placas de muscovita.

Em alguns níveis as halitas exibem cristais alongados, segundo o plano de acamamento, provavelmente relacionados ao fluxo gravitacional (Foto D; Prancha 5.1). Ocasionalmente, no topo das camadas salinas, próximo ao contato com rochas siliciclásticas, observa-se a ocorrência de brechas de colapso, originadas por subsolução do sal, assemelhando-se a uma *karstificação*, fenômeno atribuído ao influxo de salmouras menos concentradas.

5.4.3 - Identificação de inclusões fluidas

Observou-se que as halitas da sub-bacia de Maceió são pobres em inclusões fluidas primárias. Aparentemente, o sal sofreu um processo de recristalização parcial que reduziu consideravelmente a presença dessas estruturas (Fotos C, H e I, Prancha 5.2). São comuns as inclusões fluidas secundárias e de bordo de grãos (Fotos A e B, Prancha 5.2). Ao contrário, nas halitas dos evaporitos Ibura, correspondentes ao Marco 35 da sub-bacia de Taquari-Vassouras, em Sergipe, ocorrem grandes quantidades dessas estruturas, muitas delas representadas por cristais do tipo *hoppers* (Fotos J, L e M, Prancha 5.2).

PRANCHA 5.1

Testemunhos de sondagem:

Foto A: halita bandeada.

Foto B: nível de marga com fratura preenchida por halita avermelhada no topo.

Foto C: arenito basal do PP2, com intercalações de folhelho negro.

Foto E: seção transversal, em detalhe, de testemunho da Foto B, com cristais alongados de halita avermelhada.

Fotomicrografias:

Foto D: seção transversal de halita, observada em lupa, exibindo cristais estirados (PP2-35.3).

Foto F: arenito basal (PP2-50.4), exibindo grãos irregulares, de dimensões variáveis, com predomínio de quartzo e feldspato (nicóis cruzados).

Foto G: calcário peloidal (*mudstone*), microfraturado (PP2-20.6), nicóis paralelos.

Foto H: marga exibindo microlaminações (PP2-20.2), com alternância de níveis ricos em matéria orgânica (nicóis paralelos).

Foto I: detalhe de fragmento vegetal (PP1- 27.2) em arenito intercalado ao sal, (nicóis paralelos).

Foto J: seção transversal de calcário (*wackstone*) com alternância de níveis argilosos e presença de ostracodes (PP2-20.2A), nicóis paralelos.

Foto L: seção transversal de marga (PP2-20.6B) exibindo microlaminações ricas em matéria orgânica, com lentes microscópicas de gipsita (nicóis cruzados).

Foto M: detalhe de conchostráceo (*Cyzicus?*), observado em lupa (PP2-20.5).

Foto N: seção transversal de folhelho (PP2-20.2C) com ostracode (nicóis paralelos).

Foto O: detalhe de uma camada de calcário (PP2-38.4), próximo ao contato com halita, exibindo, da base para o topo, níveis de calcita, gipsita e esfarelita.

Foto P: folhelho (PP1-42.3) com fragmento de artrópode (nicóis paralelos).

Prancha 5.1

PRANCHA 5.2

Fotomicrografias:

Foto A: inclusões fluidas (secundárias) em bordos de grãos de halitas .

Foto B: inclusões fluidas (secundárias) no interior de grãos de halitas .

Foto C: inclusões fluidas primárias, do tipo *chevron*, em halita.

Foto D: halita com matéria orgânica e inclusões de cristais de calcita.

Foto E: cristal isolado de calcita incluso em grão de halita.

Foto F: detalhe de cristal de calcita incluso em bordo de grão de halita.

Foto G: disposição dos cristais de halita, sem inclusões fluidas, em seção transversal de testemunho.

Foto H: halita com inclusões fluidas primárias, do tipo *chevron*; as zonas escuras são mais ricas em inclusões.

Foto I: detalhe da foto anterior (amostra PP2-29.4).

Foto J: halita do Marco 35 da fase Ibura (sub-bacia de Taquari-Vassouras), com diversas estruturas contendo inclusões fluidas primárias.

Foto L: detalhe de estrutura formada por cristal do tipo *hopper*, em halita do Marco 35 da fase Ibura (sub-bacia de Taquari-Vassouras), contendo inclusões fluidas primárias.

Foto M: estrutura do tipo *chevron*, em halita do Marco 35 da fase Ibura (sub-bacia de Taquari-Vassouras), contendo inclusões fluidas primárias.

Prancha 5.2

5.4.4 - Difração de raios X

Um total de 132 amostras foram processadas para análises por DRX. Desse total, 63 amostras eram de evaporitos, cujos resultados, exibidos nos difratogramas, mostraram a presença dominante de halita e, em alguns casos, traços de dolomita e de calcita.

Foi utilizado um difratômetro de geometria Bragg-Brentano $\theta / 2\theta$, Siemens D-500. As condições experimentais foram as seguintes:

- radiação $k\alpha$ do Cu ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) a 40 kV e 30 mA ;
- monocromador secundário de grafite ;
- janela de divergência de 1° ;
- janela de recepção: $0,05^\circ$;
- medidas de 4 a $70^\circ 2\theta$ com tamanho de passo de $0,05^\circ (2\theta)$ e tempo de contagem de 3 s / passo.

Para analisar os constituintes menores dispersos na halita, possivelmente não detectados nos primeiros difratogramas, procedeu-se a diluição de parte das amostras (1g aproximadamente), em água destilada, sendo o resíduo retido em papel de filtro Milipore, sob vácuo, com o uso de trompa de água. O resíduo insolúvel, para o total de 63 amostras, também foi submetido a análises por difratometria de raios X. Os resultados mostraram a presença dominante de calcita, dolomita e ankerita, ocorrendo, ainda, quartzo, plagioclásio, ilita, muscovita, microclina, albita, clorita e caulinita, dentre outros.

Posteriormente, foram selecionadas 6 amostras de folhelhos e margas, com o objetivo de verificar a provável presença de sulfatos (gipsita e anidrita), e também para identificar uma ocorrência com minerais metálicos, cinza escuro, em uma camada de rocha carbonática no contato com halita (Tab. 5.2). Os sulfatos ainda não haviam sido encontrados mas, teoricamente, deveriam estar presentes em algum nível das camadas salíferas. Foram escolhidas amostras do PP-2 situadas em diversos níveis.

Tab. 5.2 - Amostras do PP-2 selecionadas para DRX

Amostra nº	Intervalo no PP2	Tipo de rocha
10	26.4	Marga
11	33.4	Marga
12	38.2	Marga
18	37.5	Folhelho
20	23.4	Folhelho
21	38.4	Calcário

Dentre outros minerais identificados, os resultados analíticos mostraram a presença de gipsita (em margas e folhelhos) e de esfalerita (na rocha carbonática), conforme gráficos interpretados (Gráficos 5.1 e 5.2).

A ausência de camadas ou lâminas de sulfatos é praticamente total na maioria das seções, seja na forma de gipsita ou de anidrita. Em princípio a ausência de sulfatos pode ser atribuída a posição distal da bacia evaporítica, onde a gipsita seria precipitada na porção proximal, conforme modelos tradicionais de bacias evaporíticas. Outra provável explicação, adotando-se o princípio de bacias múltiplas, seria a de que as salmouras da região de Maceió já estariam empobrecidas em sulfatos no longo trajeto do golfo "proto-Atlântico" a partir da barreira Rio Grande - Walvis. Também, a ausência de gipsita/anidrita poderia ser atribuída a presença de bactérias redutoras (Neev & Emery, 1967; Sonnenfeld, 1984).

No caso da presença de esfalerita, os sulfetos metálicos podem ter sido fixados por bactérias redutoras. Este mecanismo pode produzir depósitos de Fe-Zn-Pb e Ag. Como exemplo, na Nova Escóssia (Gays River - carbonatos do Mississipiano) ocorrem concentrações de sulfetos no contato carbonato-evaporito (Kyle, 1991).

Gráfico 5.1 - Difratoograma de raios X da amostra 11.

Gráfico 5.2 - Difratoograma de raios X da amostra 21.

5.4.5 - Microscopia eletrônica

Para observação das rochas salinas foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo JSM-840, com o objetivo de verificar a presença de minerais não detectados nos exames por difração de raios X. As imagens fornecidas pelo MEV mostraram a presença de inúmeras inclusões sólidas, de natureza diversa, porém, não foi registrada a presença de novos minerais evaporíticos.

Os espectros de emissão (EDS) registraram a ocorrência de elementos como: Mg, Ca, Mn, Fe, Cl, Na, Si, Al e K. A comparação desses resultados, com aqueles obtidos por exames petrográficos e de raios X, confirma que a maioria das inclusões sólidas é formada por calcita [CaCO_3], dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] e ankerita [$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$], tendo ainda a presença de plagioclásio e de quartzo, dentre outros minerais (Prancha 5.3).

É possível que algumas das inclusões, como as de calcita, tenham sido geradas singeneticamente. Nas imagens obtidas com o MEV, observa-se que é comum a calcita englobar a halita. Porém, o mesmo não ocorre com a dolomita. Os cristais de halita exibem uma forma poligonal irregular, ausência de porosidade, com contatos entre os grãos bem fechados. Nas inclusões de natureza carbonática destaca-se o zoneamento dos cristais, exibindo variação composicional (Fotos C e D; Prancha 5.3), com alternância de calcita/dolomita. Verificou-se, com este procedimento, uma completa ausência de sulfatos no material estudado.

Uma pequena parte das rochas salinas encontradas nos testemunhos de sondagens exibe uma coloração avermelhada, assemelhando-se à carnalita. Os primeiros exames de algumas de suas propriedades, como deliquescência e sabor amargo, típicos da carnalita, não foram observados. Também, os exames por raios X e análises químicas foram negativos para esse mineral. Os sais avermelhados são encontrados, normalmente próximos a folhelhos, por vezes em contato direto, no topo ou base, ou mesmo preenchendo fraturas (Fotos B e E; Prancha 5.1).

Esses sais avermelhados também foram analisados por microscopia eletrônica (Fig. 5.8), utilizando-se, neste caso, um equipamento LEO 1450 VP (Zeiss), de baixo vácuo, onde a amostra não necessita de recobrimento, com detector de elétrons espalhados. O gráfico resultante mostrou a presença acentuada de Cl e Na (picos mais elevados correspondentes a cloreto de sódio) e um pequeno pico de Fe não encontrado em análises com amostras de halitas incolores.

Na sua forma pura a halita é incolor e transparente. Sua coloração avermelhada pode ser produzida pela presença de pequenas quantidades de óxido de ferro (Sonnelfeld, 1984). Neste caso a fonte disponível para o ferro seria a decomposição de minerais detríticos, ricos em ferro, que afluem para as bacias evaporíticas. Os periódicos influxos detríticos daria a ampla oportunidade para a reação entre a salmoura e os minerais detríticos, com a conseqüente solubilização do ferro. O ferro ferroso é completamente solúvel em salmouras anóxicas, porém, quando estas salmouras são oxigenadas, seja pela turbulência ou contato com a atmosfera, o ferro é oxidado sob uma forma relativamente insolúvel, sendo então precipitado (Hite, 1973). Portanto, admite-se que a presença de ferro seja responsável pela coloração avermelhada observada em algumas amostras de halita da sub-bacia de Maceió.

Fig. 5.8 – Detalhe de imagem de MEV para halita com cristais fibrosos.

PRANCHA 5.3

Imagens do MEV:

Foto A: linhas irregulares do contato entre grãos de halita.

Foto B: inclusão de plagioclásio em halita.

Foto C: cristal com crescimento alternado de calcita e dolomita, incluso em halita.

Foto D: calcita com magnesita em halita.

Foto E: calcita (cinza claro) e dolomita (cinza escuro) inclusos em halita.

Foto F: inclusão de quartzo em halita.

Foto G: cristais de dolomita (menor no topo) e de calcita (centro e base) inclusos em halita.

Foto H: inclusão de ankerita em halita.

Prancha 5.3

5.4.6 - Determinação dos teores de CaCO_3

Realizaram-se ensaios para determinação dos teores de CaCO_3 em folhelhos e rochas carbonáticas. Para isto foi utilizado um aparelho apropriado, constituído por uma coluna graduada preenchida por salmoura saturada de NaCl , tendo-se como padrão calcário puro produzido pela Merck (Fig. 5.9). Foram pesadas 0,5g de cada amostra e acondicionadas em um frasco de vidro, hermeticamente fechado, onde sofriam um ataque com 5 mL de ácido clorídrico. As diferenças das marcas dos níveis da solução saturada, movidas pela pressão do CO_2 , foram comparadas com aquelas da amostra padrão e realizados os cálculos necessários, cujos resultados são apresentados no capítulo seguinte.

Fig. 5.9 - Esquema do aparelho usado para determinação dos teores de CaCO_3 em rochas sedimentares.

5.5 - Estudos estratigráficos

Com base nos dados de perfilagens de poços e da análise de testemunhos de sondagens, foram utilizados os conceitos de Estratigrafia de Seqüências na reconstrução do arcabouço crono-estratigráfico, para se interpretar a evolução dos depósitos salíferos.

5.5.1 - Estratigrafia de Seqüências

O surgimento das bases para a criação da Estratigrafia de Seqüências ocorreu no final da década de 40 (Sloss *et al.*, 1949), tendo continuidade apenas no final da década de 50 e início dos anos 60, quando as rochas fanerozóicas da América do Norte foram divididas em seis grandes seqüências (Sloss, 1963), delineado-se então as idéias precursoras do que se denominaria, posteriormente, de Estratigrafia de Seqüências. Contudo, o grande avanço dessas idéias só tomaram impulso a partir dos trabalhos de Peter Vail (Vail *et al.*, 1977) e com o uso de dados de sísmica de reflexão para a interpretação em larga escala da arquitetura estratigráfica. O resultado de suas pesquisas foi amplamente divulgado a partir da publicação do *Memoir 26* da AAPG (Payton, 1977). Nessa publicação Vail introduziu dois importantes conceitos. O primeiro afirma que, em larga escala, a arquitetura estratigráfica pode ser relacionada a ciclos de subida e queda do nível do mar. O segundo conceito permite que estes ciclos podem ser correlacionados globalmente, sugerindo que a mudança global no nível do mar (eustasia) é o principal processo que controla o arcabouço estratigráfico (Vail *et al.*, *op.cit.*).

Mitchum *et al.* (1977) conceituaram a seqüência deposicional como sendo uma unidade estratigráfica formada por camadas geneticamente relacionadas e limitada no topo e na base por discordâncias e suas concordâncias equivalentes. A seqüência definida por Mitchum *et al.* (*op. cit.*) abrange um intervalo de tempo bem menor que aquela definida inicialmente por Sloss (Van Wagoner *et al.*, 1990). Enquanto Sloss considera que as seqüências têm origem tectônica, Vail as correlaciona às variações relativas ao nível do mar. No conceito de Vail as seis seqüências de Sloss são denominadas de superseqüências e o fenômeno da eustasia é considerado como um mecanismo fundamental para a configuração das seqüências.

Este método de análise estratigráfica não é o único. Existe a Estratigrafia de Ciclos Transgressivos-Regressivos (ou ciclos T-R) e os Ciclos de Alta Freqüência. Galloway (1989) com base nos conceitos deposicionais de Frazier (1974) desenvolveu outra técnica para análise estratigráfica denominada de Estratigrafia Genética. Segundo seus conceitos, a unidade básica também é a seqüência, denominada de “Seqüência Estratigráfica Genética”, e corresponde a uma unidade deposicional regressiva limitada por superfícies transgressivas.

5.5.2 - Conceitos fundamentais

Estratigrafia de Seqüências é o estudo de relações de rochas sedimentares dentro de um arcabouço cronoestratigráfico de estratos relacionados geneticamente, limitado por superfícies de erosão ou não deposição, ou por suas concordâncias relativas (Vail *et al.*, 1977).

A Estratigrafia de Seqüências pode ser resumida como sendo a subdivisão do preenchimento de uma bacia sedimentar em pacotes limitados por inconformidades e suas conformidades relativas (Emery & Myers, 1999), onde as inconformidades e conformidades são os limites de seqüências.

No estudo de uma bacia sedimentar a Estratigrafia de Seqüências é útil na montagem do seu arcabouço cronoestratigráfico, podendo ser usada para correlação e mapeamento de fácies. Para a sua aplicação é de fundamental importância o reconhecimento da hierarquia das unidades estratais, como as camadas, conjunto de camadas, parasseqüências, conjunto de parasseqüências e seqüências. Na construção do arcabouço estratigráfico da bacia os perfis de poços, testemunhos de sondagens e afloramentos são valiosos instrumentos para a identificação das parasseqüências e seqüências (Van Wagoner *et al.*, 1990).

5.5.2.1 - Seqüências

São reconhecidos dois tipos de seqüências: a seqüência do tipo 1 e a seqüência do tipo 2. A seqüência do tipo 1 está situada entre o limite de seqüência do tipo 1, na sua porção inferior, e o limite de seqüência do tipo 1 ou do tipo 2 na sua porção superior. O limite de seqüência do tipo 1 é formado quando a taxa de queda eustática excede a taxa de subsidência da bacia, como resultado de acentuada queda relativa do

nível do mar, resultando em exposição subaérea, erosão e incisão de plataforma, deslocamento do *onlap* costeiro, dentre outros efeitos. A seqüência do tipo 2 está situada entre um limite de seqüência do tipo 2, na base, e um limite do tipo 1 ou 2 no topo. O limite de seqüência do tipo 2 está relacionado a moderada exposição da plataforma, na qual não ocorrem incisões, sendo o resultado de um menor rebaixamento do nível do mar, com pouca mudança do *onlap* costeiro (Van Wangoner *et al.*, 1988).

As seqüências e suas componentes internas são interpretadas como resultado da interação entre as taxas de eustasia, subsidência e aporte sedimentar. Segundo Vail *et al.*, (1977) as principais variáveis que controlam os padrões de estratos e distribuição de litofácies nas rochas sedimentares, são:

- a) subsidência tectônica: cria o espaço de acomodação onde os sedimentos são depositados;
- b) variação eustática do nível do mar: provavelmente o principal controle, segundo a escola da Exxon (Vail *et al.*, *op. cit.*);
- c) volume de sedimentos: controla a batimetria;
- d) clima: controla o tipo de sedimento.

5.5.2.2 - Parasseqüências

A parasseqüência é definida como uma sucessão concordante de camadas ou conjunto de camadas geneticamente relacionadas, relativamente concordantes, limitadas por superfícies de inundação marinha ou por suas superfícies correlatas. Sua espessura é variável, de poucos metros, chegando a superar os 300 metros, podendo variar lateralmente de 15 km² a 1.600 km², em um tempo de formação de 100 a 10.000 anos. Pelas suas dimensões as parasseqüências podem ser registradas em perfilagens de poços e observadas em afloramentos ou testemunhos de sondagens. O limite de parasseqüência é uma superfície planar de extensão local ou regional, formada por uma inundação marinha ou por suas superfícies correlatas (Van Wangoner *et al.*, 1990).

5.5.2.3 - Conjunto de parassequências

Uma sucessão de parassequências geneticamente relacionadas, em um padrão distinto de empilhamento, formam um conjunto de parassequências, sendo este limitado por superfícies de inundação marinha maiores ou por suas superfícies correlatas. Ocasionalmente os seus limites podem coincidir com um limite de seqüência, separar diferentes modelos de empilhamento de parassequências ou mesmo coincidir com os tratos de sistema (Van Wangoner *et al.*, 1990).

5.5.2.4 - Correlações

As parassequências e conjuntos de parassequências permitem que sejam efetuadas correlações locais ou regionais, tendo-se um resultado significativamente diferente daquele obtido com a correlação litoestratigráfica convencional (Fig. 5.10). Na correlação litoestratigráfica convencional são correlacionadas litologias idênticas, representando de forma incorreta os seus topos como linhas de tempo (Van Wangoner *et al.*, 1990). Utilizando-se como *datum*, por exemplo, as superfícies limitantes de conjuntos de parassequências, ou as superfícies de inundação máxima (SIM), ambas de valor cronoestratigráfico, obtêm-se uma correlação mais precisa, ao contrário daquela obtida com a correlação litológica.

Fig. 5.10 - Comparação entre correlação cronoestratigráfica e litoestratigráfica (Van Wangoner *et al.*, 1990).

5.5.2.5 - Unidades estratais

As parasequências podem ser divididas em camadas e lâminas e serem agrupadas formando um conjunto de camadas ou um conjunto de lâminas. As lâminas são as menores unidades e têm como principais características a uniformidade na textura e composição, além da ausência de acamamento interno. As camadas são sucessões de lâminas ou conjunto de lâminas limitadas por superfície de erosão, não deposição ou por suas conformidades correlatas (Van Wangoner *et al.*, 1990).

5.5.2.6 - A curva eustática

A curva eustática tem uma forma aproximada de uma senoidal sendo marcada por diversos pontos de inflexão, dos quais dois pontos são destacados: a) o ponto F, no ramo descendente da curva; b) o ponto R, no ramo ascendente (Fig. 5.11). Tais pontos marcam a máxima taxa de variação eustática ou máxima inclinação absoluta da curva. Em pontos específicos dessa curva são representadas as subdivisões da sequência, denominadas de tratos de sistema (Van Wangoner *et al.*, 1988).

Fig. 5.11 - A curva eustática (Posamentier *et al.*, 1988).

5.5.2.7 - Tratos de sistema

Os depósitos interrelacionados de um determinado ambiente deposicional, vistos tridimensionalmente, formam o sistema deposicional (Fisher & McGowen, 1967). A associação de sistemas deposicionais contemporâneos formam o trato de sistemas, conforme a definição de Brown & Fisher (1977).

Van Wagoner *et al.* (1988) usaram o termo “trato de sistema” para designar três divisões dentro de cada seqüência, quando completa, em função de pontos específicos da curva eustática. Essas divisões são denominadas de: trato de sistema de mar baixo (TSMB); trato de sistema transgressivo (TST) e trato de sistema de mar alto (TSMA). Estes tratos de sistema seriam característicos da seqüência do tipo 1. Na seqüência do tipo 2 são reconhecidos os tratos de sistema de margem de plataforma (TSMP), transgressivo (TST) e de mar alto (TSMA).

Quando os depósitos, referentes ao trato de sistema relacionado ao nível de mar mais baixo, estiverem depositados sobre uma discordância do tipo 1, serão denominados de TSMB. Quando a deposição estiver sobre uma discordância do tipo 2 será denominada de TSMP. Se o trato de sistema for depositado em uma bacia com quebra de plataforma, este trato de sistema pode ser dividido em três unidades, não contemporâneas, denominadas de: leque de assoalho de bacia, leque de talude e cunha de mar baixo (Posamentier *et al.*, 1988; Posamentier & Vail, 1988).

5.5.3 - Aplicação dos conceitos na sub-bacia de Maceió

Para a confecção de uma seção estratigráfica representativa, da deposição evaporítica de Maceió, utilizou-se como ponto de partida o perfil do poço “A”, situado ao norte da área, sendo o mesmo considerado como poço de controle por apresentar perfilagem em raios gama em toda a sua extensão, incluindo dezenas de metros abaixo da base do pacote evaporítico (Fig. 5.12).

As seções estratigráficas foram construídas nas direções norte-sul e nordeste-sudoeste, aproximadamente, sendo utilizados os dados dos poços: “A”, PP-2, M-7, M-8, M-15 e M-11, e M-6, M-4 e M-18, respectivamente, para a primeira e segunda seções. Todos esses poços possuem perfilagem em raios gama na escala de 1:200 e de 1:1000. Essas perfilagens foram digitalizadas, selecionado-se os intervalos

portadores de evaporitos, e reduzidos uniformemente em dimensões suficientes para serem exibidos em folha tamanho A4. Utilizou-se como *datum* a superfície de inundação máxima, denominada de SIM 3, presente em todos os perfis e situada acima da última camada salina dos poços estudados (Fig. 5.13 e 5.14). As respectivas seções estão representadas no mapa de localização dos poços (Fig. 5.15).

A superfície de inundação máxima (SIM) representa a transgressão máxima e separa o trato de sistema transgressivo do trato de sistema de mar alto, ou mesmo de mar baixo, no caso das seções com evaporitos. A superfície de inundação máxima é facilmente reconhecida, sendo identificada como os picos mais expressivos nos perfis de raios gama, e correspondem a folhelhos radioativos, ricos em matéria orgânica. Foram definidas as demais superfícies de máxima inundação situadas acima e abaixo da SIM 3 e suas respectivas correlações.

O intervalo evaporítico foi dividido em duas fases distintas, separadas pela SIM 2, a qual foi reconhecida pelos picos de maior intensidade, medidos no perfil de raios gama. Estas fases foram denominadas de Fase 1 (situada na porção inferior) e Fase 2 (situada na porção superior). A SIM 2 representa um importante pulso transgressivo e está presente por toda a bacia evaporítica.

Na seção estratigráfica norte-sul, observa-se que a bacia evaporítica sofre uma redução de espessura nas suas extremidades (poços "A" e M-11) e um expressivo espessamento na região correspondente aos poços M-7 e M-8, os quais, estão situados na atual área de lavra por dissolução subterrânea (Fig. 5.13). Deve-se ressaltar que a sondagem do poço M-8 não atingiu a base do pacote evaporítico, podendo este intervalo ser mais espesso que o representado. Esse mesmo comportamento é verificado com a seção nordeste-sudoeste (Fig. 5.14), registrando-se uma maior espessura de sal no poço M-18, sugerindo que o provável depocentro localiza-se na região oeste da área de produção. A maior espessura está relacionada à criação de espaço de acomodação que, associada a outras variáveis, como clima árido e constante aporte de salmouras, permitiu a grande acumulação salina.

No detalhamento do perfil do poço "A" (Fig. 5.12) foram reconhecidas quatro seqüências do tipo 2, as quais estão limitadas no topo por uma seqüência do tipo 1. O limite de seqüência do tipo 1 se forma quando a taxa de queda eustática supera a taxa de subsidência da bacia. Dessa forma ocorre uma acentuada queda relativa do nível do mar. Nos dados do perfil fica evidente o deslocamento do *onlap* costeiro, caracterizado pela mudança abrupta de fácies, com presença de conglomerados.

As seqüências do tipo 2 (S1, S2, S3 e S4) estão situadas entre limites do tipo 2 (LS tipo 2), exceto a S4 que tem como limite uma seqüência do tipo 1. Este tipo de limite é interpretado como formado sob condições de menor variação eustática e de pouca mudança no *onlap* costeiro.

Os limites de seqüências do tipo 2 envolvem conjuntos de tratos de sistemas. Foram identificados três tratos de sistema: TST, TSMB e TSMA. A base do TST (trato de sistema transgressivo) ocorre como uma superfície transgressiva a partir do topo de um trato de sistema de mar baixo (TSMB) ou trato de sistema de mar alto (TSMA). Verifica-se uma mudança no padrão de empilhamento dos conjuntos de parasseqüências, passando de retrogradacional para agradacional, formando a superfície de máxima inundação marinha (SIM). O TSMB é caracterizado por uma queda relativa do nível do mar. Foram individualizados dois TSMB que correspondem as fases evaporíticas 1 e 2. O TSMA formou-se como resultado da lenta elevação do nível relativo do mar, antes do ponto máximo de eustasia.

Fig. 5.12 - Detalhamento do perfil do poço "A", com base na Estratigrafia de Seqüências

N

S

Fig. 5.13 - Seção estratigráfica norte-sul.

Fig. 5.14 - Seção estratigráfica nordeste-sudoeste.

Fig. 5.15 – Localização das seções estratigráficas.

6 – ESTUDOS GEOQUÍMICOS

6.1 – Geoquímica inorgânica

Foram selecionadas 63 amostras de halita do PP-1 para determinação dos teores de bromo, potássio, magnésio e cloro, além dos resíduos insolúveis, em análises por fluorescência de raios X, emissão e absorção atômica, e titulometria.

6.1.1 – Preparação das amostras

As amostras foram moídas por dois processos: a) moagem convencional, com as amostras secas; b) moagem das amostras imersas em etanol. Este último procedimento teve como objetivo a retirada da salmoura que poderia estar presente nas possíveis inclusões fluidas, o que levaria a resultados incorretos na análise dos teores de bromo, conforme metodologia descrita por Moretto (1988).

As amostras moídas à seco foram processadas individualmente, em um moinho de cilindros, revestido com carbeto de tungstênio, em mesa vibratória, com um minuto de agitação. No segundo procedimento, com as amostras imersas em etanol, foi usado um moinho de ágata, com esferas do mesmo material, em uma mesa vibratória para agitação durante 15 minutos e velocidade de 6,5 rpm.

Após a moagem, todas as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e etiquetadas. Aquelas moídas em etanol foram previamente filtradas, para separação do líquido, utilizando-se papel de filtro comum, com secagem em temperatura ambiente.

6.1.2 – Procedimentos analíticos

6.1.2.1 – Determinação dos teores de bromo

A partir das amostras moídas, a seco e com etanol, foram confeccionadas 126 pastilhas para análises dos teores de bromo por fluorescência de raios X. No processo foram utilizadas cápsulas de alumínio, previamente limpas com etanol, preenchidas com ácido bórico, e recobertas com aproximadamente 5g de amostra em grãos menores que 50 μ m, sendo depois prensadas durante 120 segundos, com 200 kN, em prensa Herzog.

A intensidade de fluorescência foi medida em um espectrofotômetro Phillips PW 1400, equipado com duas fontes de excitação diferentes: um tubo anodo de Rh e um tubo anodo de Au. Neste procedimento, a quantificação dos elementos foi realizada a partir de uma reta de calibração, confeccionada com base nos padrões em pastilha.

6.1.2.2 - Determinação dos teores de Cl, K e Mg

Para cada uma das 63 amostras salinas, moídas com etanol, foi preparada uma solução de 1g de amostra / 100 mL de água destilada, padrões para comparação dos teores e um branco para desconto das impurezas. A solução foi submetida a um processo de filtragem, para remoção dos insolúveis, em trompa à vácuo com filtros Milipore.

Para teores de Cloro

Utilizou-se um valorador automático, marca METROHM, modelo 702 SM TITRINO, para a titulação potenciométrica de Cl^- com AgNO_3 (nitrato de prata). O método utilizado foi o de % de NaCl e as convenções e fórmulas para cálculos dos resultados foram as seguintes:

$$\text{RS1} = (\text{EP1} \times \text{C01} \times \text{C02} / \text{C00}) \times \text{C03},$$

$$\text{RS1} = \% \text{ NaCl nos 100 mL de dissolução } 1\text{g} / 100 \text{ mL}$$

sendo,

$$\text{C01} = \text{Normalidade } \text{AgNO}_3$$

$$\text{C02} = 0,05844 \text{ e } \text{C03} = 10000$$

A partir dos resultados obtidos para RS1 foram calculados, para cada amostra, os valores de gCl^- , utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\text{peso da amostra} \times 6,0746 \times 10^{-3} \times \text{RS1} = \text{gCl}^-$$

A percentagem de Cl^- na amostra foi obtida a partir dos seguintes cálculos:

$$(\text{gCl}^-) / (\text{g amostra}) \times 100 = \% \text{ Cl}^-$$

Para teores de Magnésio e Potássio

Parte da solução preparada para análises dos cloretos foi utilizada para análises dos teores de Mg e K, em Espectrofotômetro Perkin-Elmer - modelo 603, obtendo-se

os teores de K por espectrometria de emissão atômica, e os teores de Mg por espectrometria de absorção atômica de chama, em 63 amostras do PP1.

6.1.3 - Resultados obtidos

6.1.3.1 - Teores de bromo

Os resultados analíticos, com as amostras moídas a seco, mostraram teores de bromo um pouco mais elevados do que aqueles nos quais as amostras foram moídas com etanol (Fig. 6.1). Esse resultado pode ser justificado pela presença de salmouras mais concentradas, aprisionadas nas halitas, sejam como inclusões fluidas primárias ou em bordos de grãos. O etanol permitiu a remoção dessas salmouras, que não fazem parte da rede cristalina da halita, sem alterar a sua composição original. Os resultados obtidos, na análise de cada amostra, foram ordenados do topo para a base da seqüência (Tab. 6.1 e 6.2).

A partir desses resultados foram construídos os respectivos gráficos e sua curva de variação inserida no perfil estratigráfico do PP1, de forma a permitir uma melhor visualização da variação da salinidade ao longo da coluna (Fig. 6.2).

Fig. 6.1 - Gráficos dos teores de bromo em amostras moídas a seco e com imersão em etanol

Tab. 6.1 - Resultados analíticos dos teores de bromo (amostras 1 a 31).

Número de ordem	Amostras nº	Br ⁻ (ppm) (seco)	Br ⁻ (ppm) (c/ etanol)
1	PP1 -16.4	61	48
2	PP1 -16.5	55	43
3	PP1 -17.2	71	58
4	PP1 -17.4	80	55
5	PP1 -18.2	78	56
6	PP1 -18.4	70	46
7	PP1 -19.2	83	57
8	PP1 -19.4	69	41
9	PP1 -20.2	50	31
10	PP1 -20.4	68	51
11	PP1 -21.1	39	23
12	PP1 -21.3	47	33
13	PP1 -22.1	48	29
14	PP1 -22.5	37	27
15	PP1 -23.2	67	47
16	PP1 -23.4	45	28
17	PP1 -24.1	45	26
18	PP1 -24.3	45	28
19	PP1 -24.5	34	21
20	PP1 -25.1	34	18
21	PP1 -25.3	36	19
22	PP1 -25.5	51	32
23	PP1 -26.1	66	44
24	PP1 -26.3	61	40
25	PP1 -26.5	34	21
26	PP1 -27.1	27	16
27	PP1 -27.3	36	23
28	PP1 -27.5	42	27
29	PP1 -28.1	36	23
30	PP1 -28.3	37	22
31	PP1 -28.5	44	25

Tab. 6.2 - Resultados analíticos dos teores de bromo (amostras 32 a 63).

Número de ordem	Amostras nº	Br ⁻ (ppm) (seco)	Br ⁻ (ppm) (c/ etanol)
32	PP1 -29.1	38	23
33	PP1 -29.5	67	46
34	PP1 -30.2	37	24
35	PP1 -30.4	38	26
36	PP1 -31.2	38	27
37	PP1 -31.4	33	22
38	PP1 -31.6	29	17
39	PP1 -32.2	38	23
40	PP1 -32.4	43	25
41	PP1 -33.2	49	31
42	PP1 -33.4	47	29
43	PP1 -34.2	49	31
44	PP1 -34.4	57	37
45	PP1 -35.2	63	41
46	PP1 -35.4	62	39
47	PP1 -36.2	35	24
48	PP1 -36.4	39	22
49	PP1 -37.1	34	20
50	PP1 -37.2	36	24
51	PP1 -37.3	34	20
52	PP1 -39.5	30	18
53	PP1 -39.6	33	19
54	PP1 -40.1	35	22
55	PP1 -40.3	47	30
56	PP1 -40.5	49	32
57	PP1 -41.1	66	42
58	PP1 -41.3	55	34
59	PP1 -42.4	48	30
60	PP1 -42.5	60	38
61	PP1 -42.6	52	28
62	PP1 -43.2	51	35
63	PP1 -43.4	56	34

Fig. 6.2 - Perfil dos teores de bromo do PP-1.

6.1.3.2 - Teores de resíduos insolúveis

Para se obter os teores de resíduos insolúveis foram utilizados os seguintes procedimentos: determinação do peso inicial de cada filtro, pesagem de aproximadamente 1g de cada amostra, diluição em água destilada, filtragem da solução em filtros Milipore com uso de trompa de água. Após a secagem dos filtros em estufa a 50 °C os mesmos foram pesados, deduzindo-se o peso inicial do filtro vazio, obtendo-se o peso dos insolúveis e realizando-se os cálculos do seu respectivo percentual (Tab. 6.3 e 6.4). Os valores obtidos são apresentados na forma de um gráfico para melhor visualização (Fig. 6.3).

Fig. 6.3 - Gráfico dos teores de resíduos insolúveis.

No gráfico acima verifica-se um valor muito elevado para a amostra 12, com quase 9% de resíduos insolúveis. O excesso de material insolúvel é observado principalmente nas porções escuras das halitas bandeadas, ricas em matéria orgânica e argilominerais.

Tab. 6.3 - Resultados dos teores de resíduos insolúveis (amostras 1 a 31).

Número de ordem	Amostras 1 (a seco)	Peso da amostra (g)	Peso do filtro (g)	Peso do filtro com insoluv.(g)	Peso dos insolúveis (g)	Resíduo insolúvel (%)
1	PP1 -16.4	1,0121	0,0909	0,0945	0,0036	0,36
2	PP1 -16.5	1,0012	0,0902	0,0962	0,0060	0,60
3	PP1 -17.2	1,0007	0,0853	0,0910	0,0057	0,57
4	PP1 -17.4	1,0001	0,0860	0,0894	0,0034	0,34
5	PP1 -18.2	1,0000	0,0915	0,0938	0,0023	0,23
6	PP1 -18.4	1,0002	0,0905	0,1000	0,0095	0,95
7	PP1 -19.2	1,0000	0,0905	0,0951	0,0046	0,46
8	PP1 -19.4	1,0003	0,0899	0,0941	0,0042	0,42
9	PP1 -20.2	1,0003	0,0903	0,0930	0,0027	0,27
10	PP1 -20.4	1,0004	0,0906	0,0935	0,0029	0,29
11	PP1 -21.1	1,0006	0,0916	0,1789	0,0873	8,72
12	PP1 -21.3	1,0007	0,0907	0,0956	0,0049	0,49
13	PP1 -22.1	1,0008	0,0900	0,0945	0,0045	0,45
14	PP1 -22.5	1,0003	0,0903	0,1084	0,0181	1,81
15	PP1 -23.2	1,0006	0,0906	0,0934	0,0028	0,28
16	PP1 -23.4	1,0002	0,0915	0,0948	0,0033	0,33
17	PP1 -24.1	1,0000	0,0929	0,0932	0,0003	0,03
18	PP1 -24.3	1,0002	0,0909	0,0939	0,0030	0,30
19	PP1 -24.5	1,0003	0,0919	0,0930	0,0011	0,11
20	PP1 -25.1	1,0002	0,0906	0,0981	0,0075	0,75
21	PP1 -25.3	1,0006	0,0909	0,0942	0,0033	0,33
22	PP1 -25.5	1,0002	0,0900	0,0940	0,0040	0,40
23	PP1 -26.1	1,0004	0,0903	0,0932	0,0029	0,29
24	PP1 -26.3	1,0003	0,0899	0,0948	0,0049	0,49
25	PP1 -26.5	1,0006	0,0889	0,0937	0,0048	0,48
26	PP1 -27.1	1,0007	0,0864	0,0952	0,0088	0,88
27	PP1 -27.3	1,0004	0,0866	0,0933	0,0067	0,67
28	PP1 -27.5	1,0003	0,0871	0,0922	0,0051	0,51
29	PP1 -28.1	1,0002	0,0869	0,1014	0,0145	1,45
30	PP1 -28.3	1,0000	0,0876	0,0906	0,0030	0,30
31	PP1 -28.5	1,0002	0,0876	0,0907	0,0031	0,31

Tab. 6.4 - Resultados dos teores de resíduos insolúveis (amostras 32 a 63).

Número de ordem	Amostras 1 (a seco)	Peso da amostra (g)	Peso do filtro (g)	Peso do filtro com insoluv.(g)	Peso dos insolúveis (g)	Resíduo insolúvel (%)
32	PP1 -29.1	1,0006	0,0878	0,0905	0,0027	0,27
33	PP1 -29.5	1,0004	0,0867	0,0941	0,0074	0,74
34	PP1 -30.2	1,0000	0,0866	0,0910	0,0044	0,44
35	PP1 -30.4	1,0011	0,0867	0,0918	0,0051	0,51
36	PP1 -31.2	1,0008	0,0870	0,0936	0,0066	0,66
37	PP1 -31.4	1,0009	0,0865	0,0900	0,0035	0,35
38	PP1 -31.6	1,0008	0,0866	0,0907	0,0041	0,41
39	PP1 -32.2	1,0006	0,0866	0,0899	0,0033	0,33
40	PP1 -32.4	1,0004	0,0869	0,0925	0,0056	0,56
41	PP1 -33.2	1,0006	0,0864	0,0896	0,0032	0,32
42	PP1 -33.4	1,0010	0,0869	0,0905	0,0036	0,36
43	PP1 -34.2	1,0009	0,0865	0,1003	0,0138	1,38
44	PP1 -34.4	1,0008	0,0865	0,0899	0,0034	0,34
45	PP1 -35.2	1,0003	0,0863	0,0904	0,0041	0,41
46	PP1 -35.4	1,0008	0,0867	0,0897	0,0030	0,30
47	PP1 -36.2	1,0005	0,0865	0,0960	0,0095	0,95
48	PP1 -36.4	1,0004	0,0859	0,0908	0,0049	0,49
49	PP1 -37.1	1,0005	0,0867	0,0908	0,0041	0,41
50	PP1 -37.2	1,0006	0,0861	0,0892	0,0031	0,31
51	PP1 -37.3	1,0005	0,0855	0,0888	0,0033	0,33
52	PP1 -39.5	1,0006	0,0855	0,0911	0,0056	0,56
53	PP1 -39.6	1,0005	0,0856	0,0887	0,0031	0,31
54	PP1 -40.1	1,0003	0,0865	0,0914	0,0049	0,49
55	PP1 -40.3	1,0004	0,0862	0,0920	0,0058	0,58
56	PP1 -40.5	1,0006	0,0863	0,0952	0,0089	0,89
57	PP1 -41.1	1,0004	0,0862	0,0907	0,0045	0,45
58	PP1 -41.3	1,0004	0,0857	0,0903	0,0046	0,46
59	PP1 -42.4	1,0002	0,0858	0,0918	0,0060	0,60
60	PP1 -42.5	1,0002	0,0852	0,0935	0,0083	0,83
61	PP1 -42.6	1,0002	0,0857	0,0894	0,0037	0,37
62	PP1 -43.2	1,0006	0,0854	0,0969	0,0115	1,15
63	PP1 -43.4	1,0008	0,0853	0,0971	0,0118	1,18

6.1.3.3 - Teores de Cloro

Os teores de cloro foram calculados mediante o procedimento analítico descrito anteriormente, a partir de amostras diluídas em 100mL de água destilada, com filtragem para retirada dos resíduos insolúveis. A folha de cálculos, resultados (Tab. 6.5 e 6.6) e o gráfico obtido (Fig. 6.4) foram os seguintes:

Fig. 6.4 - Gráfico dos teores de cloro.

Tab. 6.5 - Resultados analíticos dos teores de cloro (amostras 1 a 31).

Número de ordem	Amostras (a seco)	Peso da Amostra (g)	Peso dos Insolúveis (g)	Peso líquido A - I (g)	RS1 (%NaCl)	Cl ⁻ (g)	Resultado (% Cl ⁻)
1	PP1 -16.4	1,0121	0,0036	1,0085	100,46	0,6154	61,03
2	PP1 -16.5	1,0012	0,0060	0,9952	99,36	0,6007	60,36
3	PP1 -17.2	1,0007	0,0057	0,9950	100,46	0,6072	61,03
4	PP1 -17.4	1,0001	0,0034	0,9967	99,68	0,6035	60,55
5	PP1 -18.2	1,0000	0,0023	0,9977	99,51	0,6031	60,45
6	PP1 -18.4	1,0002	0,0095	0,9907	98,97	0,5956	60,12
7	PP1 -19.2	1,0000	0,0046	0,9954	99,72	0,6030	60,58
8	PP1 -19.4	1,0003	0,0042	0,9961	100,11	0,6058	60,81
9	PP1 -20.2	1,0003	0,0027	0,9976	98,95	0,5996	60,11
10	PP1 -20.4	1,0004	0,0029	0,9975	100,28	0,6076	60,92
11	PP1 -21.1	1,0006	0,0873	0,9133	90,98	0,5048	55,27
12	PP1 -21.3	1,0007	0,0049	0,9958	99,72	0,6032	60,58
13	PP1 -22.1	1,0008	0,0045	0,9963	99,46	0,6019	60,42
14	PP1 -22.5	1,0003	0,0181	0,9822	99,94	0,5963	60,71
15	PP1 -23.2	1,0006	0,0028	0,9978	99,28	0,6018	60,31
16	PP1 -23.4	1,0002	0,0033	0,9969	98,15	0,5944	59,62
17	PP1 -24.1	1,0000	0,0003	0,9997	99,94	0,6069	60,71
18	PP1 -24.3	1,0002	0,0030	0,9972	100,00	0,6058	60,75
19	PP1 -24.5	1,0003	0,0011	0,9992	100,02	0,6071	60,76
20	PP1 -25.1	1,0002	0,0075	0,9927	99,20	0,5982	60,26
21	PP1 -25.3	1,0006	0,0033	0,9973	99,97	0,6056	60,73
22	PP1 -25.5	1,0002	0,0040	0,9962	99,93	0,6047	60,70
23	PP1 -26.1	1,0004	0,0029	0,9975	99,91	0,6054	60,69
24	PP1 -26.3	1,0003	0,0049	0,9954	99,67	0,6027	60,55
25	PP1 -26.5	1,0006	0,0048	0,9958	99,50	0,6019	60,44
26	PP1 -27.1	1,0007	0,0088	0,9919	99,87	0,6018	60,67
27	PP1 -27.3	1,0004	0,0067	0,9937	99,88	0,6029	60,67
28	PP1 -27.5	1,0003	0,0051	0,9952	99,70	0,6027	60,56
29	PP1 -28.1	1,0002	0,0145	0,9857	98,71	0,5910	59,96
30	PP1 -28.3	1,0000	0,0030	0,9970	100,01	0,6057	60,75
31	PP1 -28.5	1,0002	0,0031	0,9971	100,73	0,6101	61,19

Tab. 6.6 - Resultados analíticos dos teores de cloro (amostras 32 a 63)

Número de ordem	Amostras (a seco)	Peso da Amostra (g)	Peso dos Insolúveis (g)	Peso líquido A - I (g)	RS1 (%NaCl)	Cl ⁻ (g)	Resultado (% Cl ⁻)
32	PP1 -29.1	1,0006	0,0027	0,9979	99,99	0,6061	60,74
33	PP1 -29.5	1,0004	0,0074	0,9930	99,66	0,6012	60,54
34	PP1 -30.2	1,0000	0,0044	0,9956	100,38	0,6071	60,98
35	PP1 -30.4	1,0011	0,0051	0,9960	100,36	0,6072	60,96
36	PP1 -31.2	1,0008	0,0066	0,9942	100,00	0,6039	60,75
37	PP1 -31.4	1,0009	0,0035	0,9974	100,57	0,6093	61,09
38	PP1 -31.6	1,0008	0,0041	0,9967	100,40	0,6079	60,99
39	PP1 -32.2	1,0006	0,0033	0,9973	100,79	0,6106	61,23
40	PP1 -32.4	1,0004	0,0056	0,9948	100,52	0,6074	61,06
41	PP1 -33.2	1,0006	0,0032	0,9974	100,51	0,6154	61,70
42	PP1 -33.4	1,0010	0,0036	0,9974	100,35	0,6007	60,22
43	PP1 -34.2	1,0009	0,0138	0,9871	103,49	0,6072	61,51
44	PP1 -34.4	1,0008	0,0034	0,9974	100,37	0,6035	60,51
45	PP1 -35.2	1,0003	0,0041	0,9962	100,49	0,6031	60,54
46	PP1 -35.4	1,0008	0,0030	0,9978	100,56	0,5956	59,69
47	PP1 -36.2	1,0005	0,0095	0,9910	99,70	0,6030	60,84
48	PP1 -36.4	1,0004	0,0049	0,9955	99,78	0,6058	60,85
49	PP1 -37.1	1,0005	0,0041	0,9964	100,44	0,5996	60,18
50	PP1 -37.2	1,0006	0,0031	0,9975	100,48	0,6076	60,92
51	PP1 -37.3	1,0005	0,0033	0,9972	103,71	0,5048	50,62
52	PP1 -39.5	1,0006	0,0056	0,9950	100,67	0,6032	60,62
53	PP1 -39.6	1,0005	0,0031	0,9974	100,86	0,6019	60,35
54	PP1 -40.1	1,0003	0,0049	0,9954	100,01	0,5963	59,90
55	PP1 -40.3	1,0004	0,0058	0,9946	100,78	0,6018	60,50
56	PP1 -40.5	1,0006	0,0089	0,9917	100,50	0,5944	59,93
57	PP1 -41.1	1,0004	0,0045	0,9959	100,73	0,6069	60,94
58	PP1 -41.3	1,0004	0,0046	0,9958	100,05	0,6058	60,83
59	PP1 -42.4	1,0002	0,0060	0,9942	99,30	0,6071	61,06
60	PP1 -42.5	1,0002	0,0083	0,9919	99,98	0,5982	60,31
61	PP1 -42.6	1,0002	0,0037	0,9965	100,57	0,6056	60,78
62	PP1 -43.2	1,0006	0,0115	0,9891	98,87	0,6047	61,14
63	PP1 -43.4	1,0008	0,0118	0,9890	99,31	0,6054	61,21

6.1.3.4 - Teores de Magnésio e Potássio

Os teores de magnésio e de potássio, obtidos em cada amostra analisada (Tab. 6.7 e 6.8), com seus respectivos gráficos (Fig. 6.5), foram os seguintes:

Fig. 6.5 - Gráficos dos teores de magnésio e de potássio.

Observa-se a ocorrência de valores anômalos nas amostras 43 e 51, o que poderia ser justificado pela presença de sais solúveis com esses componentes, como a carnalita. Porém, tal anomalia deveria ter sido registrada no perfil de bromo, o que não foi verificado.

Tab. 6.7 - Resultados analíticos dos teores de magnésio e de potássio
(amostras 1 a 31)

Número de ordem	Amostras n°	Mg ⁺⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)
1	PP1 -16.4	35	36
2	PP1 -16.5	66	47
3	PP1 -17.2	59	84
4	PP1 -17.4	33	48
5	PP1 -18.2	24	44
6	PP1 -18.4	55	86
7	PP1 -19.2	71	46
8	PP1 -19.4	36	24
9	PP1 -20.2	30	28
10	PP1 -20.4	36	27
11	PP1 -21.1	112	28
12	PP1 -21.3	49	28
13	PP1 -22.1	43	32
14	PP1 -22.5	80	38
15	PP1 -23.2	41	20
16	PP1 -23.4	36	38
17	PP1 -24.1	31	23
18	PP1 -24.3	31	32
19	PP1 -24.5	52	17
20	PP1 -25.1	44	30
21	PP1 -25.3	49	33
22	PP1 -25.5	60	33
23	PP1 -26.1	39	48
24	PP1 -26.3	54	24
25	PP1 -26.5	26	21
26	PP1 -27.1	32	17
27	PP1 -27.3	49	47
28	PP1 -27.5	46	66
29	PP1 -28.1	91	63
30	PP1 -28.3	79	15
31	PP1 -28.5	40	15

Tab. 6.8 - Resultados analíticos dos teores de magnésio e de potássio
(amostras 32 a 63)

Número de ordem	Amostras n°	Mg ⁺⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)
32	PP1 -29.1	62	26
33	PP1 -29.5	57	52
34	PP1 -30.2	48	37
35	PP1 -30.4	60	31
36	PP1 -31.2	77	45
37	PP1 -31.4	60	29
38	PP1 -31.6	28	28
39	PP1 -32.2	48	26
40	PP1 -32.4	60	49
41	PP1 -33.2	37	36
42	PP1 -33.4	54	36
43	PP1 -34.2	304	864
44	PP1 -34.4	18	25
45	PP1 -35.2	41	45
46	PP1 -35.4	21	40
47	PP1 -36.2	101	55
48	PP1 -36.4	41	24
49	PP1 -37.1	29	31
50	PP1 -37.2	49	27
51	PP1 -37.3	739	2434
52	PP1 -39.5	29	32
53	PP1 -39.6	32	26
54	PP1 -40.1	32	17
55	PP1 -40.3	51	100
56	PP1 -40.5	37	176
57	PP1 -41.1	32	19
58	PP1 -41.3	40	27
59	PP1 -42.4	29	37
60	PP1 -42.5	37	39
61	PP1 -42.6	29	30
62	PP1 -43.2	32	47
63	PP1 -43.4	46	70

6.2 - Geoquímica orgânica

6.2.1 - Conceitos básicos

As rochas sedimentares podem conter quantidades variáveis de matéria orgânica de diferentes origens. O estudo desse conteúdo, com o uso da geoquímica orgânica, pode contribuir para o conhecimento dos processos biológicos que foram atuantes no passado.

Nas últimas décadas a geoquímica orgânica tem sido de utilização imprescindível na geologia do petróleo. Seu emprego tem como objetivo esclarecer a origem, migração, acumulação e qualidade dos hidrocarbonetos gerados nas bacias sedimentares.

A presença de folhelhos orgânicos, intercalados aos depósitos evaporíticos, permite a aplicação da geoquímica orgânica na avaliação do ambiente deposicional, como, por exemplo, a evolução das influências marinha/continental e variações das condições oxidantes e redutoras, bem como do seu potencial como rocha geradora de petróleo.

Aplicações da geoquímica orgânica em sedimentos evaporíticos têm sido demonstrada em diversos artigos, como o de Santos Neto *et al.* (1998), com o intervalo evaporítico da Bacia Potiguar; o trabalho de Benalioulhaj *et al.* (1994), com geoquímica de lagos salinos; e os trabalhos de Barbe *et al.* (1990) e de Teixidor *et al.* (1993), estes últimos com estudos da matéria orgânica contida em halitas.

6.2.1.1 - O ambiente anóxico

A matéria orgânica que atinge o fundo de uma bacia sedimentar, sob condições anóxicas, pode ser preservada nos sedimentos.

Um ambiente aquático anóxico é uma massa de água desprovida de oxigênio, em que toda a atividade biológica aeróbica já cessou. Condições anóxicas ocorrem onde a demanda por oxigênio na coluna de água excede o suprimento. A demanda de oxigênio refere-se à produtividade biológica da superfície, considerando-se que o suprimento de oxigênio depende muito da circulação da água (Demaison & Moore, 1980).

A oxigenação das águas do fundo é governada pelas seguintes propriedades físicas: a) a densidade da água aumenta com o aumento da salinidade; b) a densidade da água aumenta com o decréscimo da temperatura (até 4 °C); c) a solubilidade do oxigênio na água varia inversamente com o decréscimo da temperatura e da salinidade (Demaison & Moore, *op. cit.*).

A máxima saturação de oxigênio na água do mar é de 6 a 8,5 mililitros de oxigênio por litro d'água, dependendo da sua temperatura e salinidade. A "anoxia" é definida por Demaison & Moore (*op. cit.*) quando uma massa de água contém menos que 0,5 mL de oxigênio por litro de água. Corpos de águas anóxicas são formados onde a taxa de reposição de oxigênio dissolvido, para as águas do fundo, é menor que a taxa de consumo por microrganismos aeróbicos (Pedersen & Calvert, 1990).

O consumo de oxigênio na água é essencialmente um processo bioquímico resultante da degradação da matéria orgânica. A oxidação da matéria orgânica é realizada por microrganismos aeróbicos que usam o oxigênio dissolvido (Calvert, 1987). A degradação bacteriológica ocorre de forma rápida e eficiente em condições aeróbicas, conforme a seguinte reação:

Quando a taxa de reposição de oxigênio é menor que a taxa de consumo, outros oxidantes são usados por diferentes comunidades microbiológicas para continuar o processo de decomposição. Com a exaustão do oxigênio, outros microrganismos degradam o substrato orgânico, usando diferentes oxidantes disponíveis: primeiro o nitrato, seguido de sulfato e, finalmente, o CO_2 .

A última e menos importante etapa no metabolismo anaeróbico é a fermentação. Nela, o grupo carboxila e ácidos orgânicos da matéria orgânica, ou de bactérias, são empregados como aceptores de elétrons. Um tipo especial de fermentação anaeróbica é a metanogênese bacteriana. A degradação anaeróbica é termodinamicamente menos eficiente que a decomposição aeróbica, e resulta em resíduos orgânicos mais reduzidos, ricos em lipídios e hidrogênio que aqueles da degradação aeróbica (Bordenave, 1993).

O teor de carbono orgânico contido em sedimentos de águas anóxicas é significativamente maior (de 1% a pouco mais que 20%) que aqueles existentes em sedimentos depositados sob condições oxigenadas (Demailson & Moore, 1980).

Os eventos anóxicos possuem grande importância econômica, principalmente aqueles ocorridos no Cretáceo, pois são responsáveis pela geração de quase 30% das reservas mundiais de petróleo (Klemme & Ulmishek, 1991).

6.2.1.2 - A acumulação da matéria orgânica

Tissot & Welte (1984) utilizam o termo “matéria orgânica” no sentido de material que contém moléculas orgânicas, derivadas direta ou indiretamente de organismos, não sendo incluídos o seu esqueleto, como ossos, dentes e conchas.

A acumulação de matéria orgânica em sedimentos pode ser influenciada por fatores biológicos e físicos. Os fatores biológicos incluem a produtividade biológica primária no meio aquoso, bem como as modificações moleculares e estruturais causadas pela reciclagem microbiológica altamente ativa. Os fatores físicos mais importantes são aqueles que afetam o transporte da matéria orgânica antes da sua deposição, tais como densidade, taxas de sedimentação e diâmetro das partículas (Brooks *et al.*, 1987). É a interação destes fatores que determina a qualidade, preservação e quantidade da matéria orgânica numa bacia (Demailson & Moore, 1980).

6.2.1.3 - A fonte de matéria orgânica

A principal fonte de matéria orgânica na água é o fitoplâncton, em sua maioria composto por algas microscópicas que habitam as camadas superiores da água, iluminada pela luz solar, denominada de zona eufótica (Bordovsky, 1965). Além do fitoplâncton, são mencionados como importantes as bactérias, plantas vasculares, além de pequena contribuição da fauna aquática e outros organismos (Volkman, 1988). Outra fonte, em ambientes aquáticos, corresponde a matéria orgânica transportada por rios, correntes superficiais e ventos (Brooks *et al.*, 1987).

Outro fator limitante para a produtividade planctônica, além da luz, é a disponibilidade de nutrientes minerais, especialmente nitratos e fosfatos, pouco abundantes na zona eufótica. A produção primária pelo fitoplâncton representa a base da cadeia alimentar marinha (Calvert, 1987). O fitoplâncton é intensivamente

consumido pelo zooplâncton e este, por sua vez, é consumido pelos invertebrados e peixes (Demaison & Moore, 1980).

Toda a matéria orgânica, de origem terrestre ou marinha, deriva de processos fotossintéticos que transformam a energia solar em energia química. A transferência de hidrogênio da água para dióxido de carbono permite a síntese da glicose, envolvendo complexa reação, abaixo resumida.

Essa reação endotérmica usa o dióxido de carbono, tanto o da atmosfera, consumido pelas plantas, quanto aquele dissolvido na água, consumido por algas planctônicas unicelulares e algas multicelulares, liberando oxigênio (Bordenave, 1993).

Em síntese, o processo fotossintético é uma reação bioquímica do hidrogênio da água com o dióxido de carbono que, com absorção de energia, produz matéria orgânica na forma de glicose. Este processo converte a energia luminosa em energia química. A partir da glicose os organismos autotróficos (sintetizadores da matéria orgânica) podem metabolizar polissacarídeos, como celulose e amido, e demais constituintes próprios para a subsistência. Os organismos autotróficos, como as bactérias fotossintéticas, inclusive as cianobactérias (algas azuis), foram os primeiros responsáveis pela produção significativa de matéria orgânica (Bordenave, *op. cit.*).

6.2.1.4 – Evaporitos e matéria orgânica

Quando uma bacia evaporítica recebe um influxo marinho para compensar a perda de água por evaporação, grande quantidade de nutrientes são disponibilizados e uma impressionante proliferação de algas acontece em um período de tempo muito curto, enquanto o nível de salinidade for adequado para permitir a sua sobrevivência (Bordenave, 1993).

Como resultado da estratificação da massa aquosa, causada pela densidade, condições anóxicas são desenvolvidas nas águas estagnadas do fundo, facilitada pela baixa solubilidade do oxigênio em salmouras concentradas. Na ausência de vida no

fundo, argilas sapropélicas altamente orgânicas, finamente laminadas, são acumuladas durante a fase pré-evaporítica (Bordenave, *op. cit.*).

Variações sazonais na concentração da salmoura, bem como alterações verticais de temperatura, podem levar a periódicas mortandades em massa de organismos planctônicos e nectônicos. As substâncias orgânicas mortas podem se acumular no fundo da bacia anóxica, contribuindo para a formação do conteúdo orgânico dos sedimentos e, após o soterramento, tornarem-se disponíveis como futura fonte de óleo (Schmalz, 1969; Klingspor, 1969).

Quando as condições hipersalinas são alcançadas para a precipitação de halita, somente um pequeno número de espécies pode manter a pressão osmótica nesses níveis de salinidade, como as algas azuis e algumas bactérias anaeróbicas (Sonnenfeld, 1985).

Kirkland & Evans (1981) demonstram que os ambientes evaporíticos são de grande importância para a formação de rochas geradoras de petróleo, pois são caracterizados por elevada produtividade do fitoplâncton. Nesses ambientes, a estratificação da salmoura cria condições redutoras no fundo e, com isso, a matéria orgânica pode ser preservada.

Hite & Anders (1991) apresentam diversas evidências de que os ambientes evaporíticos são capazes de gerar e de preservar grande quantidade de matéria orgânica. Como exemplo, citam as rochas portadoras de elevado teor de matéria orgânica, mencionadas como folhelhos negros, que fazem parte da espessa sequência do ciclo carbonático-evaporítico da Bacia de Paradox, nos Estados Unidos.

Wiles *et al.* (1998) mencionam que as bacias sedimentares do Atlântico Sul registram episódios de deposição rica em matéria orgânica, do Cretáceo ao Recente, destacado-se o evento ocorrido no Aptiano, com lamitos organicamente ricos, depositados em ambientes hipersalinos, associados a transição *rift-drift* do Atlântico Sul.

6.2.1.5 – Matéria orgânica e hidrocarbonetos

As rochas sedimentares ricas em matéria orgânica, denominadas de rochas geradoras, são de fundamental importância para a Geologia do Petróleo, pois podem gerar óleo e gás (Bordenave, 1993). Rochas organicamente ricas geralmente são citadas como “folhelhos negros” (Hite & Anders, 1991).

Uma rocha geradora contém matéria orgânica solúvel e insolúvel. A parte solúvel, que pode ser removida com solventes orgânicos, é denominada de “betume” e, a porção insolúvel, denomina-se de “querogênio” (Tissot & Welte, 1984). Uma rocha é considerada como geradora de petróleo em potencial quando o seu limite inferior de carbono orgânico for de 0,5% para rochas siliciclásticas, e de 0,3% para rochas carbonáticas e evaporíticas. Se uma rocha contém cerca de 0,5% de carbono orgânico, estima-se que ela possa produzir óleo e gás, desde que seja soterrada a profundidade adequada (Tissot & Welte, *op. cit.*).

A média do teor de carbono orgânico para folhelhos considerados rochas geradoras é de 2% aproximadamente. Para rochas carbonáticas a média de valor é de 0,6%. O limite inferior de 0,5% foi definido por Ronov (1958, *apud* Tissot & Welte, *op. cit.*), a partir de 26.000 amostras de diferentes idades e ambientes. Contudo, alguns laboratórios preferem usar o limite de 1% para rochas-fonte siliciclásticas (Tissot & Welte, *op. cit.*).

Brooks *et al.* (1987) fazem uma distinção entre os termos “rocha geradora” e “potenciais rochas geradoras”. Para estes autores uma potencial rocha geradora seria aquela rocha que tem a capacidade de gerar hidrocarbonetos, em quantidades comerciais, na forma de óleo e gás, porém, ainda não atingiu maturidade orgânica suficiente para a sua geração.

Folhelhos negros ou folhelhos betuminosos são as maiores fontes de petróleo e estão concentrados especialmente nos períodos Jurássico e Cretáceo (Hallam, 1987). Esses folhelhos, depositados em um meio aquoso anóxico, possuem um teor de carbono orgânico situado entre 1% e 20% por peso. Como a degradação bacteriológica anaeróbica é menos eficiente que a aeróbica, o resíduo orgânico resultante é relativamente rico em lipídios, rico em hidrogênio e pobre em oxigênio, o que é fundamental para a gênese do petróleo (Hallam, *op. cit.*).

Sedimentos que contém mais de 2% de carbono orgânico são comuns em diversos intervalos estratigráficos do Atlântico Sul. A litologia, em sua maioria, corresponde a calcários e folhelhos, mas pode incluir sedimentos terrígenos grossos, lamitos e dolomitos. O termo folhelho negro (*black shale*) é usado indistintamente como sedimentos organicamente ricos (Stow, 1987).

6.2.1.6 - Marcadores biológicos

O estudo da matéria orgânica, contida nas rochas sedimentares, pode contribuir para o conhecimento dos processos biológicos e das condições ambientais de sedimentação ocorridos no passado.

As moléculas orgânicas aprisionadas nos sedimentos são denominadas de fósseis geoquímicos, marcadores biológicos ou biomarcadores, e representam um potencial indicador para o estabelecimento das condições ambientais de sedimentação (Rodrigues *et al.*, 1984).

Marcadores biológicos são complexos componentes orgânicos de rochas sedimentares ou de petróleo, com estruturas químicas que podem ser relacionadas com os seus precursores biológicos (Brassell *et al.*, 1987). Características específicas de biomarcadores permitem a diferenciação entre ambientes lacustrinos e marinhos, e podem ajudar na avaliação da temperatura da superfície do mar e níveis de salinidade (Brassel, 1992).

Dentre os constituintes orgânicos, presentes nas rochas sedimentares, são encontrados aminoácidos, carboidratos, pigmentos orgânicos e lipídios. Porém, sob condições diagenéticas, nem sempre a sua estrutura química é preservada. Em geral os componentes mais estáveis são os lipídios, presentes em sua forma original ou com pequenas modificações (Albaigés *et al.*, 1980).

Os lipídios são compostos orgânicos que contêm hidrocarbonetos alifáticos de cadeia longa (cíclicos ou acíclicos) e seus derivados, como os ácidos graxos, álcoois, amino e aldeídos. Operacionalmente, os lipídios são definidos como a fração da matéria orgânica que pode ser isolada do material biológico por extração com solventes orgânicos, como metanol, diclorometano, tolueno ou hexano (Meyers & Ishiwatari, 1993).

Os lipídios contidos em sedimentos normalmente diferem daqueles contidos na matéria biológica. Por causa das modificações diagenéticas o termo “geolipídio” é aplicado para as frações que são extraídas da matéria orgânica sedimentar (Meyers & Ishiwatari, *op. cit.*).

6.2.1.7 - Análise dos biomarcadores

Na estudo de biomarcadores o método mais utilizado é a análise por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (CG-MS). Este método consiste no uso de um cromatógrafo, no qual, a amostra contendo o extrato orgânico é introduzida através de um injetor, para vaporização de seus componentes, que são conduzidos a uma coluna, onde a separação ocorre pela interação diferencial de cada componente da amostra com o material da coluna. O espectrômetro de massas atua como detector do cromatógrafo de gás, realizando a fragmentação das moléculas em pontos específicos de suas estruturas, conforme a fragilidade de certas ligações ou estabilidade dos fragmentos formados. Desta maneira o espectro de massas obtido é formado por um gráfico da abundância relativa dos seus diversos fragmentos em função da sua massa. Os fragmentogramas correspondem a um gráfico de intensidade de um íon específico de acordo com o seu tempo de retenção (Rodrigues *et al.*, 1984).

As mudanças estereoquímicas ocorridas com as moléculas, como resultado do soterramento e temperatura elevada, podem ser usadas para a reconstituição do ambiente deposicional e determinação da maturidade do material (Mello & Estrella, 1984). Ainda, a distribuição dos biomarcadores fornece informações sobre a biodegradação e suas relativas distâncias de migração (Philp & Gilbert, 1986; Philp & Johnston, 1988).

6.2.1.8 – Tipos de biomarcadores

A classificação dos hidrocarbonetos é feita a partir da sua estrutura molecular e relação carbono/hidrogênio. Desta forma, esses compostos são distribuídos em três grupos: saturados, insaturados e aromáticos. Os hidrocarbonetos saturados, também denominados de alcanos ou parafínicos, são aqueles cujos átomos de carbono são unidos somente por ligações simples e formam cadeias lineares, ramificadas e cíclicas, interligadas ou não. As parafinas normais de baixo peso molecular (próximas ao C₁₇) indicam uma matéria orgânica derivada de algas marinhas, enquanto que as parafinas com alto peso molecular (C₂₃ – C₂₉) caracterizam a matéria orgânica de origem continental (Freitas & Santos, 1984). Entre estes componentes estão o Pristano e o Fitano que podem ser úteis como indicadores das condições paleoambientais de

deposição (oxidante/redutor) e da origem continental ou marinha da matéria orgânica (Didyk *et al.*, 1978; ten Haven *et al.*, 1987).

Os ambientes salinos podem ser caracterizados pelo elevado teor de TOC, presença de β -carotano, alta concentração de C_{30} e $\alpha\beta$ -hopano, abundância moderada de gamacerano, $i-C_{25}$ regular isoprenóide, $i-C_{30}$ esqualano, dentre outros (Hite & Anders, 1991; Mello *et al.*, 1995). A indicação de ambiente marinho seria sugerida pelas presenças de dinosterano, originado de dinoflagelados marinhos, e do C_{30} regular esterano, originado de algas marinhas (Moldowan, 1984; Krabbe, 1996). Cromatogramas com bimodalidade são indicativos de matéria orgânica transicional.

6.2.2 – Aplicações da Geoquímica Orgânica na sub-bacia de Maceió

Para caracterização do conteúdo orgânico, da sub-bacia de Maceió, foram realizadas análises em amostras de halita e do material insolúvel, intercalado aos sais, correspondendo aos testemunhos de sondagens PP-1 e PP-2.

Os procedimentos analíticos envolveram as seguintes metodologias: análise elementar, extração da matéria orgânica, cromatografia líquida, teores isotópicos, cromatografia gasosa e determinação de biomarcadores (Fig. 6.6).

Fig. 6.6 - Fluxograma das análises para geoquímica orgânica.

6.2.2.1 – Análise elementar

A análise elementar (determinação dos teores de C, N, H, e S) foi realizada em um total de 11 amostras (Tab. 6.9), utilizando-se um Analisador Elementar de Combustão, C.E. Instruments - modelo 2100. O método analítico consiste na combustão individual das amostras, tratamento dos gases produzidos pela combustão e separação em coluna cromatográfica. A combustão ocorre no interior de um forno (ou tubo de combustão) em atmosfera de oxigênio, onde se deixa cair a amostra que está contida em uma cápsula de estanho. Este metal favorece o processo chamado “quantitative dynamic flash combustion”.

Tab. 6.9 - Amostras selecionadas para análise elementar

Amostra n°	N° do testemunho (PP-2)	Tipo de rocha
10	26.4	Marga
11	33.4	Marga
12	38.2	Marga
13	48.6	Folhelho
14	26.2	Halita
15	31.4	Halita
16	38.4	Halita
17	44.3	Halita
18	37.5	Folhelho
19	38.5	Folhelho
20	23.4	Folhelho

As condições analíticas foram as seguintes:

a) forno de combustão - tubo de quartzo preenchido com 4 cm de lã de quartzo, 9 cm de limalha de cobre eletrolítico, 2 cm de lã de quartzo, 6 cm de trióxido de tungstênio e 0,5 cm de lã de quartzo, a uma temperatura de 1000 °C;

b) forno de redução - tubo com as mesmas características acima, preenchido com cobre eletrolítico e temperatura de 650 °C ;

c) trampa (armadilha) - tubo de 10 cm preenchido por anhidrona (perclorato de Mg anidro), em temperatura ambiente;

d) coluna - Porapaq 50/80, de 2,5 m a uma temperatura de 60 °C ;

e) detector - detector de condutividade térmica a uma temperatura de 190 °C ;

f) gases - foram utilizados hélio (110 mL/min) e oxigênio (10 mL/min), com um *loop* de 10 mL;

h) calibração do instrumento - o instrumento foi calibrado com sulfanilamida de conteúdos em N,C e S, certificados para análise elementar;

i) tratamento dos dados - com o *software* Eager 200 para *Windows* (C.E. Instruments).

Os resultados obtidos mostram para alguns níveis valores muito elevados de enxofre, nitrogênio e de TOC (carbono orgânico total), principalmente para as amostras 18, 19 e 20 (Tab. 6.10).

O enxofre é o terceiro constituinte dos óleos brutos em abundância, depois do carbono e do hidrogênio. Os petróleos com elevado teor de enxofre são aqueles que contêm mais de 1% desse elemento. Isto ocorre com mais frequência nos depósitos carbonático-evaporíticos do que nos sedimentos siliciclásticos. Em geral, o enxofre é extraído de sulfatos durante a sedimentação e, posteriormente, recombina-se tanto com o ferro junto aos siliciclásticos, como nos carbonatos-evaporitos. O teor médio de enxofre é de 0,86% em rochas carbonáticas, comparados com 0,51% em siliciclásticos e de 0,65% em óleos brutos. Óleos produzidos em depósitos siliciclásticos incluem os óleos derivados de matéria orgânica não marinha, onde o conteúdo de enxofre é baixo (Tissot & Welte, 1984).

O teor de enxofre presente em rochas sedimentares da margem continental brasileira, formadas durante o Aptiano, varia de 0,5% a 2,5%, e de 0,3% a 1,5% para óleos (Mello *et al.*, 1995).

O conteúdo de nitrogênio é normalmente muito mais baixo que o teor de enxofre em óleos brutos. Aproximadamente 90% dos óleos contêm menos que 0,2% de nitrogênio. Em média o teor é de 0,094% por peso. Os maiores teores são conhecidos em certos óleos da Califórnia (0,65% a 0,75%). Asfaltos degradados são enriquecidos em nitrogênio, como partes de resinas e asfaltenos que têm maiores valores se

comparados com óleos brutos normais. O teor de nitrogênio alcança 1,24% em Whiterocks Canyon (asfaltos) de Utah, Estados Unidos. A principal parte do nitrogênio é encontrada em alto peso molecular e frações de alto ponto de ebulição (Tissot & Welte, *op. cit.*).

Tab. 6.10 - Resultados das análises elementar, TOC e teores de CaCO_3 .

PP-2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Posição da amostra	Amostra	% N total	% H total	% S total	% C total	% C (após HCl)	P2/P1 (g) (correção)	% TOC (FxG)	CaCO_3 (%)	Rocha
26.4	10A	0,10	0,46	0,63	6,76	1,27	1,5404	1,96	48,3	Marga
	10B	0,10	0,47	0,58	6,87	0,98	1,5320	1,50		
33.4	11A	0,25	1,02	0,74	9,84	6,48	1,3121	8,50	32,0	Marga
	11B	0,25	1,03	0,83	9,75	4,52	1,5742	7,12		
38.2	12A	0,31	1,21	0,40	13,61	5,99	1,3625	8,16	46,0	Marga
	12B	0,31	1,22	0,28	13,75	6,02	1,4807	8,91		
48.6	13A	0,13	0,71	0,10	1,52	1,02	1,4904	1,52	0,9	Folhelho
	13B	0,14	0,76	0,13	1,52	1,01	1,5011	1,52		
26.2	14A	0,03	0,09	0,02	0,08	0,04	1,2145	0,05	0,2	Halita
	14B	0,03	0,06	0,00	0,06	0,04	1,2226	0,05		
31.4	15A	0,03	0,05	0,00	0,05	0,03	1,2303	0,04	0,1	Halita
	15B	0,03	0,04	0,00	0,08	0,06	1,2892	0,08		
38.4	16A	0,01	0,06	0,08	0,05	0,04	1,2758	0,05	0,0	Halita
	16B	0,03	0,05	0,07	0,04	0,03	1,1726	0,04		
44.3	17A	0,01	0,06	0,00	0,08	0,06	1,2522	0,08	0,1	Halita
	17B	0,02	0,06	0,00	0,09	0,06	1,2663	0,08		
37.5	18A	0,73	3,24	1,45	23,75	15,92	1,3316	21,20	1,6	Folhelho
	18B	0,73	3,27	1,49	23,81	15,28	1,3981	21,36		
38.5	19A	0,39	1,39	1,01	12,10	7,40	1,3689	10,13	14,3	Folhelho
	19B	0,38	1,45	0,98	12,13	7,70	1,3745	10,58		
23.4	20A	1,58	4,55	1,93	35,72	20,91	1,6094	33,65	7,2	Folhelho
	20B	1,59	4,56	2,06	35,50	25,93	1,3064	33,88		
20.5	1A	4,8	-	-	-	-	-	4,3	47,9	Marga
	1B	4,8	-	-	-	-	-	4,4		
36.1	2A	0,14	-	-	-	-	-	13,3	2,7	Folhelho
	2B	0,13	-	-	-	-	-	13,2		
47.5	3A	0,49	-	-	-	-	-	1,6	0,0	Folhelho
	3B	0,45	-	-	-	-	-	1,6		

6.2.2.2 - Extração da matéria orgânica

A matéria orgânica de folhelhos e de halitas foi extraída utilizando-se uma bateria de Soxhlet, com 4 extrações simultâneas. As amostras, divididas em dois grupos para processamento (Tab. 6.11 e 6.12), foram moídas, pesadas e acondicionadas em cartuchos de celulose apropriados para este tipo de extração. Como solvente foi usado uma mistura de diclorometano e metanol, na proporção de 2:1, atuando sobre cada amostra durante 30 horas.

Tab. 6.11 - Primeiro grupo de amostras

Amostra nº	Poço e intervalo	Tipo de amostra
1	PP2 - 20.5	Marga
2	PP2 - 36.1	Folhelho
3	PP2 - 47.5	Folhelho

Tab. 6.12 - Segundo grupo de amostras

Amostra nº	Poço e intervalo	Tipo de amostra
10	PP2 - 26.4	Marga
11	PP2 - 33.4	Marga
12	PP2 - 38.2	Marga
13	PP2 - 48.6	Folhelho
14	PP2 - 26.2	Halita
15	PP2 - 31.4	Halita
16	PP2 - 38.4	Halita
17	PP2 - 44.3	Halita

Os extratos obtidos foram submetidos a evaporação, para eliminação do solvente, em rotoevaporador Heidolph OB2000, acoplado a um rotacionador Heidolph VV2000, em banho-maria, a uma temperatura de 50 °C e vácuo produzido com trompa de água. Após este procedimento os extratos foram armazenados, sob refrigeração, para posterior fracionamento.

6.2.2.3 - Fracionamento do extrato orgânico

O fracionamento dos extratos orgânicos foi realizado de acordo com normas básicas e roteiro pré-estabelecidos para este tipo de procedimento, abaixo descritos.

Inicialmente foram tomados os cuidados para que as amostras não tivessem contato com a pele e com materiais plásticos. Aos extratos, obtidos na fase anterior, foram acrescentados 20 a 25 mL de uma solução de KOH a 6% em metanol, com agitação, e depois cobertos com papel de alumínio e armazenados em geladeira durante 24 horas. Os compostos do extrato orgânico foram separados, individualmente, em duas frações, conforme procedimentos abaixo:

A – Fração neutra: hidrocarbonetos, cetonas e álcoois.

- 1- Nos frascos de fundo redondo, contendo as amostras, foram adicionados 5 mL de água destilada de boa qualidade (2º litro extraído em milliQ a 18,2 Ω M cm).
- 2- Acrescentados 15 a 20 mL de hexano, para solubilizar os compostos neutros (hidrocarboneto, cetona e álcool).
- 3- O líquido foi transferido a um decantador, tampado, e agitado energicamente, com regularidade, durante 1 minuto, sendo constantemente aberto para evitar a pressão, com o cuidado de não perder o líquido.
- 4- O líquido foi deixado em repouso até que as duas fases ficassem bem separadas. O hexano ocupou a parte superior (densidade do hexano < densidade da água).
- 5- A fase aquosa (inferior) foi separada, retornando ao frasco original.
- 6- A fase orgânica foi transferida para um frasco limpo, de 100 mL, em forma de coração.
- 7- A fase aquosa foi transferida ao decantador e as operações descritas nos itens 2 ao 7 foram repetidas por mais duas vezes.

- 8- As fases orgânicas, obtidas nas diferentes operações com o frasco em forma de coração, foram evaporadas em rotoevaporador até a secagem completa..
- 9- O extrato anterior foi transferido a um frasco pequeno, com pipetas Pasteur, utilizando-se a mínima quantidade de hexano para diluição, e evaporadas com fluxo de hidrogênio. Os frascos foram rotulados com a descrição da amostra mais a letra N (de neutro) e armazenadas em congelador.

B – Fração ácida: ácidos e ésteres.

- 1- Foram adicionados HCl 1:1, ao líquido do frasco de fundo redondo original, até ser obtido pH de acidez 2. No caso de aparecer um precipitado, este foi dissolvido com água.
- 2- Foi executado exatamente o que foi descrito na parte A acima, desde o ponto 2 ao 9 (inclusive).
- 3- Adicionados 15 mL de uma solução de BF_3 diluído em metanol (10%), à fração ácida que foi evaporada, com agitação, e posterior armazenagem em geladeira durante 24 horas, protegido da luz (envolvidos com papel de alumínio).
- 4- Foram adicionados 15 mL de água destilada e transferidos a um decantador para extração com hexano.
- 5- Executado exatamente como está descrito na parte A acima, a partir do ponto 2 até ao 9 (inclusive).
- 6- O extrato anterior foi transferido a um frasco pequeno, e evaporado com fluxo de nitrogênio, tendo-se o cuidado de rotular todas as amostras, com sua identificação e o cátion correspondente H^+ (de ácido). As amostras foram armazenadas em congelador .

C – Preparação dos reativos:

- 1- Hidróxido de potássio a 6% em metanol: são pesados 6 g de KOH e adiciona-se metanol até um peso total de 100 g.
- 2- Diclorometano/metanol 2:1 : são misturados duas partes de diclorometano para uma parte de metanol. Com o cuidado com a pressão criada ao misturar os líquidos.
- 3- Trifluoreto de boro em metanol ($\text{BF}_3 / \text{MeOH}$): produto comercial.

6.2.2.4 - Cromatografia líquida

A porção neutra, obtida com o procedimento acima, foi fracionada por meio de cromatografia de coluna, preenchida com sílica e alumina, conforme metodologia descrita por Albaigés *et al.* (1984). Estes componentes (sílica e alumina) inicialmente foram purificados por 12 horas em bateria de Soxhlet, usando-se uma mistura de diclometano e metanol como solvente, sendo em seguida secos em estufa a 30 °C para eliminar o solvente. A alumina foi aquecida em mufla a 500 °C e a sílica em estufa a 120 °C durante 12 horas. Posteriormente estes componentes foram umedecidos a 3%, com água extraída em milliQ a 18,2 Ω M cm. Para cada amostra foi preparada uma coluna de vidro de aproximadamente 35 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro. A sílica (8 g na metade inferior da coluna) e a alumina (8 g na metade superior) foram colocadas na coluna com o uso de hexano. O excesso de hexano foi removido com o uso de pipeta Pasteur.

Para a separação dos componentes foram usados os solventes abaixo, relacionados por ordem de extração:

- a) primeira fração: 20 mL de hexano;
- b) segunda fração: 20 mL de solução com hexano e diclometano (4:1);
- c) terceira fração: 20 mL de solução com diclorometano e metanol (4:1);
- d) quarta fração: 20 mL de metanol.

Cada fração obtida foi evaporada em rotoevaporador e depois transferida para pequenos frascos, mediante solubilização com hexano, o qual foi evaporado com fluxo de nitrogênio. Todos os frascos foram rotulados e congelados para posterior análise em cromatógrafo de gases.

6.2.2.5 - Determinação do $\delta^{13}\text{C}$ em extratos orgânicos

Foram usadas as frações neutras da primeira extração, correspondendo a fração de alcanos (NA) de extratos obtidos em folhelhos e em halitas do PP-1 e PP-2. As amostras foram diluídas em pentano e coletados 2 μ L (microlitros) com seringa Microliter e armazenadas em cápsulas de estanho (2/1,5mm) aquecidas em forno elétrico (placa aquecedora) a 50 °C de forma a acelerar o processo de evaporação do solvente (pentano). As análises foram realizadas em duplicatas obtendo-se a média

aritmética simples entre os resultados. A seringa utilizada para coleta das amostras foi lavada em pentano, em 3 frascos diferentes, por 15 vezes após cada amostragem, de forma a evitar contaminações. A diluição das amostras ocorreu em função do teor de TOC, tendo variado de 50 a 1000 μ l de pentano.

Para as análises utilizou-se um Analisador Elemental Carlo Erba – mod. CE 1108, acoplado a um espectrômetro de massas de relação isotópica δ C (Finnigan Mat). As condições analíticas foram as seguintes: temperatura de combustão 1020 °C; temperatura da coluna 40 °C; como padrão foi usado o óleo NBS 22 e os resultados foram corrigidos em função do padrão PDB (Tab. 6.13).

Tab. 6.13 - Resultados da análise isotópica

Amostra	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	Amostra	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	Amostra	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)
CP 1NA	- 28,4	CP 6NA (*)	- 27,2	CP 13NA	- 24,8
CP 2NA	- 26,2	CP 7NA (*)	- 26,6	CP 14NA	- 25,2
CP 3NA	- 34,2	CP 10NA	- 26,2	CP 15NA	- 22,6
CP 4NA (*)	- 26,7	CP 11NA	- 27,6	CP 16NA	- 25,7
CP 5NA (*)	- 38,1	CP 12NA	- 26,2	CP 17NA	- 25,2

(*) Halitas do PP-1

Fig. 6.7 - Gráfico de frequência dos teores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ (PDB).

Verifica-se que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ predominam entre -25 e -27 ‰ (Fig. 6.7), sendo compatíveis com um ambiente com influência marinha, conforme comparação com resultados analíticos para óleos e extratos de rochas de Idade Alagoas, da margem continental brasileira (Rodrigues, 1983; Mello *et al.*, 1984; Santos *et al.*, 1985).

6.2.2.6 - Cromatografia gasosa e espectrometria de massas (CG-MS)

Foi utilizado um cromatógrafo de gases acoplado a espectrômetro de massas, com fonte de impacto eletrônico, marca FISIONS MD-800, com coluna cromatográfica Rtx – 5MS, 30 metros de comprimento e 0,25 mm Ø e 0,25 µm f.e.

As condições analíticas foram as seguintes:

- temperatura inicial 60 °C;
- temperatura final (máxima) 320 °C;
- *splitless* (válvula) 40 segundos;
- temperatura do injetor (zona 3) 280 °C;

Para o espectrômetro de massas:

- intervalo 50 a 650 m/z;
- *solvent delay* = 3'
- temperatura da fonte = 200 °C;
- temperatura *transfer line* = 280 °C .

Foram analisadas as seguintes frações, correspondentes ao primeiro grupo de amostras:

- NA – fração neutra correspondente a hidrocarbonetos leves;
- NB – fração neutra de aromáticos e insaturados;
- NC – fração neutra de álcoois lineares;
- ND – fração neutra de esteróis;
- Ester – fração ácida.

As frações NC e ND foram “sililadas” com BSTFA (N,O – bis (trimetilsilil) trifluoroacetamida). Este procedimento sintetiza os componentes trimetilsililderivados (TMS) presentes nas amostras facilitando o processo analítico. Os “silil derivados” são formados pela substituição de um H ativo dos grupos OH, SH e NH.

Para cada amostra analisada por cromatografia de gases acoplada a espectrometria de massas é possível a separação dos componentes de acordo com a

relação m/z (massa/carga), como abaixo exemplificado (Tab. 6.14) e apresentado nos gráficos A, B e C (Fig. 6.8).

Os resultados analíticos foram tratados com o *software* Masslab e uso tabelas de espectros (Philp, 1985), além de comparações com resultados geoquímicos obtidos para óleos e extratos de sedimentos da margem continental brasileira, existentes em inúmeras publicações. Com isto foi possível o estudo de cada componente, o reconhecimento e a interpretação dos biomarcadores, destacando-se as presenças de Pristano, Fitano, Gamacerano, β -carotano e Dinosterano.

Tab. 6.14 – Tipo de componente conforme relação m/z .

m/z	Componentes
71	Alcanos
98	Dinosteranos
123	Diterpanos
183	Isoprenóides
191	hopanos e terpanos
217	Esteranos
231	4-metil-esteranos

A identificação de componentes como Pristano e Fitano permitiu a avaliação das condições oxidantes/redutoras do ambiente, desde a base até o final da deposição salina. Com a identificação do Dinosterano foi possível acompanhar, ao longo da coluna, o nível de influência marinha durante a deposição dos evaporitos (Fig. 6.9). Esse componente possui peso molecular 414 e sua identificação é possível a partir da relação m/z 98, sendo encontrado em um tempo de retenção de 30 a 31 (Fig. 6.10).

Fig. 6.8 - Cromatograma da amostra 2NA - 36.1 (gráfico A) e identificação dos principais componentes da relação m/z 191 (gráficos B e C).

Fig. 6.9 - Evolução da presença de Dinosteranos ao longo do intervalo evaporítico. Os gráficos acima representam condições da base, meio e topo da coluna do PP-2, respectivamente, amostras 47.5, 36.1 e 20.5 .

Amostra 11NA (33.4)

Fig. 6.10 - Fragmentograma (m/z 98) referente ao Dinosterano (amostra 33.4) e respectivo espectro, para o tempo de retenção de 30.522.

7 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

7.1 - A sedimentação evaporítica na área de Maceió

A deposição dos evaporitos na sub-bacia de Maceió foi marcada pela ausência de sulfatos e pelo grande aporte de insolúveis, representados por inúmeras intercalações de folhelhos e margas. Admite-se a hipótese de um ambiente de águas relativamente profundas, com energia baixa a moderada, tendo como base as análises dos testemunhos de sondagens. O tectonismo gravitacional, notadamente ativo durante a deposição evaporítica, justifica a ocorrência de espessos pacotes salíferos. Atribui-se o final dessa fase evaporítica ao término das condições restritivas e às alterações climáticas necessárias à formação desses depósitos. O fim das condições de restrição está representado por espessos pacotes de folhelhos e rochas carbonáticas no topo do sal, nos quais registra-se a presença de fósseis de ostracodes, conchostráceos e peixes.

Atualmente essa área encontra-se isolada das demais sub-bacias evaporíticas, porém, não se descarta a possibilidade da deposição salina ter ocorrido interligada com a sub-bacia de Paripueira, formando uma única bacia evaporítica, que foi tectonicamente isolada em uma fase posterior. Esse pressuposto tem como base o perfil de um poço situado ao norte de Maceió, em área da sub-bacia de Paripueira, cujos registros em raios gama, referente ao intervalo salino, exibem as mesmas configurações do poço “A”, situado na área aqui estudada.

7.2 - As rochas da sub-bacia de Maceió

O estudo dos testemunhos de sondagens e a interpretação das propriedades registradas nos perfis elétrico/acústicos/radioativos foram a base para a definição da composição litológica, destacando-se, no conjunto, as seguintes fácies: arenosa, pelítica, carbonática e halítica.

Na sub-bacia de Maceió os evaporitos são caracterizados por espessos depósitos de halita, não sendo constatada a presença de sais mais solúveis, como a silvinita ou carnalita. Porém, pelo menos em termos teóricos, estes sais podem ser encontrados em algum ponto da bacia.

Em relação às demais ocorrências de evaporitos, da fase Paripueira na bacia, essa área apresenta um horizonte mais raso, com o topo do sal presente a partir dos 854 metros de profundidade. Verifica-se um nítido contraste com as demais áreas, como Paripueira, Coruripe e Mosqueiro, nas quais o topo do sal é encontrado, respectivamente, a partir de 1.075, 2.623 e 3.475 metros de profundidade.

Pela configuração atual, o corpo salino exhibe uma forma aproximadamente tabular, com espessamento em sua porção central, e tendência de afinamento nas suas laterais, exceto na direção oeste, onde existe uma nítida tendência de maior espessamento. Contudo, essa configuração, não caracteriza um domo salino (Fig. 7.1).

7.3 - A gênese do sal

Salmouras e evaporitos não marinhos são notadamente diferentes, em sua composição iônica, daqueles encontrados em ambientes marinhos. Os evaporitos não marinhos possuem uma quantidade considerável de carbonato de cálcio, carbonato de sódio (como trona), ou sulfato de sódio (como mirabilita). A ocorrência desses minerais diferem daqueles gerados a partir da água do mar (Holser, 1979).

Nas lagunas alcalinas destacam-se como os íons maiores Na^+ , Cl^- , HCO_3^- e CO_3^{2-} , o que permite a formação de trona ($\text{NaHCO}_3 \cdot \text{NaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mineral que não foi encontrado em nenhuma das amostras estudadas. Os lagos alcalinos formam uma classe especial de deposição salina em bacias fechadas (Javor, 1989), o que não deve ter ocorrido na área de Maceió.

A partir do teor de bromo contido em um cloreto pode-se avaliar se o sal de um determinado depósito é um precipitado primário ou sofreu ação da dissolução e reprecipitação, seja por influxo de água do mar ou de água doce.

O íon de bromo possui eletronegatividade inferior ao íon de cloro, o que impede a formação de brometos no processo de evaporação da água do mar, ocorrendo, apenas, como solução sólida nos cloretos. Isso significa que, durante o processo de evaporação, apenas uma pequena fração do bromo precipita-se com os cristais de sal, aumentando gradualmente a sua concentração na salmoura residual (Valiashko, 1956).

Braitsch (1971) relaciona o teor de bromo de um cloreto, ao seu teor presente na salmoura, a partir da qual houve a cristalização. Essa relação é expressa por um coeficiente de partição e representa a percentagem em peso de Br^- na fase líquida. Tal coeficiente é diferente para cada evaporito e até para um mesmo mineral (Tab. 7.1).

Fig. 7.1 - Mapa de contornos da base (A) e topo (B) do atual corpo salino, referente à área de produção. O mapa de isolinhas (C) corresponde a espessura total entre a base e o topo do sal.

Tab. 7.1 - Valores de K (coeficiente de partição) para os mais importantes minerais evaporíticos (modificado de Braitsch, 1971).

MINERAL PRECIPITADO	K	Teor de Br ⁻ (ppm) a 25 °C			
		Salmoura	Halita	Silvita	Carnalita
Halita:					
- Início da precipitação de halita	0,13 (± 0,01)	540	70		
Silvita:					
- Início da precipitação de carnalita	0,073	4.000	280	2.900	
Carnalita:					
- Início da precipitação de carnalita.....	0,52	4.850	350	3.500	2.500

Com base no coeficiente de distribuição (ou partição), verifica-se que, para cristalizar a primeira halita, a salmoura deve conter aproximadamente 540 ppm de bromo, o que resulta em uma halita com cerca de 65 a 75 ppm.

A determinação do teor de bromo em minerais evaporíticos tem sido empregada, com relativo sucesso, na prospecção geoquímica desses depósitos (Valyashko, 1956; Baar, 1977; Raup & Hite, 1978; Kumov *et al.*, 1987). Um bom exemplo é a utilização do teor de bromo nas halitas como guia de detecção de horizontes de alta concentração, a partir dos quais pode-se prever a existência de depósitos potassíferos (Ogienko, 1959; Holser, 1979).

Os resultados analíticos para os teores de bromo das halitas dos testemunhos PP-1, na sub-bacia de Maceió, mostram um máximo de 58 ppm para as halitas tratadas com etanol, e de 83 ppm para aquelas analisadas sem esse tratamento. Para efeito de interpretação foram considerados apenas os resultados do grupo de amostras tratadas com etanol, por motivos já comentados no capítulo anterior.

No perfil apresentado na Fig. 6.2 não se verifica grandes alterações ou irregularidades nos teores de bromo. Perfis irregulares de bromo são típicos de intermitente ressecamento e exposição em regime de *sabkha*. Os perfis irregulares são gerados em salmouras rasas o bastante para permitir o rápido crescimento de bromo. Ao contrário, perfis suaves são boas evidências de deposição em maior profundidade (Holser, *op. cit.*).

O aumento de salinidade, traduzido pelas elevações dos teores de bromo, corresponde ao contínuo processo de evaporação na bacia, concentrando gradualmente a salmoura existente. Este processo, caso não tivesse sofrido interferência, com a diluição da salmoura, observado em vários pontos do perfil, teria um desenvolvimento normal, com concentrações cada vez crescentes, culminando com a deposição de sais de potássio e magnésio.

Admite-se que a diluição da salmoura seja uma consequência do influxo de salmouras de menor concentração, com ocasionais contribuições do afluxo de águas continentais, em parte representada pela elevação do teor de insolúveis contidos nas halitas.

Herrmann (1972) calculando o teor de bromo com base em coeficiente de partição, variando de 0,12 a 0,14, afirma que o início da precipitação de halita, a partir de água do mar, ocorre quando os teores de bromo estão entre 60 a 75 ppm, sendo tais valores coerentes com aqueles encontrados em vários depósitos salinos de diversas idades geológicas. Raup & Hite (1978) mencionam um mínimo teórico de 75 ppm de Br⁻ para as halitas formadas a partir da contínua evaporação da água do mar. Porém, a maioria das halitas de origem marinha em muitas bacias evaporíticas, possui um teor de bromo situado entre 35 e 50 ppm (Holser *et al.*, 1972), a exemplo dos sais do nordeste da Tailândia, onde os teores situam-se em torno de 40 ppm (Hite & Japakasetr, 1979).

Alguns pesquisadores advertem que os teores de bromo em halitas, isoladamente, não podem ser considerados como um indicador preciso da origem marinha ou não marinha desses depósitos, a exemplo de Hardie (1984) que chama a atenção para evaporitos não marinhos contendo concentrações de Br⁻ superiores a 100 ppm. Contudo, os elevados teores de bromo em evaporitos, considerados não marinhos, não tem significado algum se não forem tomadas precauções de modo a eliminar possíveis inclusões fluidas que poderiam interferir no resultado analítico.

A dissolução salina causa uma elevação na razão Cl/Br na água resultante e, em consequência, um baixíssimo teor de bromo na recristalização do sal a partir dessa água, como um evaporito de "segundo ciclo". Quando isto ocorre, a razão Cl/Br supera a casa das dezenas de milhar (Holser, 1979). Contudo, isto não se verifica com as halitas da sub-bacia de Maceió.

Segundo Holser (*op. cit.*), apenas os teores de bromo abaixo de 20 ppm são indicadores de dissolução salina. Os sais com menos de 10 ppm são produtos de dissolução em águas não marinhas.

Apesar dessas halitas estarem relacionadas a um valor de bromo inferior ao limite teórico, seus teores são compatíveis para halitas primárias, formadas a partir da evaporação da água do mar.

Análises realizadas com halitas basais dos evaporitos Ibura (Lisboa *et al.*, 1973) revelaram que as variações dos teores de bromo situam-se entre 37 e 116 ppm, o que torna coerente os resultados aqui apresentados.

7.4 - A ausência de sulfatos

A ausência de sulfatos, seja na forma de anidrita ou de gipsita, é uma característica marcante dos evaporitos da fase Paripueira na Bacia de Sergipe/Alagoas. A presença de gipsita foi detectada por difração de raios X nos folhelhos e margas, ocorrendo como um evento diagenético, sob a forma de lentes ou de lâminas, em escala microscópica. Uma rara e isolada ocorrência de gipsita foi registrada no contato calcário/halita, associada à mineralização de esfalerita, ambas de espessuras milimétricas.

Estima-se que o suprimento de água de salmouras, para a área da sub-bacia evaporítica de Maceió, já era empobrecido em carbonatos e sulfatos, fato sugerido pelas delgadas camadas de rochas carbonáticas e pela ausência de anidritas, nesses depósitos. Teoricamente, o empobrecimento das salmouras pode ser resultante da segregação desses componentes, precipitados nas porções intermediárias do trajeto, conforme modelos comentados por Raup (1982), e teria ocorrido nas bacias situadas ao sul da margem atlântica (Evans, 1978).

Um exemplo semelhante ao aqui admitido é citado por Hite & Japakasetr (1979) quando referem-se aos sais da Bacia de Khorat (Tailândia), onde as rochas com carbonatos e sulfatos estão praticamente ausentes. Segundo esses autores a perda de sulfato pode ter ocorrido em algum lugar do trajeto da salmoura, entre a conexão marinha e a mencionada bacia evaporítica, fato evidenciado pelo aumento do número de camadas e de espessura com anidrita, em áreas situadas a centenas de quilômetros de distância daquela bacia.

Evidências de precipitação fracionada tem sido encontradas com certa frequência, como, por exemplo, nos depósitos de potássio do Reno Superior (Braitsch, 1971) e nos evaporitos Prairie, do Canadá.

A quantidade de anidrita formada a partir da evaporação de um certo volume de água do mar é muito inferior a quantidade de halita precipitada. Considerando-se uma taxa de evaporação anual da água do mar de 2 metros por ano, ao final desse período seriam depositadas uma camada de apenas 1,2 milímetros de gipsita e outra com 25 milímetros de halita, segundo Holser (1979). Para a mesma situação, Anderson *et al.* (1972) estimam espessuras de 1,8 milímetros de gipsita e 28 milímetros de halita. Braitsch (*op. cit.*) admite que para precipitar 5 milímetros de gipsita é necessário evaporar 14 metros de água do mar normal, ou 4 metros de salmoura saturada em sulfato.

A ausência ou escassez de sulfatos também pode ser resultante da redução bacteriana, produzindo H_2S que escapa para a atmosfera (Sonnenfeld, 1984), apesar das críticas de Javor (1989) rebatendo essa hipótese.

7.5 - A Deposição salina

Estima-se que a sub-bacia evaporítica de Maceió deveria ter profundidade suficiente para manter a salinidade do fundo elevada, mediante estratificação da salmoura por densidade, mesmo durante os períodos de não deposição salina, o que permitiria a manutenção do fundo anóxico por longo período.

A ritmicidade observada nas halitas bandeadas diferem daqueles casos em que alternam halita e anidrita, por exemplo, as quais representam deposição sazonal. Nos pares halita/anidrita, a anidrita tem poucos milímetros de espessura, enquanto a alternância halita clara / halita escura possui dimensões de vários centímetros.

A causa da ritmicidade, gerando halitas bandeadas, certamente esteve relacionada a ocasionais influxos que transportaram nutrientes para o interior da laguna. Diversos pesquisadores tentam relacionar algum tipo de ritmicidade em evaporitos com eventos anuais ou atividade solar periódica e, em muitos casos, estima-se a duração da sedimentação.

A estimativa de tempo para deposição de um pacote evaporítico tem sido muito questionado. Tiercelim & Faure (1978), *apud* Handford (1991), mencionam uma taxa de deposição de 10-35 metros/1000 anos para as halitas do *rift* da Etiópia e Depressão

Danakil, na região de Afar, na África. A Depressão Danakil é uma bacia do tipo *rift* ativo, preenchida com evaporitos pleistocênicos e recentes.

7.6 - A evolução da salinidade

A ausência de ciclos bem marcados, que permitissem a diferenciação das fases de alta e baixa salinidades, impossibilitou a divisão da seqüência evaporítica em ciclos correlacionáveis, a exemplo dos sais da fase Ibura que foram subdivididos em nove ciclos. Suas fases de baixa concentração são marcadas pela acumulação de folhelhos e margas resultantes de novos influxos. As fases de diluição das salmouras, também, são representadas por uma diminuição dos teores de bromo contidos nas halitas.

Para formar camadas de sal com 100 metros de espessura são requeridos volumes consideráveis de água do mar. Baar (1977) menciona que se todo o Mediterrâneo fosse evaporado, considerando-se uma profundidade média de 1.500 metros, seriam precipitados apenas 20 metros de sais, aproximadamente. Isto nos dá uma idéia do extraordinário volume do influxo de salmouras até a sub-bacia de Maceió, onde são registradas espessuras efetivas de halita superiores a 250 metros.

Para manter apenas a deposição de halita é necessário um constante influxo/refluxo de salmouras, de forma que a sua concentração no interior da bacia evaporítica permaneça aproximadamente constante. Isto está condizente com um dos princípios de deposição evaporítica mencionados por Hite (1970), quando afirma que, sem o refluxo, os depósitos incluiriam um amplo espectro de minerais e, suas quantidades relativas, estariam diretamente proporcionais à relação dos elementos originais contidos na água do mar.

7.7 - A matéria orgânica

O estudo das rochas evaporíticas, com uso de geoquímica orgânica, permitiu a obtenção de dados relevantes para a compreensão e caracterização dos processos deposicionais e paleoambientais ocorridos na sub-bacia de Maceió.

Nesse contexto, destaca-se o elevado teor de matéria orgânica, presente nos folhelhos e rochas carbonáticas, alcançando valores de até 33,8% de TOC, refletindo a excepcional produtividade do meio e as elevadas condições anóxicas do fundo da bacia, necessárias à preservação da matéria orgânica. Tais condições sugerem a

existência de um corpo aquoso estratificado, similar ao modelo descrito por Por (1972). A estratificação da massa aquosa é resultante da circulação restrita e da elevada salinidade de suas águas, tornando o fundo da bacia um ambiente fortemente redutor.

Apesar de não terem sido identificados em sua totalidade, os biomarcadores reconhecidos nos cromatogramas são compatíveis com aqueles obtidos para outras áreas das bacias marginais brasileiras, e podem ser utilizados como indicadores para o estudo de situação paleoambiental semelhante.

A relevância deste trabalho é destacada pelo pioneirismo no estudo de uma seção completa de rochas evaporíticas, da fase inicial da formação do Atlântico Sul, onde foram determinadas as suas principais características (Fig. 7.2 e 7.3).

7.8 - Modelo deposicional

Os resultados analíticos dos teores de bromo e geoquímica orgânica apontam uma origem marinha para as salmouras responsáveis pela formação dos evaporitos Paripueira, com contribuição de matéria orgânica continental.

Possivelmente essas áreas faziam parte de um sistema de lagunas, parcialmente isoladas do proto-oceano que se instalava, recebendo, porém, periódicos influxos marinhos e, ocasionalmente, afluxo de águas do continente (Fig. 7.4). Assim, considerando-se a posição paleogeográfica da bacia, em relação ao *proto*-Atlântico Sul, o aporte de salmouras teria ocorrido em condições de pré-concentração, dada a sua posição distal em relação à área de influxo no chamado *Golfo Paripueira*.

O registro da influência marinha, nas bacias da margem continental leste brasileira, é datado desde o Aptiano Inferior (Dias, 1999), sendo marcado pela presença de foraminíferos planctônicos e bentônicos no Membro Coqueiros da Formação Lagoa Feia, Bacia de Campos, pela presença de dinoflagelados em níveis argilosos do Andar Alagoas Inferior, na Bacia de Sergipe/Alagoas e Bacia de Camamu/Almada, onde também foram registrados níveis com acritarcas.

Fig.7.2 - Evolução dos biomarcadores ao longo do perfil do PP -
Cromatogramas de extratos orgânicos de margas e
P = Pristano, F = Fitano.

PP - 2

Fig.7.3 - Evolução dos biomarcadores ao longo do perfil do PP - 2.
Cromatogramas de extratos orgânicos obtidos em halitas.
P = Pristano, F = Fitano

Fig. 7.4 - Modelo deposicional para a sub-bacia evaporítica de Maceió.

7.9 - Sugestões para pesquisas posteriores

Considerando-se a relevância do tema estudado, sob múltiplos aspectos, especialmente o científico e o econômico, são apresentadas as seguintes sugestões para continuidade das pesquisas dos depósitos evaporíticos:

a) estudos no sentido de melhor caracterizar as sub-bacias evaporíticas de Coruripe e de Paripueira, em Alagoas, verificando as possibilidades de ocorrência de sais de potássio;

b) identificação de outras fases evaporíticas nas bacias da margem continental, a exemplo do que ocorre na Bacia de Sergipe/Alagoas;

c) estudos envolvendo datação mais precisa dos depósitos salinos situados a sul da Bacia de Sergipe/Alagoas, e suas correlações, principalmente aqueles das bacias do Espírito Santo, Campos e de Santos;

d) avaliação das potencialidades petrolíferas nos folhelhos betuminosos intercalados aos evaporitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.J.A.; POTTER, P.E. - 1990 - Tipos e distribuição de porosidade nos arenitos do Membro Maceió, Cretáceo da Bacia de Sergipe/Alagoas, NE do Brasil. *Bol. Geoc. PETROBRÁS*, **4(3)**:315-336.
- ABREU, S.F. - 1960 - *Recursos minerais do Brasil*. Ed. Instituto Nacional de Tecnologia, **vol. I**, 471p.
- ABREU, S.F. - 1973 - *Recursos minerais do Brasil*. Ed. Edgard Blücher Ltda, **vol.I**, 2ª ed., 324p.
- ALBAIGÉS, J.; ALGABA, L.; GRIMALT, J.O. - 1984 - Extractable and bound neutral lipids in some lacustrine sediments. *Organic Geochemistry*, **6**:223-236.
- ALBAIGÉS, J.; SATORRES, A.; PUEYO, J.J. - 1980 - Nota sobre la utilización de hidrocarburos saturados como indicadores paleo-ambientales en rocas sedimentarias. *Acta Geologica Hispanica*, **XV(2)**:33-37.
- ALGER, R.P.; CRAIN, E.R. - 1966 - *Defining deposits with electrical well logs*. Ed. Schlumberger Well Surveying Corporation, Texas, 35p.
- ALMEIDA, T.I.R.; FLORENCIO, C.P.; MOREIRA, M.Z. - 1992 - Composição isotópica de carbonatos e matéria orgânica dos evaporitos Paripueira, Região de Maceió, Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas. *Boletim IG-USP, Publ. Especial*, **12**:5-6.
- AMARAL, J.R.; MELO, P.R.C. - 1984 - O depósito de sal-gema de Bebedouro/Maceió, Estado de Alagoas. *In: Principais depósitos minerais do Nordeste Oriental, DNPM, Série Geologia*, **24**:307-334.
- AMARAL, J. R.; MELO, P.R.C. - 1997 - O depósito de sal-gema de Bebedouro, Maceió, Alagoas. *In: Principais depósitos minerais do Brasil, parte C, vol.IV - Rochas e minerais industriais, DNPM/CPRM*, p. 505-518.
- ANDERSON, R.Y.; DEAN JR., W.E.; KIRKLAND, D.W.; SNIDER, H.I. - 1972 - Permian Castile varved evaporite sequence, west Texas and New Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **44**:1912-1920.
- ASMUS, H.E. - 1975 - Controle estrutural da deposição mesozóica nas bacias da margem continental brasileira. *Rev. Bras. Geoc.*, **5**:160-175.
- ASMUS, H.E. & PORTO, R. - 1980 - Diferença nos estágios iniciais da evolução da margem continental brasileira: possíveis causas e implicações. *In: Congr. Bras. Geol.*, **31, Anais...** Camboriú, SBG, **1**:225-239.
- ASMUS, H.E.; PORTO, R. - 1972 - Classificação das bacias sedimentares brasileiras segundo a tectônica de placas. *In: Congr. Bras. Geol.*, **26, Anais...** Belém, SBG, **II**:67-90.

- AYORA, C.; CUEVAS, C.; GARCIA VEIGAS; MIRALLES, L.; PUEYO, J.J.; TEIXIDOR, P. - 1993 - Evaporitas. *Investigación y Ciencia*, **205**:70-77.
- BAAR, C.A. - 1977 - *Applied salt-rock mechanics 1*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 283p.
- BAQUIL, C.C. - 1997 - Depósitos de gipsita de Grajaú, Maranhão. In: Principais depósitos minerais do Brasil. Parte C, **Vol. IV** - Rochas e minerais industriais, p.69-175.
- BARBE, A.; GRIMALT, J.O.; PUEYO, J.J.; ALBAIGES, J. - 1990 - Characterization of model evaporitic environments through the study of lipid components. *Org. Geochem.*, **16(4-6)**:815-828.
- BENALIOULHAJ, S.; SCHREIBER, B.C.; PHILP, R.P. - 1994 - *Sedimentology and geochemistry of modern and ancient saline lakes*. SEPM, Special Publication, **50**, 334 p.
- BLATT, H.; MIDDLETON, G.; MURRY, R. - 1980 - *Origin of sedimentary rocks*. Prentice-Hall Inc.(eds.), New Jersey, USA, 782p.
- BORCHERT, H. & MUIR, R.O. - 1964 - *Salt Deposits; the origin, metamorphism and deformation of evaporites*. D. Van Nostrand Company, Ltd. (Ed.), London, 338p.
- BORDENAVE, M.L. - 1993 - The sedimentation of organic matter. In: Bordenave, M.L. (Ed.). *Applied Petroleum Geochemistry*. Éditions Technip, cap. 1.2, p. 15-76.
- BORDOVSKY, O.K. - 1965 - Accumulation and transpormation of organic substance in marine sediments. *Marine Geology*, **3**:3-14.
- BRAITSCH, O. - 1971 - *Salt deposits their origin and composition*. Ed. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 297p.
- BRASSEL, S.C.; EGLINTON, G.; HOWELL, V.J. - 1987 - Palaeoenvironmental assessment of marine organic-rich sediments using molecular geochemistry. In: Brooks, J.; Fleet, A.J. (Ed.). *Marine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publication, **26**:79-98.
- BRASSEL, S.C. - 1992 - Biomarkers in sediments, sedimentary rocks and petroleum: biological origins, geological fate and applications. In: *Geochemistry of organic matter in sediments and sedimentary rocks*. SEPM Short Course **27**:29-72.
- BROMN, L.F.; FISHER, W.L. - 1977 - Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brasil rift and puul-apart basins. In: Payton, C.E. (Ed.). *Seismic stratigraphy applications to hidrocarbon exploration*. AAPG Memoir, **26**:213-248.
- BROOKS, J.; CORNFORD, C.; ARCHER, R. - 1987 - The role of hidrocarbon source rocks. In: Brooks, J.; Fleet, A.J. (Ed.). *Petroleum Exploration. Marine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publication, **26**:17-46.

- BUTLER, G.P. - 1969 - Modern evaporite deposition and geochemistry of coexisting brines, the sabkha, Trucial Coast, Arabian Gulf. *Journal Sedimentary Petrology*, **39**(1):70-89.
- CAINELLI, C.; BABINSKI, N.A.; SANTOS, R.C.R.; UESUGUI, N. - 1987 - Sedimentos Albo-Santonianos da Bacia Sergipe-Alagoas: Ambientes de sedimentação e perspectivas petrolíferas. *Rev. Bras. Geoc.*, **17**(2):135-138.
- CAIXETA, J.M. ; BUENO, G.V. ; MAGNAVITA, L.P. ; FEIJÓ, F.J. - 1994 - Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. *Bol. Geoc. PETROBRÁS*, **8**(1):163-172.
- CALDAS, E.B. & FLORENCIO, C.P. - 1992 - A idade dos evaporitos Paripuera na região de Maceió, Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas. *In: Simp. sobre bacias cretácicas brasileiras*, 2, Rio Claro, *Res. Expandidos*, UNESP, p. 22-24.
- CALDAS, E.B. & FLORENCIO, C.P. - 1994 - Palinomorfos dos folhelhos do intervalo evaporítico do Membro Maceió - Fm. Muribeca, Bacia de Sergipe/Alagoas. *Revista de Geologia*, Universidade Federal do Ceará, **7**:83-88.
- CALVERT, S.E. - 1987 - Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in sediments. *In: Brooks, J.; Fleet, A.J. (Ed). Marine Petroleum Source Rocks. Geological Society Special Publication*, **26**:137-151.
- CAPUTO, M.V.; SILVA, O.B. - 1990 - Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. *In: Origem e evolução de bacias sedimentares*, PETROBRÁS, p. 169-193.
- CARVALHO JR, A.L.P.; ALVES, E.A.A. - 2000 - O planejamento de lavra da mina de Taquari-Vassouras. *In: Cong. Bras. de Mina Subterrânea*, 1, Belo Horizonte, *Anais...* Belo Horizonte, IBRAM, CD-Rom, 13p.
- CARVALHO, R.S. - 1987a - Recursos minerais em bacias sedimentares. *In: Seminário sobre rifts intracontinentais. Anais...* PETROBRÁS, Rio de Janeiro, p. 247-255.
- CARVALHO, R.S. - 1987b - Sedimentação evaporítica. *In: Seminário sobre rifts intracontinentais. Anais...* PETROBRÁS, Rio de Janeiro, p.52-57.
- CARVALHO, R.S.; SIMÕES, I.A.; TIBANA, P.; LEITE, D.C. - 1974 - Evaporitos de Sergipe - Geologia e Geoquímica. *PETROBRÁS, Rel. interno - Projeto Evaporitos*, Aracaju, I, 155p.
- CERQUEIRA, R.M.; CHAVES, A.P.V.; PESSOA, A.F.C.; MONTEIRO, J.L.A.; PEREIRA, J.C.; WANDERLEY, M.L. - 1997 - Jazidas de potássio de Taquari/Vassouras, Sergipe. *In: Principais depósitos minerais do Brasil*, parte C, vol. IV - Rochas e minerais industriais, DNPM/CPRM, p. 277-311.
- CERQUEIRA, R.M.; PEREIRA, J.C.; PESSOA, A.F.C. - 1986 - Jazida de potássio de Santa Rosa de Lima (SE). Geologia e avaliação de reservas. *In: Congr. Bras. Geol.*, 34, *Anais...* Goiânia, SBG, 5:2168-2181.
- CHANG, H.K.; KOWSMANN, R.O. - 1986 - Espessura crustal da Bacia de Sergipe/Alagoas. *In: Congr. Bras. Geol.*, 34, Goiânia, *Anais...*, SBG, 1:110-121.

- CHANG, H.K.; KOWSMANN, R.O. - 1987 - Interpretação genética das sequências estratigráficas das bacias da margem continental brasileira. *Rev. Bras. Geoc.*, **17(2)**:74-80.
- CHANG, H.K.; KOWSMANN, R.O.; FIGUEIREDO, A.M.F. - 1990 - Novos conceitos sobre o desenvolvimento das bacias marginais do leste brasileiro. *In: Origem e evolução de bacias sedimentares*, PETROBRÁS, Rio de Janeiro, p. 269-289.
- CONCEIÇÃO, J.C.J.; ZALAN, P.V.; WOLFF, S. - 1988 - Mecanismo evolução e cronologia do rift sul-atlântico. *Bol. Geol. PETROBRÁS*, **2(214)**:255-265.
- DANA, J.D. & DANA, E.S. - 1997 - *Dana's new mineralogy*. John Wiley & Sons (Ed), USA, 1819p.
- DAVIS JR., R.A. - 1983 - *Depositional systems - a genetic approach to sedimentary geology*. Prentice-Hall, 669 p.
- DELLWING, L.F. - 1955 - Origin of the salina salt of Michigan. *Journal of Sedim. Petrology*, **25 (2)**:83-110.
- DEMAISON, G.J. & MOORE, G.T. - 1980 - Anoxic environments and oil source bed genesis. *AAPG Bull.*, **64 (8)**:1179-1209.
- DIAS, J.L. - 1999 - O Andar aptiano na margem leste do Brasil e as primeiras incursões e ingressões marinhas no oceano Atlântico Sul meridional. *In: Simpósio sobre o Cretáceo no Brasil*, 5, *Boletim...* UNESP, p. 3-9.
- DIDYK, B.M.; SIMONEIT, B.R.T.; EGLINTON, S.C.B.G. - 1978 - Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentations. *Nature*, **272**:216-222.
- DNPM - 2001 - *Sumário Mineral 2001*. Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), Brasília, p. 103-104.
- DUNHAN, J.B. - 1962 - Classification of carbonatic rocks according to depositional texture. *In: HAM, W.E. (ed.) Classification of carbonatic rocks: a symposium*. Tulsa, AAPG Memoir, **1**:108-121.
- EIRAS, J.F.; KINOSHITA, E.M. - 1990 - Geologia e perspectivas petrolíferas da Bacia do Tacutu. *In: Origem e evolução de bacias sedimentares*, PETROBRÁS, p. 197-220.
- EMERY, D.; MYERS, K.J. - 1999 - Historical Perspective. *In: Emery, D.; Myers, K.J. (Eds) Sequence Stratigraphy, 3rd ed.*, Special Publication, BP Exploration, Stockley Park Uxbridge, London, Blackwell Science, 3-7.
- ESTRELLA, G.O. - 1972 - O estágio "rift" nas bacias marginais do leste brasileiro. *In: Cong. Bras. Geol.*, 26, *Anais...* Belém, **3**:29-34.
- ETCHEBEHERE, M.L.C. - 1991 - Evaporitos continentais: aspectos relevantes para exploração mineral. *Publ. IPT*, São Paulo, boletim 59.

- EUGSTER, H.P.; HARDIE, L.A. - 1978 - Saline lakes. *In*: Lerman, A. (Ed.). *Lakes: chemistry, geology, physics*. New York, Springer, p. 237-293.
- EVANS, R. - 1978 - Origin and significance of evaporites in basins around atlantic margin. *AAPG Bull.*, **62** (2):223-234.
- FEIJÓ, F.J. - 1992 - *Seqüências continentais das fases pré-rift e rift da sub-bacia de Alagoas Central*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 165 p. (inédito)
- FEIJÓ, F.J. - 1994 - Bacias de Sergipe e Alagoas. *Bol. Geoc. PETROBRÁS*, **8**(1):149-161.
- FEIJÓ, F.J.; SOUZA, R. G. - 1994 - Bacia do Acre. *Bol. Geoc. PETROBRÁS*, **8**(1):9-16.
- FIERN - 1998 - *Plano diretor de implantação do pólo gás-sal: Sumário Executivo*. Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, 68p.
- FIGUEIREDO, A.M.F. - 1985 - Geologia das bacias brasileiras. *In*: Avaliação das formações no Brasil, Schlumberger (Ed.), cap. 1, p. 1-38.
- FIGUEIREDO, A.M.F. - 1979 - Early post-rift salt sequences represent deposition in shallow marine and supratidal flat environment. *PETROBRÁS, Rel. Interno*, 51 p.
- FISHER, W.L.; MCGOWEN, J.H. - 1967 - Depositional systems in the Wilcox Group of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas. *Trans. Gulf Coast Assoc. of Geol. Soc.*, **17**:13-248.
- FLORENCIO, C.P.; PUEYO, J.J.; RIBEIRO FILHO, E. - 2000 - The Paripueira evaporitic interval of Maceió sub-basin - Sergipe / Alagoas Basin. *In: Anais da Academia Brasileira de Ciências*, resumo das comunicações, **72**(4):599.
- FLORENCIO, C.P. - 1995 - Aspectos petrográficos do intervalo salífero da sub-bacia evaporítica de Maceió. *In*: Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, Recife-PE, *Resumos Expandidos*, **14**(1):376-378.
- FLORENCIO, C.P. - 1996a - *Geologia dos evaporitos Paripueira na porção alagoana da Bacia de Sergipe/Alagoas*. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 94 p. (inédito)
- FLORENCIO, C.P. - 1996b - Lés évaporites Paripueira du Bassin Sergipe-Alagoas. *In*: First Annual Conference of IGCP Project 381: South Atlantic Mesozoic Correlation (Salvador, 2-6 September 1996) SAMC News 5, *Extended Abstracts*, p.24-25.
- FOLK, R.L. - 1974 - *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphills, Austin, Texas, 170 p.
- FONSECA, J.C. - 1973 - Evaporitos de Sergipe. *In*: Congr. Bras. Geol., 27, Aracaju, *Anais... Aracaju, SBG*, **II**:185-246.
- FRANK, M.R.; BEMERGUY, I. - 1972 - Critérios para utilização de perfis em poços de petróleo. *In*: cong. Bras. Geol., 26, Belém, *Anais... Belém, SBG*, **3**:191-204.

- FRAZIER, D.E. - 1974 - Depositional episodes: their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin. University of Texas, Austin, *Bureau of Economic Geology. Geol. Circ.* **4(1)**:1-28.
- FREITAS, E.L.; SANTOS, R.C.R. - 1984 - Utilização de cromatografia e análises químicas na caracterização e correlação de hidrocarbonetos. *In: Geoquímica do Petróleo*, PETROBRÁS, Cenpes, p. 145-156.
- FRIEDRICH, A. - 1997 - Geologia da gipsita. *In: Principais depósitos minerais do Brasil*, DNPM/CPRM, **IV**, p. 155-157.
- FUGITA, A.M. - 1974 - A geomorfologia da superfície de discordância pré-aptiana na Bacia de Sergipe e sua relação com os campos de óleo. *In: Congr. Bras. Geol.*, 28, Porto Alegre, *Anais...* Porto Alegre, SBG, **I**:121-135.
- GALLOWAY, W.E. - 1989 - Genetic stratigraphic sequence in basin analysis: architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, **73**:125-142.
- GARCIA-VEIGAS, F.J. - 1993 - *Geoquímica de inclusiones fluidas en formaciones salinas, Microanálisis Cryo-SEM-EDS*. Tese de doutorado, Universidade de Barcelona, 260 p. (inédito)
- GORDON, W.A. - 1975 - Distribution by latitude of phanerozoic evaporite deposits. *Journal of Geology*, **83(6)**:671-684.
- GUERRA, M.C.M. - 1989 - *A estruturação da bacia do Espírito Santo por halocinese e influência do vulcanismo dos Abrolhos*. Dissertação de Mestrado, Univ. Fed. Ouro Preto, 125p. (inédito)
- GUIGNONE, J.I.; ASSIS, C.A.C. - 1997 - Depósito de sal-gema da ilha de Matarandiba, Bahia. *In: Principais depósitos minerais do Brasil. Parte C, IV - Rochas e minerais industriais*, p. 519-525.
- HALLAM, A. - 1987 - Mesozoic marine organic-rich shales. *In: Brooks, J; Fleet, A.J. (Ed). Marine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publication, **26**:251-261.
- HANDFORD, C.R. - 1991 - Marginal marine halite: sabkhas and salinas. *In: Melvin, J.L. (Ed.). Evaporites, petroleum and mineral resources*. Developments in Sedimentology, **50**:1-66.
- HARDIE, L.A. - 1984 - Evaporites: marine or non-marine? *Am. Jour. Science*, **284**:193-240.
- HERRMANN, A.G. - 1972 - Bromine distribution coefficients for halite precipitated from modern sea water under natural conditions. *Contr. Mineral. Petrol.*, **37**:249-252.
- HITE, R.J.; ANDERS, D.E. - 1991 - Petroleum and evaporites. *In: Melvin, J.L. (Ed.). Evaporites, Petroleum and Mineral Resources*. Developments in Sedimentology, **50**:349 - 411.

- HITE, R.J. - 1970 - Shelf carbonate sedimentation controlled by salinity in the Paradox Basin, Southeast Utah. *In: Symp. Salt, 3, Anals...* 1:48-66.
- HITE, R.J. - 1973 - A suggested origin for the tachydrate-producing brines of the Sergipe Basin, Brazil. *In: Congr. Bras. Geol., 27, Aracaju, Anais...* Aracaju, SBG, II:177-183.
- HITE, R.J.; JAPAKASETR - 1979 - Potash deposits of the Khorat Plateau, Thailand and Laos. *Economic Geology*, 74:448-458.
- HOLLAND, H.D. - 1972 - The geologic history of sea water - in attempt to solve the problem. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 36:637-651.
- HOLLAND, H.D. - 1974 - Aspects of the geologic history of seawater. *In: Origins of Life*, D. Reidel Publ. Co., p. 87-91.
- HOLSER, W.T. - 1979 - Mineralogy of evaporites. *In: Reviews in Mineralogy*, Ed. Min. Soc. of Amer., 6:295-346.
- HOLSER, W.T.; WARDLAW, N.C.; WATSON, D.W. - 1972 - Bromide in salt rocks: extraordinarily low content in the lowel Elk Point Salt, Canada. *In: Geology of saline deposits. Proc. Hanover Symp., 1968, Earth Sciences*, 7:69-75.
- HORITA, J.; FRIEDMAN, J.; LAZAR, B.; HOLLAN, H.D. - 1991 - The composition of Permian seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55:417-432.
- HSÜ, K.J. - 1972 - Origin of saline giants: a critical review after the discovery of the Mediterranean evaporite. *Earth Science Review*, 8:371-396.
- IRVING, E. & BRIDEN, J.C. - 1962 - Paleolatitude of evaporite deposits. *Nature*, 196:425-428.
- JAVOR, B. - 1989 - *Hypersaline environments: microbiology and biogeochemistry*. Springer-Verlag (Ed.), New York, 327p.
- KENDALL, A.C. - 1984 - Evaporites. *In: Walker, R.G. (Ed.) Facies Models*. Toronto, Geoscience Canada Reprint Series 2: 259-296.
- KENDALL, A.C. - 1988 - Aspects of evaporite basin stratigraphy. *In: Schreiber, B.C. (Ed.) Evaporites and Hydrocarbons*, p. 11-65.
- KINSMAN, D.J.J. - 1969 - Modes of formation, sedimentary association, and diagnostic features of shallow-water and supratidal evaporites. *AAPG Bull.*, 53:830-840.
- KIRKLAND, D.W.; EVANS, R. - 1981 - Source-rock potencial of evaporitic environment. *AAPG Bull.*, 65:181-190.
- KLEMME, H.D.; ULMISHEK, G.F. - 1991 - Effective petroleum source rocks of the world: stratigraphic distribution and controlling depositional factors. *AAPG Bull.*, 75:1809-1851.

- KLINGSPOR, A.M. - 1969 - Middle Devonian Muskeg evaporites of western Canada. *AAPG Bull.*, **53(4)**:927 - 948.
- KOMOV, I.L.; LUKASHEV, A.N.; KOPLUS, A.V. - 1987 - *Geochemical methods of prospecting for nonmetallic minerals*. VNU Science Press., Netherlands, 241p.
- KOUTSOUKOS, E.A.; DIAS-BRITO, D. - 1987 - Paleobatimetria da margem continental do Brasil durante o Albiano. *Rev. Bras. Geoc.*, **17(2)**:92-99.
- KOZARY, M.T.; DUNLAP, J.C.; HUMPHREY, W.E. - 1968 - Incidence of saline deposits in geologic time. *Geol. Soc. America, Special Paper*, **88**:43-57.
- KRABBE, H. - 1996 - Biomarker distribution in the lacustrine shales of the Upper Triassic - Lower Jurassic Kap Stewart Formation, Jameson Land, Greenland. *Marine and Petroleum Geology*, **13(7)**:741-754.
- KYLE, J.R. - 1991 - Evaporites, evaporitic processes and mineral resources. In: Melvin, J.L. (Ed.). *Evaporites, petroleum and mineral resources*. Elsevier, 556 p., cap. 6:477-533.
- KYLE, J.R.; PRICE, P.E. - 1986 - Metallic sulphide mineralization in salt-dome cap rocks, Gulf Coast, U.S. A. . *Trans. Inst. Min. Metall.*, section B, **95**:B6-B16.
- LANA, M.C. - 1990 - Bacia de Sergipe-Alagoas: uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. In: Gabaglia, R.; Milani, E.J. (Coord.). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, p. 311-332.
- LANA, M.C. - 1985 - *Rifteamento na Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil*. Dissertação de mestrado, Univ. Fed. Ouro Preto, 124p. (inédito)
- LIMA FILHO, F.P. - 1999 - *A seqüência permo-pensilvaniana da Bacia do Parnaíba*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da USP, 155p. (inédito)
- LISBOA, M.A.; ABUD, J.; SANTANA, G.; ARAUJO, C.S.; BARBOSA, B.M. - 1973 - Análise química dos evaporitos de Sergipe. In: Congr. Bras. Geol., 27, Aracaju, *Anais...* Aracaju, SBG, **II**:267-286.
- MELLO, M. R.; ESTRELLA, G.O. - 1984 - A geoquímica orgânica na exploração do petróleo. In: Geoquímica do petróleo, PETROBRÁS, p. 29-69.
- MELLO, M. R. ; SOLDAN, A. L.; CERQUEIRA, J. R. - 1984 - Geoquímica da sub-bacia de Mundaú - Bacia do Ceará. *Bol. Téc. PETROBRÁS*, **27(2)**:97-108.
- MELLO, M. R. ; TELNAES, N. & MAXWELL, J. R. - 1995 - The hydrocarbon source potential in the brazilian marginal basins: a geochemical and paleoenvironmental assessment. In: Paleogeography, paleoclimate and source rocks. Alain-Yves Huc (Ed.) AAPG Studies in Geology, Tulsa, cap. 11, **40**, 347p.
- MELO, P.R.C.; FLORENCIO, C.P. - 1995 - Geologia e mineração da jazida de salgema de Maceió. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, Recife-PE. *Resumos Expandidos*, **14(1)**:106-109.

- MELO, P.R.C. - 1986 - Lavra por dissolução subterrânea: aspectos geológicos e ambientais. *Rel. interno, Salgema Mineração*, Maceió, 18p. (inédito)
- MEYERS, P.A.; ISHIWATARI, R. - 1993 - The early diagenesis of organic matter in lacustrine sediments. In: Engel, M.H.; Macko, S.A. (Ed.). *Organic Geochemistry, Principles and Applications*. Plenum Press, New York, 861p.
- MITCHUM, R.M. - 1977 - Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 1: Glossary of terms used in seismic stratigraphy. *Seismic Stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration* In: C.E. Payton (Ed.) *Memoir of the American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, **26**:205-212.
- MITCHUM, R.M.; VAIL, P.R.; THOMPSON, S. - 1977 - Seismic stratigraphy and global changes of sea-level. Part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. *Seismic Stratigraphy - Applications to Hydrocarbon Exploration*. In: C.E. Payton (ed.) *Memoir of the American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, **26**:53-62.
- MOLDOWAN, J. M. - 1984 - C30-steranes, novel markers for marine petroleums and sedimentary rocks. *Geochim. Cosmoch. Acta*, **48**:2767-2768.
- MORETTO, R. - 1988 - Observations on the incorporation of trace elements in halite of Oligocene salts beds, Bourg-en-Bresse Basin, France. *Geochem. Cosmoch. Acta*, **52(12)**:2809-2814.
- NEEV, D.; EMERY, K.D. - 1967 - The Dead Sea: depositional processes and environments of evaporites. *Israel Geological Survey Bull.*, **41**:1-147.
- NETTO, A.S.T.; WANDERLEY FILHO, J.R.; FEIJÓ, F.J. - 1994 - Bacias de Jacuipe, Camumu e Almada. *Boletim de Geociências PETROBRÁS*, **8(1)**:173-184.
- NURMI, R.D. - 1978 - Use of well logs in evaporite sequences. In: *Marine evaporites. SEPM Short Course*, Oklahoma, **4**:144-176.
- OGIENKO, V.S. - 1959 - Distribution of bromine in the rock salt of the Angara-Lena Salt Basin and the possibility of finding potassium salts. *Geochemistry*, **8**:893-900.
- OJEDA, H.A.O. - 1981 - Estrutura, estratigrafia e evolução das bacias marginais brasileiras. *Rev. Bras. Geoc.*, **11(4)**:257-273.
- OJEDA, H.A.O.; FUGITA, A.M. - 1974 - Bacia Sergipe/Alagoas, geologia regional e perspectivas petrolíferas. In: Congr. Bras. Geol., 28, Porto Alegre, *Anais...* Porto Alegre, SBG, **1**:137-158.
- PARRISH, J.T.; BARRON, E. J. - 1986 - Paleoclimats and economic geology. *SEPM, Short Course* **18**, 261p.
- PAYTON, C.E. (Editor) - 1977 - Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration. *Memoir of the American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, **26**:516p.

- PEDERSEN, T.F.; CALVERT, S.E. - 1990 - Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? *AAPG Bull.*, **74(4)**:454-466.
- PEREIRA, M.J.; FEIJÓ, F.J. - 1994 - Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, **8(1)**:219-234.
- PEREIRA, M.J.; MACEDO, J.M. - 1990 - A Bacia de Santos: perspectivas de uma nova província petrolífera na plataforma continental sudeste brasileira. *Boletim de Geociências PETROBRÁS*, **4(1)**:3-11.
- PETRI, S.; COIMBRA, A.M.; AMARAL, G.; OJEDA, H.O.; FÚLFARO, V.J.; PONÇANO, W.L. - 1986a - Código Brasileiro de nomenclatura estratigráfica. *Rev. Bras. Geoc.*, **16(4)**:372-376.
- PETRI, S.; COIMBRA, A.M.; AMARAL, G.; PONÇANO, W.L. - 1986b - Guia de nomenclatura estratigráfica. *Rev. Bras. Geoc.*, **16(4)**:376-415.
- PHILP, R.P. - 1985 - *Fossil fuel biomarkers: applications and spectra*. Elsevier (Ed.), Amsterdam, 293 p.
- PHILP, R.P.; GILBERT, T.D. - 1986 - The detection and identification of biological markers by computerized-gas chromatography-mass spectrometry. *In*: R.B. Johns (Ed.) *Biological markers in the sedimentary record*. Elsevier, Amsterdam, p. 227-248.
- PHILP, R.P.; JOHNSTON, M. - 1988 - Determination of biomarkers in geological samples by tandem mass spectrometry. *In*: Moldowan, J.M.; Yen, T.F. (Ed.) *Geochemical biomarkers*. Harwood Academic Publishers, London, p. 253-273.
- PONTE, F.C.; DAUZACKER, M.V.; PORTO, R. - 1978 - Origem e acumulação de petróleo nas bacias sedimentares brasileiras. *In*: Cong. Bras. de Petróleo, 1, *Anais...* Rio de Janeiro, **2**:121-147.
- POR, F.D. - 1972 - Hydrological notes on the high-salinity waters of the Sinai Peninsula. *Marine Biology*, **14**:11-119.
- POSAMENTIER, H. W.; VAIL, P.R. - 1988 - Eustatic control on clastic deposition II. *In*: Wilgus C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C. G. St; Posamentier H.W.; Ross C.A. Van Wagoner J.C (Eds.). *Sea Level Changes: an Integrated Approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogist, Special Publication, Tulsa, **42**:125-154.
- POSAMENTIER, H.W.; JERVEY, M.T.; VAIL, P.R. - 1988 - Eustatic control on clastic deposition I- Conceptual Framework. *In*: Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C. G. St. Posamentier, H.W.; Ross, C.A.; Van Wagoner J.C. (eds.). *Sea Level Changes: an Integrated Approach*. Special Publication, Society of Economic Paleontologists and Mineralogist, Tulsa, **42**:109-124.
- PRESSLER, J. W. - 1985 - Gypsum - *In*: Mineral, facts and problems. U.S. Bureau of Mines, Bull. **675**, p. 349-356.

- RANGEL, H.D.; MARTINS, F.A.L.; ESTEVES, F.R. & FEIJO, F.L. - 1994 - Bacia de Campos. *Boletim de Geociências, PETROBRÁS*, **8(1)**:203-217.
- RARICK, A.J.; RICHNER, D.R. - 1970 - Salt reserves and solution mining-salgema salt reserves. Rel. TERRANEERS Limited, Ohio, USA, 44p. (inédito)
- RAUP, O.B. - 1970 - Brine mixing: an additional mechanism for formation of Basin Evaporites. *In: Origin of Evaporites*, by AAPG, Oklahoma, USA, **2**:2246-2259.
- RAUP, O.B. - 1982 - Gypsum precipitation by mixing seawater brines. *AAPG Bulletin*, **66(3)**:363-367.
- RAUP, O.B.; HITE, R.J. - 1978 - Bromine distribution in marine halite rocks. *In: Marine evaporites - SEPM Short Courses IV*, Oklahoma, p.105-123.
- REGALI, M.S.P. - 1989 - A idade dos evaporitos da plataforma continental do Ceará, Brasil, e sua relação com os outros evaporitos das bacias nordestinas. *Boletim IG-USP, publicação especial*, **7**:139-143.
- REGALI, M.S.P.; VIANA, C.F. - 1989 - *Sedimentos do Neojurássico-Eocretáceo do Brasil: idade e correlação com a escala internacional*. Rio de Janeiro, Ed. Gávea, PETROBRÁS, 95P.
- RENFRO, A.R. - 1974 - Genesis of evaporite - associated stratiform metalliferous deposits - a sabkha process. *Economic Geology*, **69**: 33-45.
- RICHNER, D.R.; SHOCK, D.; AHLNESS, J.K.; TWEETON, R.; LARSON, W.C.; MILLENACKER, J.; SCHMIDT, R.D. - 1992 - Solution Mining: in situ techniques. *In: Howard L. Hartman (Senior Editor), Mining Engineering Handbook*, 2nd. Ed., **2**, Colorado.
- RICHTER-BERNBURG, G. - 1972 - Sedimentological problems of saline deposits. *In: Geology of Saline deposits. In: Hanover Symp., 1968, Proceed. ... Earth Sciences*, **7**:33-39.
- RODRIGUES, R. - 1983 - Utilização de marcadores biológicos na correlação de óleos da Bacia do Ceará e parte emersa da Bacia Potiguar. *Bol. Téc. PETROBRÁS*, **26(3)**:163-179.
- RODRIGUES, R.; AQUINO NETO, F.R.; CARDOSO, J.N. - 1984 - Indicadores geoquímicos moleculares (biomarcadores) aplicados à exploração de petróleo. *In: Geoquímica do Petróleo, PETROBRÁS*, 157-190.
- RONOV, A.B. ; KHAIN, K.E. ; BALAKHOVSKY, A.N. ; SESLAVINSKY, K.B. - 1980 - Quantitative analysis of Phanerozoic sedimentation. *Sedimentary Geology*, **25**:311-325.
- SAD, A.R.; CAMPOLINA, A.; COSTA, A.M.; LIMA, F.R.T.; CARVALHO, R.S. - 1997 - Depósito de potássio de Fazendinha, Nova Olinda do Norte, Amazonas. *In: Principais depósitos minerais do Brasil. Parte C, IV - Rochas e minerais industriais*, p. 257-276.

- SALDANHA, L.A.R.; CAVALCANTE, A.T.; WANDERLEY, P.R.M.; ROCHA, F.C. - 1975 - Grupo Barreiras: contribuição ao seu conhecimento no estado de Alagoas. *In: Simp. Geol. NE, 7, Fortaleza, Anais...*, SBG, p.113-119.
- SANTOS, A. S.; FREITAS, E. L.; QUADROS, L. P. - 1985 - Avaliação geoquímica das áreas de Pilar, Rio Remédio, Coqueiro Seco, Tabuleiro dos Martins e Marechal Deodoro - Bacia de Sergipe/ Alagoas. *Bol. Téc. PETROBRÁS*, **28(1)**:3-16.
- SANTOS NETO, E.V.; HAYES, J. M.; TAKAKI, T. - 1998 - Isotopic biogeochemistry of the Neocomian lacustrine and Upper Aptian marine-evaporitic sediments of the Potiguar Basin, Northeastern Brazil. *Org. Geochem.* **28(6)**:361-381.
- SCHALLER, H. - 1969 - Revisão estratigráfica da Bacia Sergipe/Alagoas. *Bol. Téc. PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, **12(1)**:21-86.
- SCHLUMBERGER - 1969 - *Log interpretation principles*. Ed. Schlumberger Limited, Texas, 110p.
- SCHMALZ, R.F. - 1969 - Deep water evaporite deposition: a genetic model. *AAPG Bull.*, **53**:798 - 823.
- SCHREIBER, B.C. - 1986 - Arid shorelines and evaporites. *In: H.G. Reading (Ed.) Sedimentary environments and facies*. -Blackwell Scientific Publ., London, p. 189-228.
- SEARLS, J.P. - 1985 - Potash - *In: Mineral, facts and problems*. U.S. Bureau of Mines, Bull. **675**, p. 617-633.
- SERRA, O. - 1986 - Évaporites et diagraphies différées. *In: Technip. ed. Les séries a évaporites en exploration pétrolière, 1, Méthodes Géologiques*, p.72-122.
- SHEARMAN, D.J. - 1978 - Evaporite of coastal sabkhas. *In: Marine evaporites. SEPM short course*, Oklahoma, **4**:6-42.
- SLOSS, L.L. - 1963 - Sequences in cratonic interior of North America. *Geol. Soc. Am. Bull*, **74**:93-113.
- SLOSS, L.L.; KRUMBEIN, W.C.; DAPPLES, E.C. - 1949 - Integrated facies analysis. *In: Longwell, C.R. (Ed), Sedimentary Facies in Geologic History*. Geol. Soc. Am. Mem., **39**:91-124.
- SMOOT, J. P.; CASTENS-SEIDELL, B. - 1994 - Sedimentary features produced by efflorescent salt crusts, saline valley and death valley. *Califórnia. SEPM, Special Publication*, **50**:73-90.
- SONNENFELD, P. - 1984 - *Brines and evaporites*. Academic Press (ed.), USA, 613p.
- SONNENFELD, P. - 1985 - Evaporites as source rocks of oil and gas. *Jornal Petrol. Geol.*, **8**:253 - 271.
- SONNENFELD, P. - 1992 - Chemical facies of marine evaporites. *Geologica Carpathica*, **43(1)**:3-14.

- STEWART, F.H. - 1963 - Marine evaporites. *USGS Prof. Paper* 440-Y, p.1-52.
- STOW, D.A.V. - 1987 - South Atlantic organic-rich sediments: facies, processes and environments of deposition. In: Brooks, J.; Fleet, A.J. (Ed). *Marine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publication, **26**:287-299.
- SZATMARI, P. - 1980 - The origin of oil deposits: a model based on evaporites. In: Congr. Bras. Geol., 31, Santa Catarina, *Anais ...*, Santa Catarina, SBG, **1**:455-499.
- SZATMARI, P.; CARVALHO, R.S.; SIMÕES, I.A. - 1979 - A comparison of evaporite facies in the Late Paleozoic Amazon and the Middle Cretaceous South Atlantic Salt Basins. *Economic Geology*, **74**:432-447.
- TEIXEIRA, A.A. - 1967 - Campo do Tabuleiro dos Martins. *Coletânea de rel. de exploração*, PETROBRÁS, **1(3)**:41-69.
- TEIXEIRA, A.A., SALDANHA, L.A.R. - 1968 - Bacia salífera aptiana de Sergipe/Alagoas: ocorrência de sais solúveis. *Bol. Téc. PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, **11(2)**:221-230.
- TEIXIDOR, P.; GRIMALT, J. O.; PUEYO, J. J.; RODRIGUEZ-VALERA, F. - 1993 - Isopranylglycerol diethers in non-alkaline evaporitic environments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**:4479-4489.
- TEN HAVEN, H.L.; LEEUW, J.W.; RULLKOTTER, J.; DAMSTÉ, J.S.S. - 1987 - Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental indicator. *Nature*, **330**:641-643.
- TISSOT, B.P.; WELTE, D.H - 1984 - *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag (Ed.), Berlin, 538p.
- TUCKER, M.E. - 1988 - *Sedimentary Petrology*. Blackwell Science (Ed.), 2ª ed., 260p.
- UESUGUI, N. - 1987 - Posição estratigráfica dos evaporitos da Bacia de Sergipe/Alagoas. *Rev. Bras. Geoc.*, **17(2)**:131-134.
- VAIL, P.R.; MITCHUM, R.M.; THOMPSON, S. - 1977 - Global cycle of relative changes of sea level. In: C.E. Payton, (ed.). *Seismic stratigraphy; applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologist. **26**:83-97.
- VALYASHKO, M.G. - 1956 - Geochemistry of bromine in the processes of salt deposition and the use of the bromine content as a genetic and prospecting criterion. *Geochemistry*, **6**:570-589.
- VALYASHKO, M.G. - 1972 - Playa Lakes - a necessary stage in the development of a Salt-Bearing basin. In: Geology of saline deposits. Proc. Hanover Symp., 1968, Earth Sciences, **7** : 41-51.

- VAN WAGONER, J.C.; MITCHUM, R.M. JR.; CAMPION, K.M.; RAHMANIAN, V.D. - 1990 - *Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrop: Concepts for high resolution correlation of time and facies*. American Association of Petroleum Geologist Methods in Exploration Series, Tulsa, 7:55 p.
- VAN WAGONER, J.C.; POSAMENTIER, H.W.; MITCHUM, R.M.; VAIL, P.R.; SARG, J.F.; LOUTIT, T.S.; HARDENBOL, J. - 1988 - An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C. G. St ; Posamentier, H.W.; Ross C.A.; Van Wagoner J.C. (eds) *Sea Level Changes: an Integrated Approach* (Special Publication, Society of Economic Paleontologists and Mineralogist, Tulsa, 42:39-45.
- VIANA, C.F. - 1980 - Cronoestratigrafia dos sedimentos da margem continental brasileira. In: Cong. Bras. Geol., 31, *Anais...*, Camboriu, 2:832-843.
- VIEIRA, R.A.B.; MENDES, M.P.; VIEIRA, P.E.; COSTA, L.A.R.; TAGLIARI, C.V.; BACELAR, A.P.; FEIJÓ, F.J. - 1994 - Bacias do Espírito Santo e Mucuri. *Boletim de Geociências PETROBRÁS*, 8(1):191-202.
- VOLKMAN, J.K. - 1988 - Biological marker compounds as indicators of the depositional environments of petroleum source rocks. In: Fleet, A.J; Kelts, K. & Talbot, M.R. (eds), *Lacustrine Petroleum Source Rocks*, Geological Society Publication 40: 103-122.
- WARREN, J.K.- 1991 - Sulfate dominated sea-marginal and platform evaporative settings: sabkhas and salinas, mudflats and salterns. In: Schreiber, B.C. (Ed.). *Evaporites and hydrocarbons*, p. 69-187.
- WARREN, J.K.; KENDALL, C.G.ST.C. - 1985 - Comparison of sequences formed in marine sabkha (subaerial) and salina (subaqueous) settings - modern and ancient. *AAPG Bull.*, 69(6):1013-1023.
- WILES, R.L.F.; PEPPER, A.S.; CAWLEY, S.J. - 1998 - Source rocks of petroleum systems in the South Atlantic Margins. AAPG International Conference & Exhibition, *Extended Abstracts...*, Rio de Janeiro, p. 422.
- WILLIAMS-STROUD - 1991 - Descriptive model of naturally occurring iodine brines. In: Some industrial mineral deposit models: descriptive deposit models. U.S. Geological Survey, Open-file report 91-11A, p. 36-37.
- ZHANG YI-GANG - 1981 - Cool shallow origin of petroleum-microbial genesis and subsequent degradation. *Journal Petroleum Geology*, 3:427-444.