



CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA N° **5081-016** MES/ANO **NOV./82**

ORGÃO DE AUTORIA

**DEGEO**

**BACIA POTIGUAR: INVESTIGAÇÃO DAS POSSIBILIDADES  
DE FORMAÇÃO DE DEPÓSITOS DE ENXOFRE NATIVO**

**Maria Glícia da Nóbrega Coutinho**

BACIA POTIGUAR: INVESTIGAÇÃO  
DAS POSSIBILIDADES DE FORMAÇÃO  
DE DEPÓSITOS DE ENXOFRE NATIVO

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS  
SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS MINERAIS  
DEGEO / DIGEOM  
NOVEMBRO/82.

BACIA POTIGUAR: INVESTIGAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DE FORMAÇÃO DE DE  
PÓSITOS DE ENXOFRE NATIVO.

- S U M Á R I O -

1. INTRODUÇÃO

2. GEOLOGIA DA BACIA

2.1. Localização

2.2. Lito-Estratigrafia

2.2.1. Formação Pendência

2.2.1.1. Histórico

2.2.1.2. Seção Tipo

2.2.1.3. Características Litológicas

2.2.1.4. Distribuição dos Sedimentos

2.2.1.5. Relações de Contato

2.2.1.6. Espessura

2.2.1.7. Ambiente Depositional

2.2.1.8. Idade

2.2.2. Formação Alagamar

2.2.2.1. Histórico

2.2.2.2. Seção Tipo

2.2.2.3. Características Litológicas

2.2.2.4. Distribuição dos Sedimentos

2.2.2.5. Relações de Contato

2.2.2.6. Espessura

2.2.2.7. Ambiente Depositional

2.2.2.8. Idade

2.2.3. Formação Ponta do Mel

2.2.3.1. Histórico

- 2.2.3.2. Seção Tipo
- 2.2.3.3. Características Litológicas
- 2.2.3.4. Distribuição dos Sedimentos
- 2.2.3.5. Relações de Contato
- 2.2.3.6. Espessura
- 2.2.3.7. Ambiente Depositional
- 2.2.3.8. Idade
- 2.2.4. Formação Ubarana
  - 2.2.4.1. Histórico
  - 2.2.4.2. Seção Tipo
  - 2.2.4.3. Características Litológicas
  - 2.2.4.4. Distribuição dos Sedimentos
  - 2.2.4.5. Relações de Contato
  - 2.2.4.6. Espessura
  - 2.2.4.7. Ambiente Depositional
  - 2.2.4.8. Idade
- 2.2.5. Formação Açú
  - 2.2.5.1. Histórico
  - 2.2.5.2. Seção Tipo
  - 2.2.5.3. Características Litológicas
  - 2.2.5.4. Distribuição dos Sedimentos
  - 2.2.5.5. Relações de Contato
  - 2.2.5.6. Espessura
  - 2.2.5.7. Ambiente Depositional
  - 2.2.5.8. Idade
- 2.2.6. Formação Jandaíra
  - 2.2.6.1. Histórico
  - 2.2.6.2. Seção Tipo
  - 2.2.6.3. Características Litológicas
  - 2.2.6.4. Distribuição dos Sedimentos

- 2.2.6.5. Relações de Contato
  - 2.2.6.6. Espessura
  - 2.2.6.7. Ambiente Depositional
  - 2.2.6.8. Idade
  - 2.2.7. Formação Macau
    - 2.2.7.1. Histórico
    - 2.2.7.2. Características Litológicas
    - 2.2.7.3. Distribuição dos derrames
    - 2.2.7.4. Relações de Contato
    - 2.2.7.5. Idade
  - 2.2.8. Formação Guamaré
    - 2.2.8.1. Histórico
    - 2.2.8.2. Seção Tipo
    - 2.2.8.3. Características Litológicas
    - 2.2.8.4. Distribuição dos Sedimentos
    - 2.2.8.5. Relações de Contato
    - 2.2.8.6. Espessura
    - 2.2.8.7. Ambiente Depositional
    - 2.2.8.8. Idade
  - 2.2.9. Formação Tibau
    - 2.2.9.1. Histórico
    - 2.2.9.2. Seção Tipo
    - 2.2.9.3. Características Litológicas
    - 2.2.9.4. Distribuição dos Sedimentos
    - 2.2.9.5. Relações de Contato
    - 2.2.9.6. Ambiente Depositional
    - 2.2.9.7. Idade
  - 2.2.10. Grupo Barreiras e Sedimentos de Praia e Aluvião
- 2.3. Evolução Tectono-Geológica

- 2.3.1. Seqüência "Rift" ou Continental
- 2.3.2. Seqüência "Drifting" ou Transicional
- 2.3.3. Seqüência de Oceano Aberto ou Marinha

### 3. METALOGENIA DO ENXOFRE

#### 3.1. Generalidades

- 3.1.1. Obtenção do Enxofre
- 3.1.2. Enxofre no Brasil
- 3.1.3. Importações Brasileiras de Enxofre
- 3.1.4. Mercado Mundial de Enxofre

#### 3.2. Ambiente Geológico do Enxofre

##### 3.2.1. Geoquímica

- 3.2.1.1. Ciclo Inorgânico
- 3.2.1.2. Ciclo Orgânico

#### 3.3. Tipos de Depósitos de Enxofre

- 3.3.1. Depósitos associados a "cap-rock" dos domos de sal
- 3.3.2. Depósitos associados a camadas de anidrita
- 3.3.3. Depósitos vulcânicos
- 3.3.4. Outros tipos de depósitos

#### 3.4. Condicionamento Geológico para Formação de Depósitos de Enxofre Nativo em Bacias Sedimentares

#### 3.5. Enxofre Nativo nas Bacias Sedimentares Brasileiras

### 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5. AGRADECIMENTOS

### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## 1. INTRODUÇÃO

Mais da metade do enxofre utilizado no mundo destina-se, sob a forma de ácido sulfúrico, à indústria de fertilizantes fosfatados, proporção registrada também no Brasil.

As aplicações daquela matéria-prima em outros campos a cham-se, no entanto, tão disseminadas, que o seu nível de consumo constitui importante padrão de aferição do desenvolvimento industrial de um país.

Dentre seus demais usos, o enxofre, na forma elementar ou transformado em ácido sulfúrico, é fundamental nas indústrias química, farmacêutica e metalúrgica.

Depósitos de enxofre nativo ou elementar, associados a uma seqüência evaporítica constituem as mais importantes fontes deste elemento atualmente exploráveis, por apresentarem baixo custo de mineração e recuperação (Bodenlos, 1973).

Visando incrementar a participação deste bem mineral na indústria brasileira, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, através do Departamento de Pesquisa Próprias (DEPEP), to mou a iniciativa de investigar o potencial de enxofre nas bacias sedimentares brasileiras, cujas semelhanças com bacias encontradas em outras partes do mundo, permitem antever a existência de extensos depósitos dessa substância em nosso território.

Para tanto, inicialmente, foram requeridas duas áreas, CE-06/80 e CE-07/80, localizadas na Bacia Potiguar, na região da Fazenda Belém (Alto de Aracati-Caponga) (Anexo I e fig. 16a).

Objetivando definir a viabilidade de pesquisa nestas áreas, para depósito de enxofre nativo, o Sr. Superintendente de Recursos Minerais (SUREMI), solicitou à Divisão de Geologia Marinha (DIGEOM), do Departamento de Geologia (DEGEO), um parecer técnico sobre o assunto.

## 2. GEOLOGIA DA BACIA

### 2.1. Localização

Com uma área total de 41.000 km<sup>2</sup> aproximadamente, sendo 21.500 km<sup>2</sup> na parte emersa e 19.500 km<sup>2</sup> na parte submersa, a Bacia Potiguar situa-se no extremo nordeste do Brasil, abrangendo parte dos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará e se estende para a plataforma continental até a cota batimétrica de 200 m (limite operacional)(figs. 1a, 1b e 2).

### 2.2. Lito-Estratigrafia

A coluna estratigráfica da Bacia Potiguar, integrada e atualizada por Souza (1982), compreende, da base para o topo, as seguintes unidades lito-estratigráficas (fig. 3)

#### 2.2.1. Formação Pendência

##### 2.2.1.1. Histórico

O nome Pendência refere-se a cidade situada na margem direita do Rio Açu ou Piranhas, no Rio Grande do Norte. Inicialmente, Araújo et alii (1978) usaram a denominação Formação Pendências num sentido mais amplo, extendendo seu limite superior até a base da Formação Açu, englobando a Formação Alagamar de Souza (1982) e parte da Formação Ponta do Mel de Tibana & Terra(1981).

Posteriormente, Souza (1982) nos estudos de integração e atualização da coluna estratigráfica da bacia, usou a denominação de Formação Pendência para designar a seção não aflorante, constituída por conglomerado, arenitos, siltito e folhelho, que ocorre sobre o embasamento cristalino nas partes mais profundas da bacia.



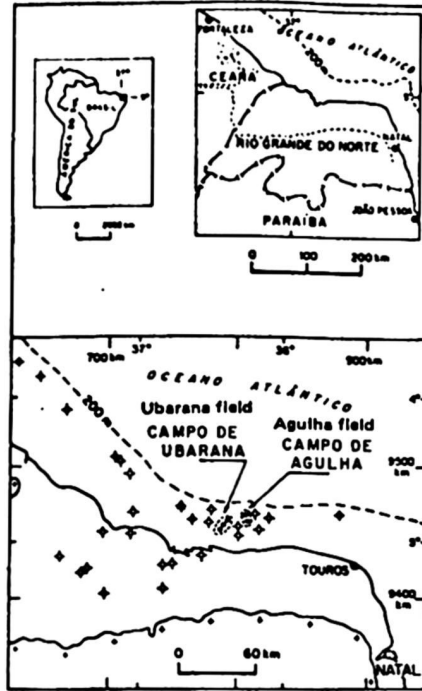
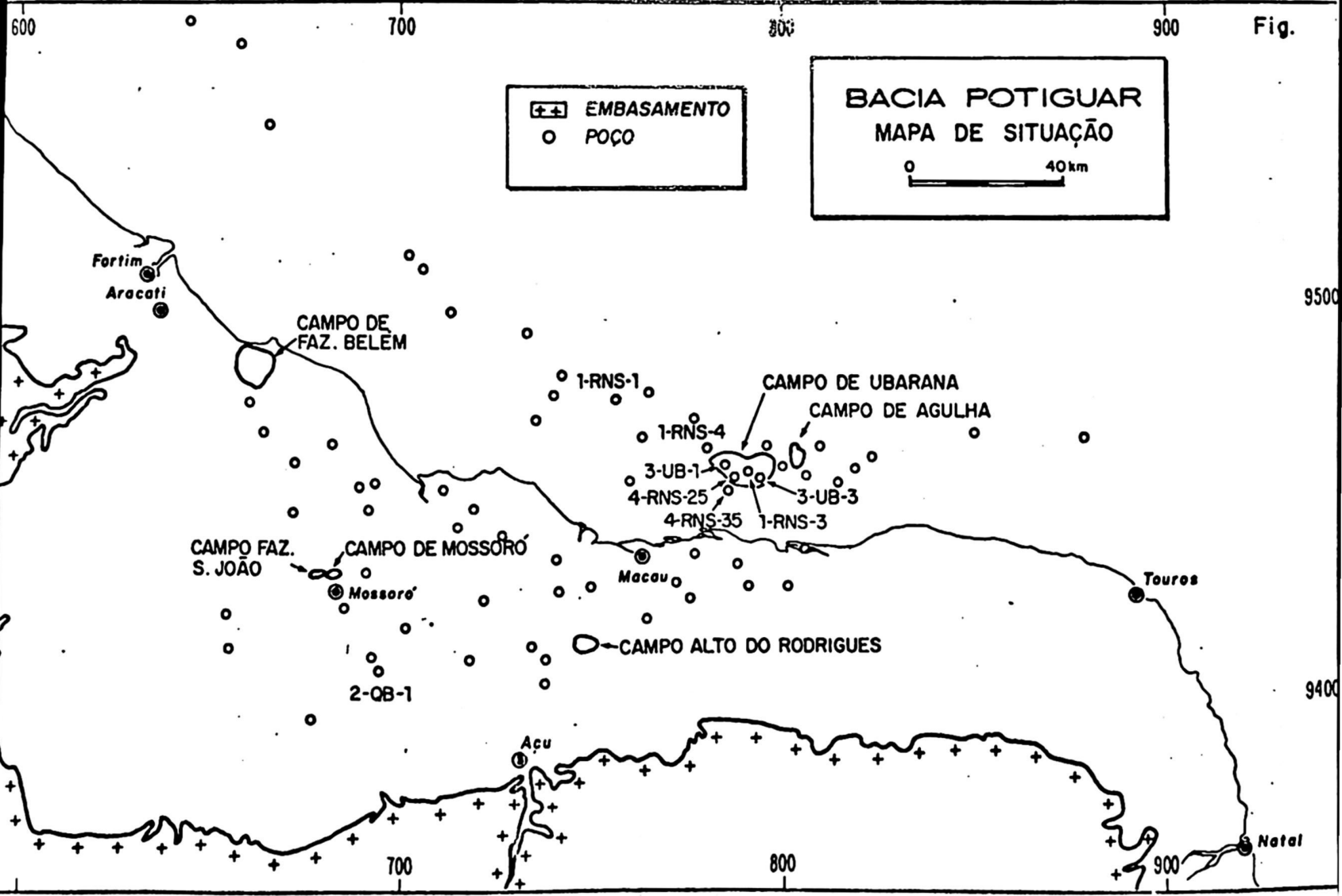
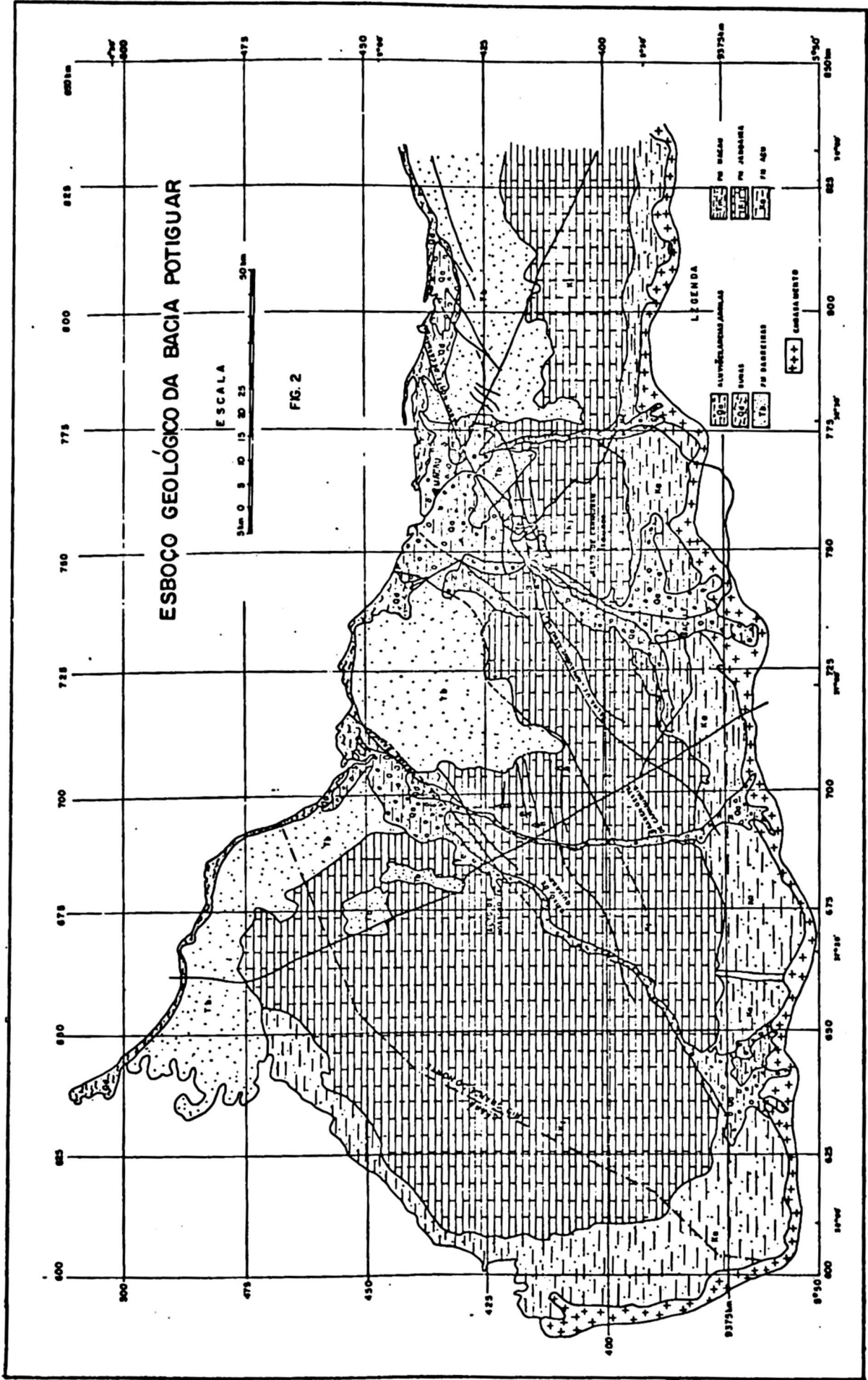


Fig. 1.0. Situation map of the Potiguar Basin, with particular reference to the Ubarana and Agulha oilfields.

Fonte: Araújo et alii, 1972



Fonte: Souza, 1982



Fonte: Gomes & Motta, 1982

#### 2.2.1.2. Seção Tipo

A unidade Pendência tem sua seção tipo representada pelo intervalo estratigráfico 1077-2176 m do poço 2-QB-1-RN, latitude  $5^{\circ}22'26,4''S$  e longitude  $37^{\circ}14'29,8''W$ .

#### 2.2.1.3. Características Litológicas

A seqüência Pendência caracteriza-se por intercalações de folhelho cinza esverdeado médio a escuro, siltito cinza médio a claro e arenito cinza esbranquiçado, muito fino à médio e calcífero. Localmente, próximo a falha de Carnaubais, ocorre uma fácies conglomerática (fig. 4a).

#### 2.2.1.4. Distribuição dos Sedimentos

Esta unidade ocorre só em subsuperfície, em toda a bacia, tanto na parte emersa, como na parte submersa, inclusive no bloco baixo da Falha de Ubarana (fig. 4).

#### 2.2.1.5. Relações de Contato

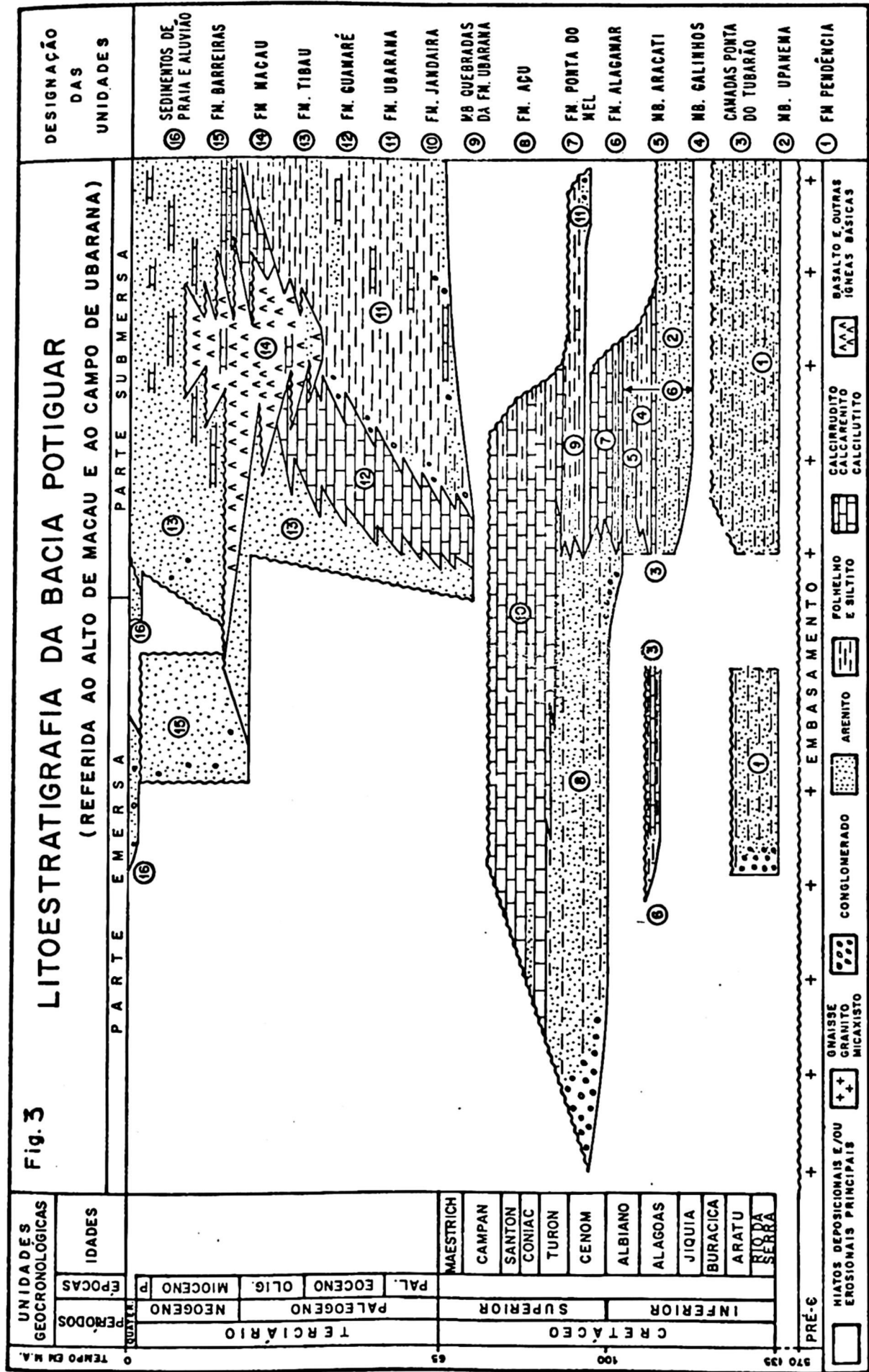
Seus contatos, o inferior com o Embasamento e o superior com a Formação Alagamar, são discordantes.

#### 2.2.1.6. Espessura

A espessura máxima registrada é de 3.000 m na parte emersa da bacia. No bloco baixo da Falha de Ubarana, parte submersa, estima-se uma espessura de 3.000 a 3.500 m.

#### 2.2.1.7. Ambiente Depositional

O ambiente de deposição predominante é o flúvio-la



Fonte: Souza, 1982

custrino, com turbiditos e leques aluviais associados a falhamentos.

#### 2.2.1.8. Idade

É atribuída idade Rio da Serra e Aratu para esta seqüência.

### 2.2.2. Formação Alagamar

#### 2.2.2.1. Histórico

A Formação Alagamar, inicialmente foi incluída por Araújo et alii (1978) na Formação Açu. Recentemente, nos estudos de integração da bacia, Souza (1982) destacou esta seqüência como uma unidade à parte, propondo a denominação de Formação Alagamar. Este nome provém da Ilha do Alagamar, situada no litoral do Rio Grande do Norte.

#### 2.2.2.2. Seção Tipo

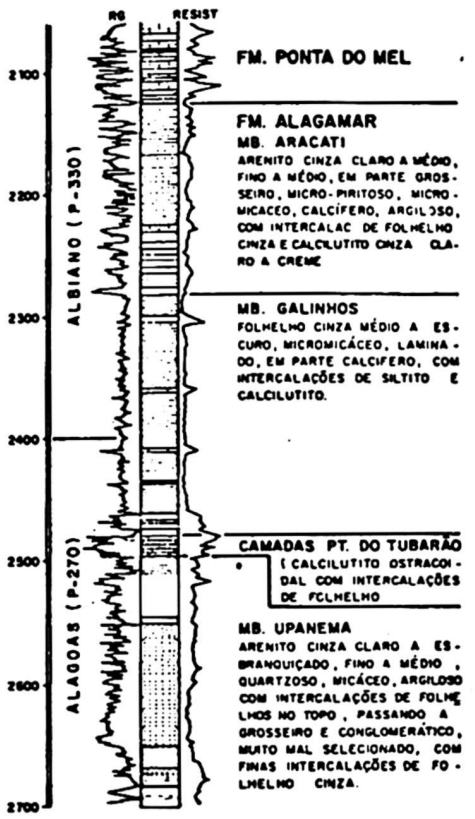
A seção tipo é representada pelo intervalo 2115-2700 m do poço 3-UB-1-RNS, de latitude  $4^{\circ}54'28,1''S$  e longitude  $36^{\circ}24'48,4''W$ .

#### 2.2.2.3. Características Litológicas

A unidade Alagamar litologicamente compreende 4 intervalos: (fig. 4a)

- Membro Upanema: caracteriza-se pela predominância de sedimentos arenosos com intercalações de calcário e folhelho;

3-UB-1-RNS (2115 - 2700 m)

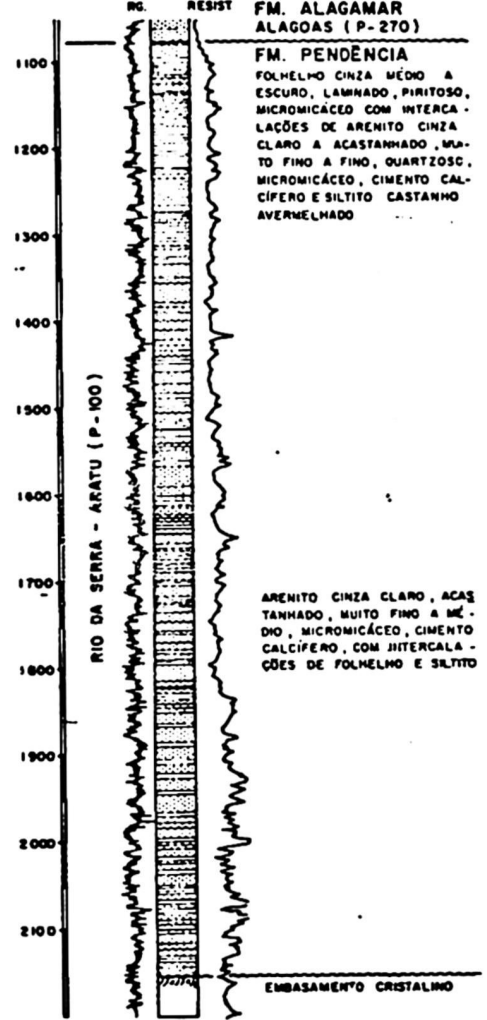


**FORMAÇÃO ALAGAMAR**  
**SEÇÃO-TIPO**  
(MODIF. DE FALKENHEIN ET ALII, 1977)

**CONVENÇÕES**

	- CALCÁRIO		- FOLHELHO E SILTITO
	- CONGLOMERADO		- ROCHAS METAMÓRFICAS
	- ARENITO		

2-QB-1-RN (1077 - 2176 m)



**FORMAÇÃO PENDÊNCIA**  
**SEÇÃO-TIPO**

Fig. 4 a

Fonte: Souza, 1982

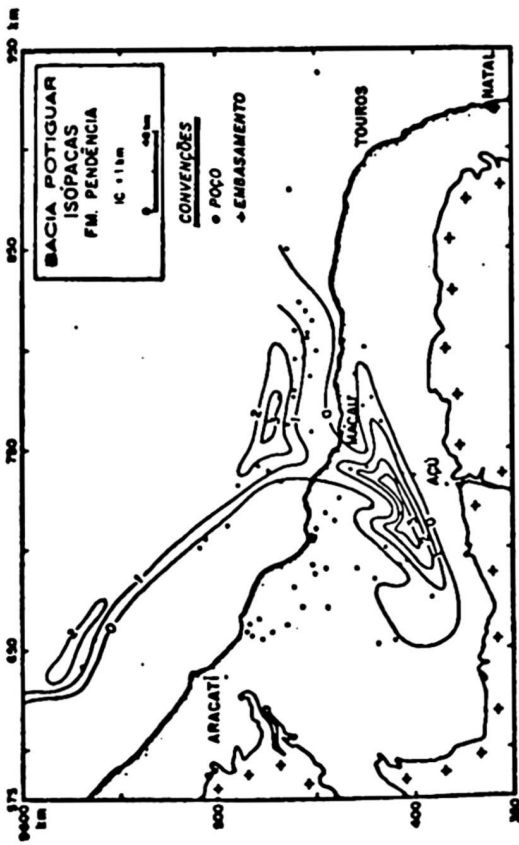


Fig. 4

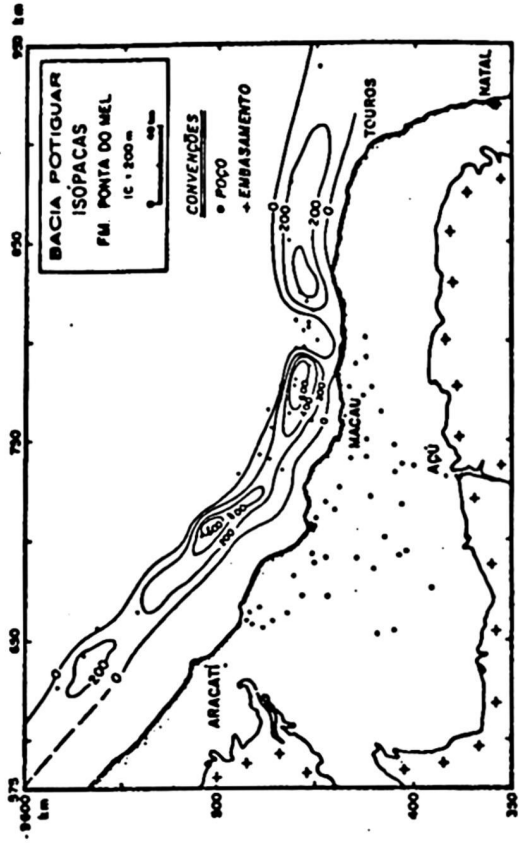


Fig. 6

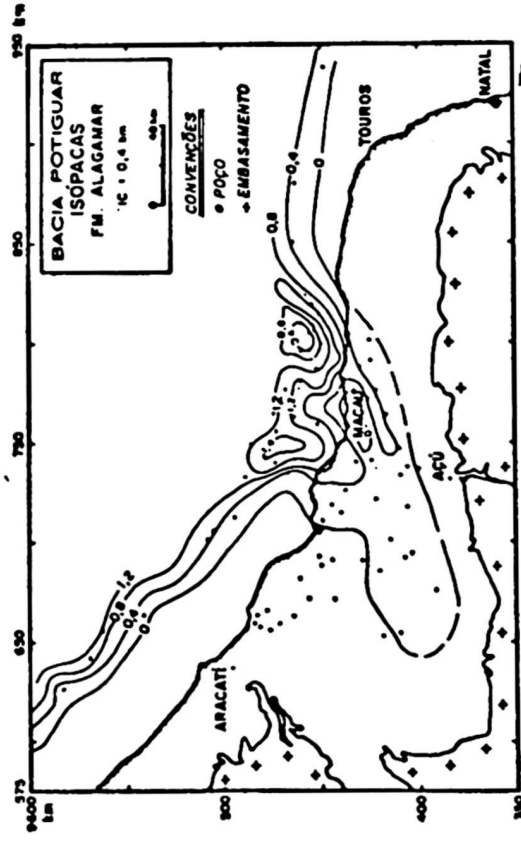


Fig. 5

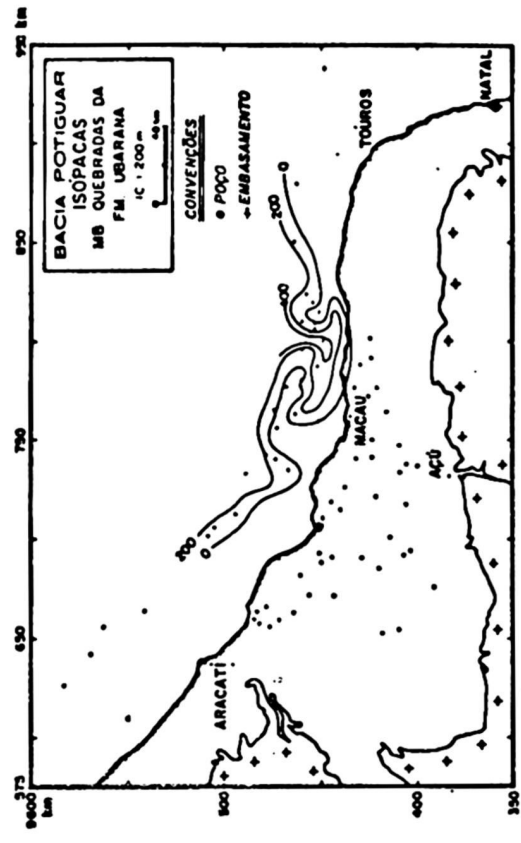


Fig. 7

- Camadas Ponta do Tubarão: consiste de calcilutito og tracoidal intercalado com folhelho cinza esverdeado;
- Membro Galinhos: caracteriza-se pela predominância de sedimentos argilosos;
- Membro Aracati: consiste de intercalações de arenito fino à médio, às vezes grosseiros, folhelho cinza mé dio a escuro e calcilutito.

#### 2.2.2.4. Distribuição dos Sedimentos

Até então não são conhecidas ocorrências, em superfície da Formação Alagamar. Esta unidade é melhor representada na plataforma continental, onde os Membros Galinhos, Aracati e Upane ma são bem individualizados; Este último está ausente nos Altos de Touros e Caponga-Aracati. As Camadas Ponta do Tubarão ocorrem em quase toda a bacia, tanto na parte emersa, como submersa; Nos Altos de Touros e Caponga-Aracati estes sedimentos sobrepõem-se ao Embasamento (fig. 5).

#### 2.2.2.5. Relações de Contato

Esta unidade sobrepõe-se discordantemente à Formação Pendência ou ao Embasamento. O contato superior, na parte e-mersa, é discordante com a Formação Açú. Na parte submersa é discordante com a Formação Ubarana e concordante com a Formação Ponta do Mel.

#### 2.2.2.6. Espessura

Na área emersa da bacia a espessura desta unidade não ultrapassa 800 m, enquanto que no bloco baixo da Falha de Uba rana atinge espessura de 1.400 m.



### 2.2.2.7. Ambiente Depositional

Na base da formação, o ambiente deposicional é fluvial e deltaico-lacustre na seção superior (Membro Upanema). As Camadas Ponta do Tubarão representam o final da deposição lacustrina, enquanto que os Membros Galinhos e Aracati são transicionais, representando um sistema deltaico com influência marinha.

### 2.2.2.8. Idade

É atribuída idade Alagoas a Albiano.

## 2.2.3. Formação Ponta do Mel

### 2.2.3.1. Histórico

Deve-se a Tibana & Terra (1981) a denominação de Formação Ponta do Mel, para designar uma seqüência litológica, predominantemente carbonática que ocorre nas proximidades da cidade homônima, situada no litoral do Rio Grande do Norte. Anteriormente, Araújo et alii (1978) incluíram esta seqüência na Formação Jandaíra e na parte superior da Formação Açú.

### 2.2.3.2. Seção Tipo

A seção tipo é representada pelo intervalo 1645-2287 m do poço 1-RNS-4 de latitude  $4^{\circ}52'00,8''S$  e longitude  $36^{\circ}28'40,2''W$ .

### 2.2.3.3. Características Litológicas

Litologicamente a seção inferior caracteriza-se por camadas de calcarenito oncolítico e doloesparito sobrepostos por arenito fino à médio, seguido por calcilutito intercalado por fo

lhelho. A seção superior é constituída por calcarenito bioclástico a algas vermelhas e verdes parcialmente recristalizada e dolomitizada, além de camadas de doloesparito (fig. 6a).

#### 2.2.3.4. Distribuição dos Sedimentos

A Formação Ponta do Mel ocorre somente na parte submersa da bacia, ou seja, na plataforma continental (fig. 6).

#### 2.2.3.5. Relações de Contato

O contato inferior da seqüência Ponta do Mel com a Formação Alagamar é concordante e transicional. O contato superior com a Formação Ubarana pode ser tanto discordante (erosivo) como concordante (presença de um hiato deposicional).

Em direção ao continente, esta unidade grada lateralmente para a Formação Açú.

#### 2.2.3.6. Espessura

A espessura máxima registrada até então foi de 647 m; Nos altos de Aracati e Touros a espessura do pacote não ultrapassa 200 m.

#### 2.2.3.7. Ambiente Depositional

O ambiente deposicional predominante é de plataforma rasa, mar aberto com pequeno desenvolvimento de planície de maré.

#### 2.2.3.8. Idade

Atribui-se idade Albiano-Cenomaniano para esta unidade.

## 2.2.4. Formação Ubarana

### 2.2.4.1. Histórico

Esta denominação deve-se a Mayer (1974), quando na perfuração do poço pioneiro 1-RNS-3, responsável pela descoberta do Campo de Ubarana.

Souza (1982), posteriormente, constatou a presença de uma língua de sedimentos pelíticos com intercalações de arenito entre as Formações Ponta do Mel e Jandaíra. Nos poços onde estas formações estão ausentes, esta língua de sedimentos confunde-se com a seqüência de talude. Assim sendo, Souza (1981) propôs a denominação de Membro Quebradas para designar esta porção, constituindo a seção mais inferior da Formação Ubarana. A terminologia Quebradas provém da cidade litorânea, no Rio Grande do Norte. A seção superior da Formação Ubarana não tem denominação específica.

### 2.2.4.2. Seção Tipo

Como seção tipo para a Formação Ubarana é citado o intervalo 1260-1484 m do poço 4-RNS-35 de latitude  $4^{\circ}57'43,5''S$  e longitude  $36^{\circ}25'35,11''W$ . No poço 3-UB-3-RNS o Membro Quebradas é bem representado.

### 2.2.4.3. Características Litológicas

A seqüência Ubarana caracteriza-se litologicamente por uma seção pelítica onde estão presentes folhelho, siltito, calcilito, arenito, diamictito, conglomerado e, às vezes, olistolitos.

No Membro Quebradas predominam folhelho cinza e arenito fino à médio (fig. 6a).

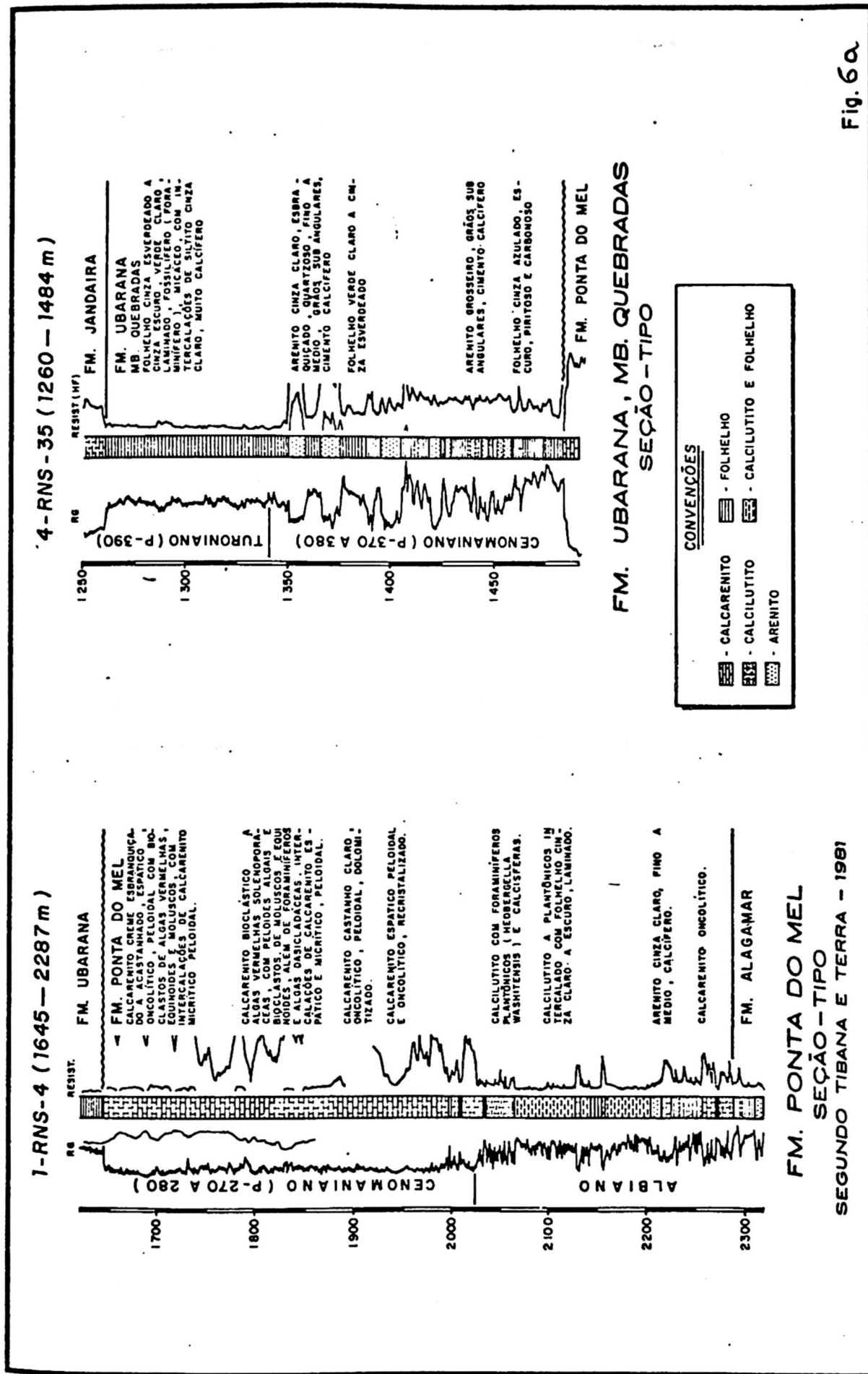


Fig. 6a

Fonte: Souza, 1982

#### 2.2.4.4. Distribuição dos Sedimentos

A unidade Ubarana é restrita a plataforma continental. Sua seção inferior, o Membro Quebradas ocorre predominantemente na Reentrância de Ubarana e desaparece em direção aos altos de Touros e Caponga-Aracati. A seção superior desaparece em direção à costa, e avança mar adentro, onde atinge sua espessura máxima (figs. 7 e 8).

#### 2.2.4.5. Relações de Contato

O contato inferior do Membro Quebradas com a Formação Ponta do Mel é concordante ou discordante erosivo, e discordante com a Formação Alagamar.

O contato superior do Membro Quebradas com a Formação Jandaíra é concordante ou discordante; e com a seção superior da Formação Ubarana é discordante.

O contato superior da seção superior da Formação Ubarana com a Formação Guamaré tanto pode ser concordante como discordante.

#### 2.2.4.6. Espessura

A seção superior atinge uma espessura máxima de 2.000 m aproximadamente.

#### 2.2.4.7. Ambiente Depositional

O ambiente deposicional da Formação Ubarana é tipicamente de plataforma continental e planície bacial. O Membro Quebradas é turbidítico, enquanto que a seção mais superior tem características regressivas.

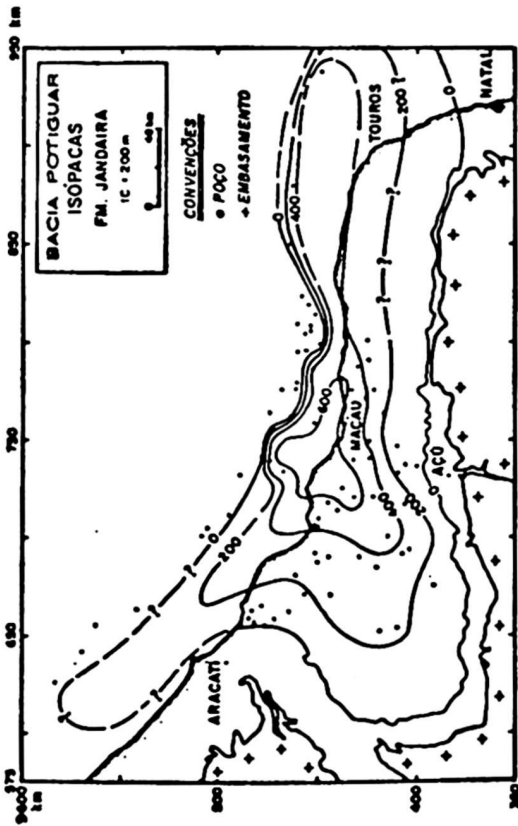


Fig. 10

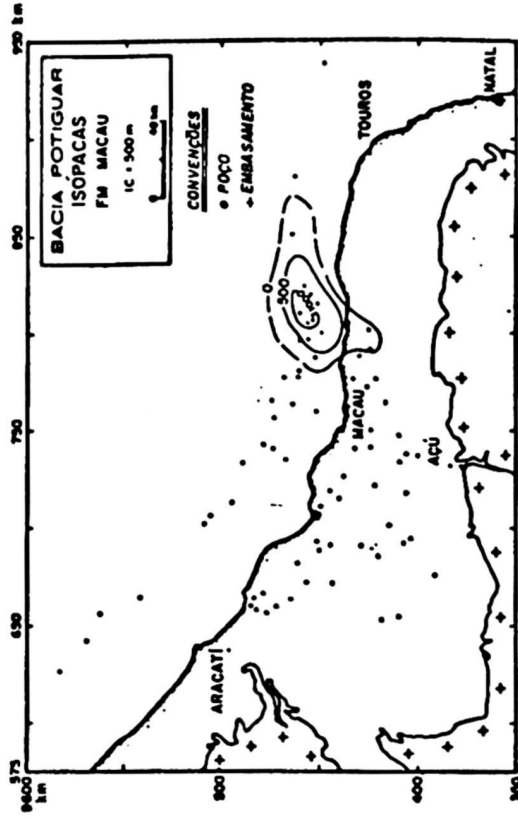


Fig. 11

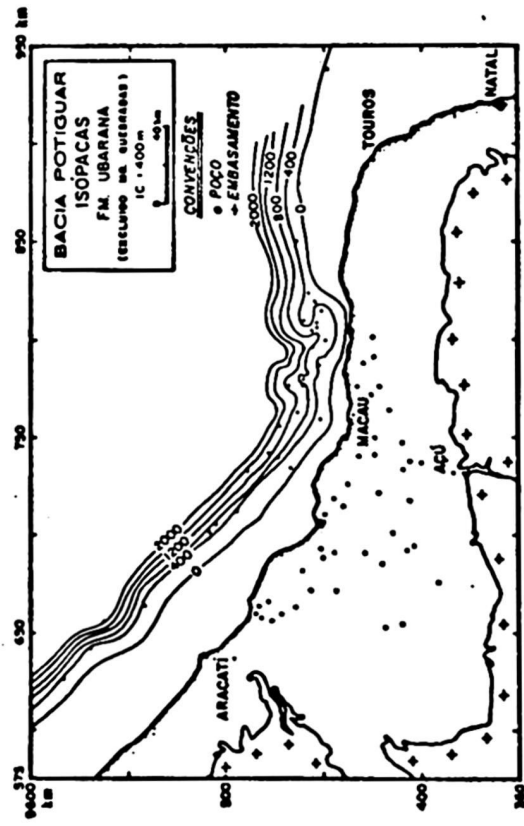


Fig. 8

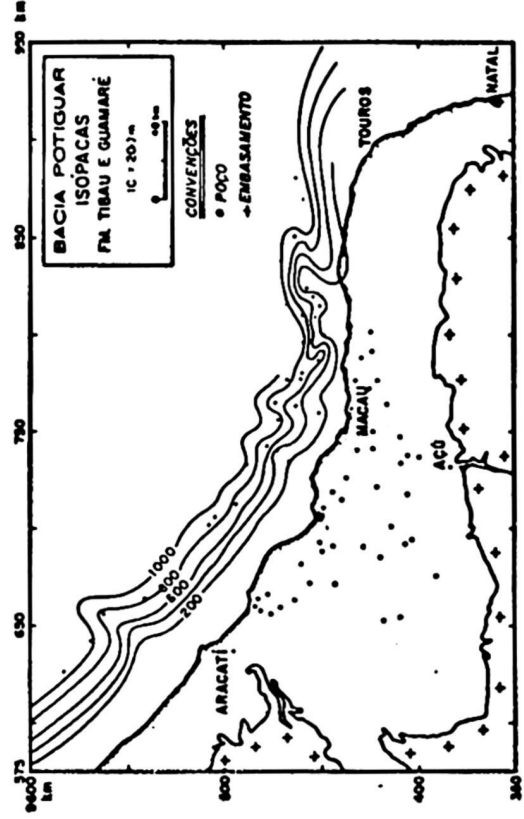


Fig. 12

#### 2.2.4.8. Idade

Para a seção inferior (Membro Quebradas) é atribuída idade Cenomaniano Superior a Turoniano; para a porção superior, Campaniano-Oligoceno.

#### 2.2.5. Formação Açu

##### 2.2.5.1. Histórico

A menção mais antiga do nome "Arenito Açu" deve-se a Kreidler (1949), nos mapas geológicos referentes a área sedimentar dos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

Kegel (1957) e Beurlen (1961) reconhecem na unidade três membros. Em 1966, técnicos da SUDENE, subdividem a unidade apenas em dois membros, um superior predominantemente argiloso e o inferior constituído por arenito.

Assim sendo, Sampaio & Schaller (1968) abandonaram a terminologia "Arenito Açu" e propuseram a denominação Formação Açu.

##### 2.2.5.2. Seção Tipo

Como seção de referência os autores citam o intervalo 300-844 m do poço PA-1-RN (Panela do Amaro), a sudoeste de Mossoró.

##### 2.2.5.3. Características Litológicas

Esta unidade caracteriza-se litologicamente por uma seção superior constituída de arenitos finos intercalados com folhelhos esverdeados; Na porção inferior predominam sedimentos avermelhados, representados por conglomerados e arenitos com intercalações subordinadas de folhelho e siltitos.

#### 2.2.5.4. Distribuição dos Sedimentos

Esta unidade aflora em toda a área emersa, com uma distribuição circundando toda a borda da bacia e em direção a plataforma continental grada lateralmente para as Formações Ponta do Mel e Ubarana (Membro Quebradas)(fig. 9).

#### 2.2.5.5. Relações de Contato

Na parte emersa da bacia, a Formação Açú repousa discordantemente sobre a Formação Alagamar e é sobreposta concordantemente pela Formação Jandaíra.

Em direção a plataforma continental, esta sequência grada lateralmente para as Formações Ponta do Mel e Ubarana (Membro Quebradas).

#### 2.2.5.6. Espessura

Estima-se em 600 m a espessura máxima da Formação Açú.

#### 2.2.5.7. Ambiente Depositional

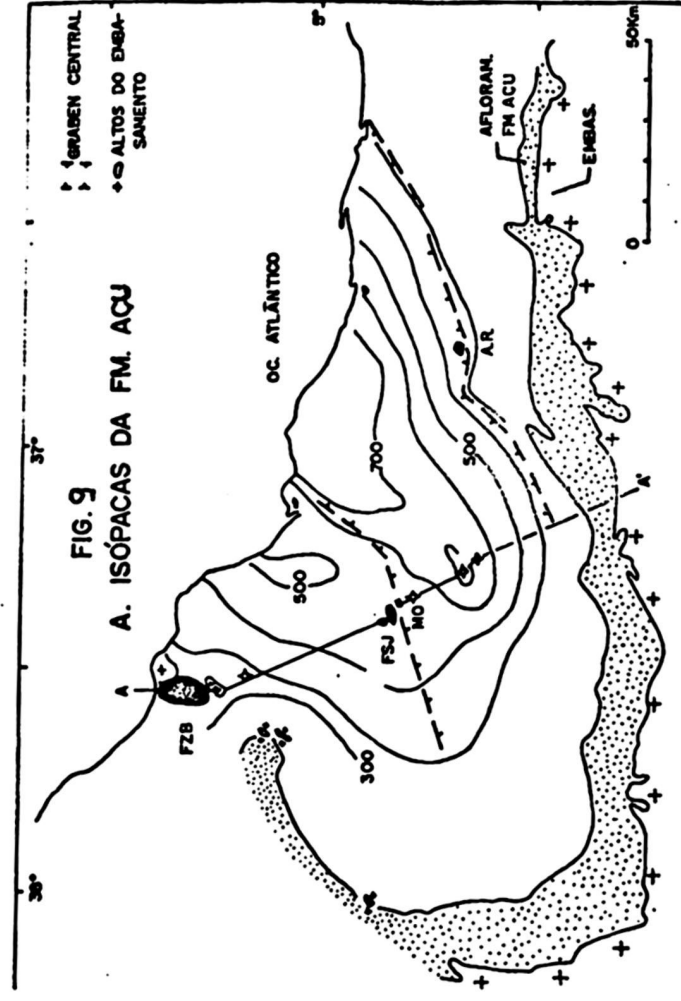
Segundo Castro et alii (1981), para a seção inferior da unidade Açú, o ambiente deposicional é do tipo leques aluviais e rios anastomosados e meandantes (fluvial).

Na seção superior e nas áreas de transição (plataforma continental) predominam ambiente do tipo deltaico-estuarino, baía e praia.

#### 2.2.5.8. Idade

A Formação Açú abrange idades Albiano(?), Cenomaniano e Turoniano.





Fonte: Castro et alii, 1982

## 2.2.6. Formação Jandaíra

### 2.2.6.1. Histórico

A referência mais antiga da denominação "Calcário Jandaíra" deve-se a Kreidler (1949), nos mapas geológicos das áreas sedimentares do Estado do Rio Grande do Norte. Entretanto, em relatórios anteriores de Kreidler também são feitas menções a esta unidade sob o nome de "Apodi Grup". Posteriormente, Kegel (1957) divide a unidade em três partes. Beurlen (1961 e 1966) adota o desmembramento em duas unidades.

Sampaio & Schaller (1968), analisando o problema, concluíram que as divisões acima mencionadas basearam-se em critérios bioestratigráficos e assim sendo propuseram a designação Formação Jandaíra.

### 2.2.6.2. Seção Tipo

Como seção de referências Sampaio & Schaller (1968) citam o intervalo superfície -300 m do poço PA-1-RN (Panela do Amaro nº 1), a sudoeste de Mossoró.

### 2.2.6.3. Características Litológicas

Litologicamente a unidade é constituída segundo Tibana & Terra (1981), por calcarenito com bioclastos de moluscos, algas verdes, briozoários e equinóides. Subordinadamente ocorrem calcarenito a miliolídeos, calcilutito bioclástico e calcilutito "birdseyes".

### 2.2.6.4. Distribuição dos Sedimentos

Esta unidade aflora em toda a área emersa da bacia, circundando a Formação Açu e se estendendo para o centro da

bacia em direção ao litoral. Na plataforma continental grada lateralmente para os sedimentos da porção superior da Formação Ubarana (fig. 10).

#### 2.2.6.5. Relações de Contato

A unidade Jandaíra, na parte emersa, sobrepõe-se em contato concordante, gradacional sobre os sedimentos da Formação Açu, e sotopõe-se discordantemente aos sedimentos da Formação Tibau.

Na Plataforma Continental, o contato inferior com a Formação Ubarana é concordante ou discordante. O contato superior, ora com a Formação Guamaré, ora com a Formação Tibau tanto pode ser concordante, como discordante.

#### 2.2.6.6. Espessura

A espessura máxima da Formação Jandaíra é estimada em torno de 650 m.

#### 2.2.6.7. Ambiente Depositional

Tibana & Terra (1981) reconheceram os seguintes ambientes deposicionais para a Formação Jandaíra: planície de maré, laguna rasa, plataforma rasa e mar aberto.

#### 2.2.6.8. Idade

Souza (1982) atribui idade Turoniano a Campaniano Inferior para a Formação Jandaíra.

#### 2.2.7. Formação Macau

### 2.2.7.1. Histórico

Deve-se a Mayer (1979) a denominação de Formação Macau. Este nome provém da cidade homônima litorânea do Rio Grande do Norte.

### 2.2.7.2. Características Litológicas

Esta unidade é representada pelos derrames de olivina-basalto, localmente vesicular, afanítico e subordinadamente com textura botrioidal (fig. 11a).

### 2.2.7.3. Distribuição dos Derrames

Estes derrames predominam em subsuperfície, na área de Ubarana, na plataforma continental. Na área emersa são conhecidas ocorrências apenas a SE da cidade de Macau (fig. 11).

### Relações de Contato

A Formação Macau corta os sedimentos das unidades Tibau, Guamaré e Ubarana.

### 2.2.7.5. Idade

Baseando-se nas relações de contato com as formações acima mencionadas, atribui-se idades Oligoceno e Mioceno aos derrames da Formação Macau.

## 2.2.8. Formação Guamaré

### 2.2.8.1. Histórico

Araújo et alii (1978) faz referências informalmen

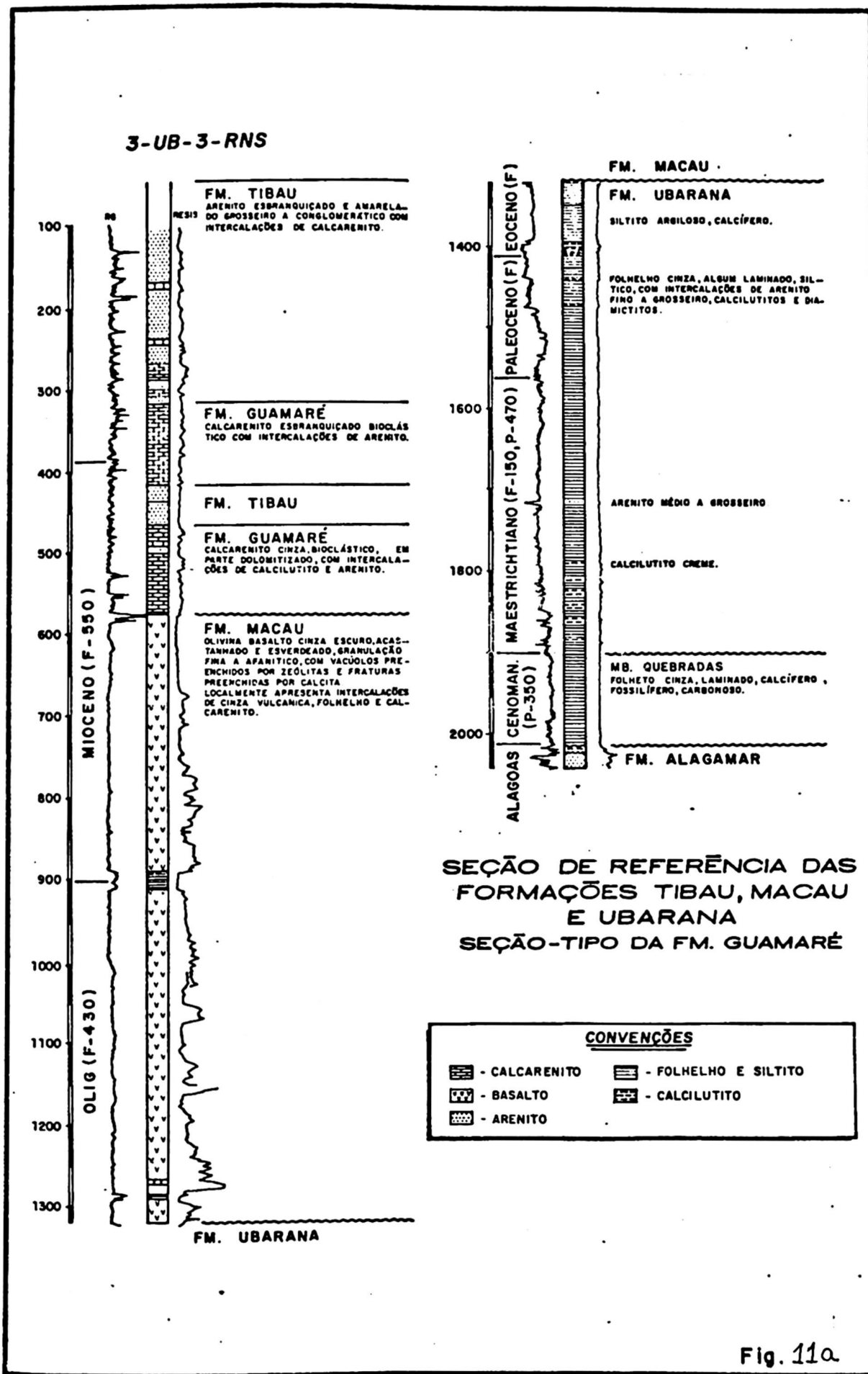


Fig. 11a

te à Formação Guamaré. Souza (1982) refere-se a esta terminologia para designar uma seqüência carbonática que ocorre na plataforma continental do Rio Grande do Norte e Ceará, sobreposta a Formação Ubarana e sotoposta à Formação Tibau.

#### 2.2.8.2. Seção Tipo

Esta unidade tem sua seção tipo representada pelos intervalos 317-420 m e 465-571 m do poço 3-UB-3-RNS de latitude  $4^{\circ}54'33,6''S$  e longitude  $36^{\circ}20'12''W$ .

#### 2.2.8.3. Características Litológicas

A Formação Guamaré é constituída de calcarenito creme acastanhado, bioclástico, em parte recristalizado e dolomitizado, com intercalações de calcilutito, folhelho e arenito (fig. 11a).

#### 2.2.8.4. Distribuição dos Sedimentos

Esta seqüência é restrita a plataforma continental (fig. 12).

#### 2.2.8.5. Relações de Contato

Das observações em poços perfurados próximo a borda da plataforma, constatou-se que a Formação Guamaré ocorre intercalada com as Formações Tibau, Macau e Ubarana.

#### 2.2.8.6. Espessura

Esta unidade apresenta maior espessura nas áreas próximas da borda da plataforma continental atual e adelgaça-se em direção à costa.

#### 2.2.8.7. Ambiente Depositional

Segundo Fisher et alii (1975) o ambiente de deposição da seqüência Alagamar é do tipo plataforma carbonática e talu de carbonático.

#### 2.2.8.8. Idade

Segundo Regali & Gonzaga (1982) é atribuída idade Campaniano à Mioceno para a Formação Guamaré.

### 2.2.9. Formação Tibau

#### 2.2.9.1. Histórico

Cypriano & Nunes (1968) definiram esta unidade na parte emersa da bacia, enquanto Mayer (1974) reconheceu esta seqüência na plataforma continental.

#### 2.2.9.2. Seção Tipo

Para a área da plataforma continental, Mayer (1974) indica como seção tipo o intervalo 120 a 600 m do poço 1-RNS-1, enquanto Souza (1982) faz referência aos intervalos 102 e 265 m e 420 a 465 m do poço 3-UB-3-RNS.

#### 2.2.9.3. Características Litológicas

A unidade consiste predominantemente de arenito quartzoso de granulação grosseira e conglomerática e mal selecionado, com intercalações de calcarenito e argila amarelada (fig.11a).

#### 2.2.9.4. Distribuição dos Sedimentos

A Formação Tibau não aflora na parte emersa da bacia, ocorrendo encoberta pelos sedimentos Barreiras; entretanto há registros desta unidade em poços perfurados nesta área. Em direção ao mar, esta seqüência avança atingindo sua maior espessura (fig. 12).

#### 2.2.9.5. Relações de Contato

Esta formação sobrepõe-se discordantemente, na área emersa da bacia, à Formação Jandaíra e concordantemente à Formação Guamaré na plataforma continental.

Os sedimentos da Formação Tibau estão sotopostos, na área emersa, pelos sedimentos do Grupo Barreiras e em direção à plataforma continental desenvolvem um padrão tipicamente progradante onde se forma espessa seqüência.

#### 2.2.9.6. Ambiente Depositional

Segundo Fisher et alii (1975), o ambiente deposi-  
cional dominante é o de "fan-delta".

#### 2.2.9.7. Idade

A idade da Formação Tibau é Mioceno-Paleoceno.

#### 2.2.10. Grupo Barreiras e Sedimentos de Praia e Aluvião

Na área emersa da bacia ocorrem ainda sedimentos pertencentes ao Grupo Barreiras, depósitos recentes aluvionares e de praia, cuja unidade correlata, na plataforma continental, é representada pela porção mais superior da Formação Tibau.

### 2.3. Evolução Tectono-Geológica



### 2.3. Evolução Tectono-Geológica

A origem da margem continental brasileira e o desenvolvimento das bacias marginais ali contidas têm sido explicadas adequadamente pelo modelo conceitual da deriva continental e seus correlários de geração de assoalho oceânico (formação concomitante do Oceano Atlântico Sul) e a tectônica de placas.

De acordo com este modelo e mediante a integração de dados estruturais e estratigráficos, são reconhecidas as seguintes seqüências deposicionais na Bacia Potiguar:

#### 2.3.1. Seqüência "Rift" ou Continental

Esta seqüência é o resultado de um estágio tectônico evolutivo denominado estágio "rift-valley" e é reconhecido por um intenso falhamento, responsável pela implantação da Bacia Potiguar, no setor equatorial da margem continental brasileira. O desenvolvimento deste estágio deu-se entre o fim do Andar Alagoas ou no Eocretáceo (pré-Alagoas) e o início do Albiano. Segundo Asmus & Porto (1980), não há registros de que se lhe tenham precedido expressivos soerguimentos crustais, tendo se desenvolvido um "rift" profundo com pequena atividade vulcânica.

Decorrente deste rifteamento estabeleceu-se nesta bacia dois sistemas principais de falhas de direções dominantes N e NE originando estruturas do tipo "horsts" e "grabens" (fig. 13).

Tal situação é bem evidente no Mapa Bouguer (fig. 14) e no esboço estrutural da bacia (fig. 15) obtidos com base na interpretação de dados gravimétricos (Gomes & Motta, 1982). Estes dados mostram que altos e baixos gravimétricos refletem blocos estruturais elevados ("horsts") e rebaixados ("grabens") que se alternam em relação a um ponto que pode ser considerado como centro geográfico e geométrico da bacia e se prolongam na direção da plataforma continental (figs. 16a e 16b).

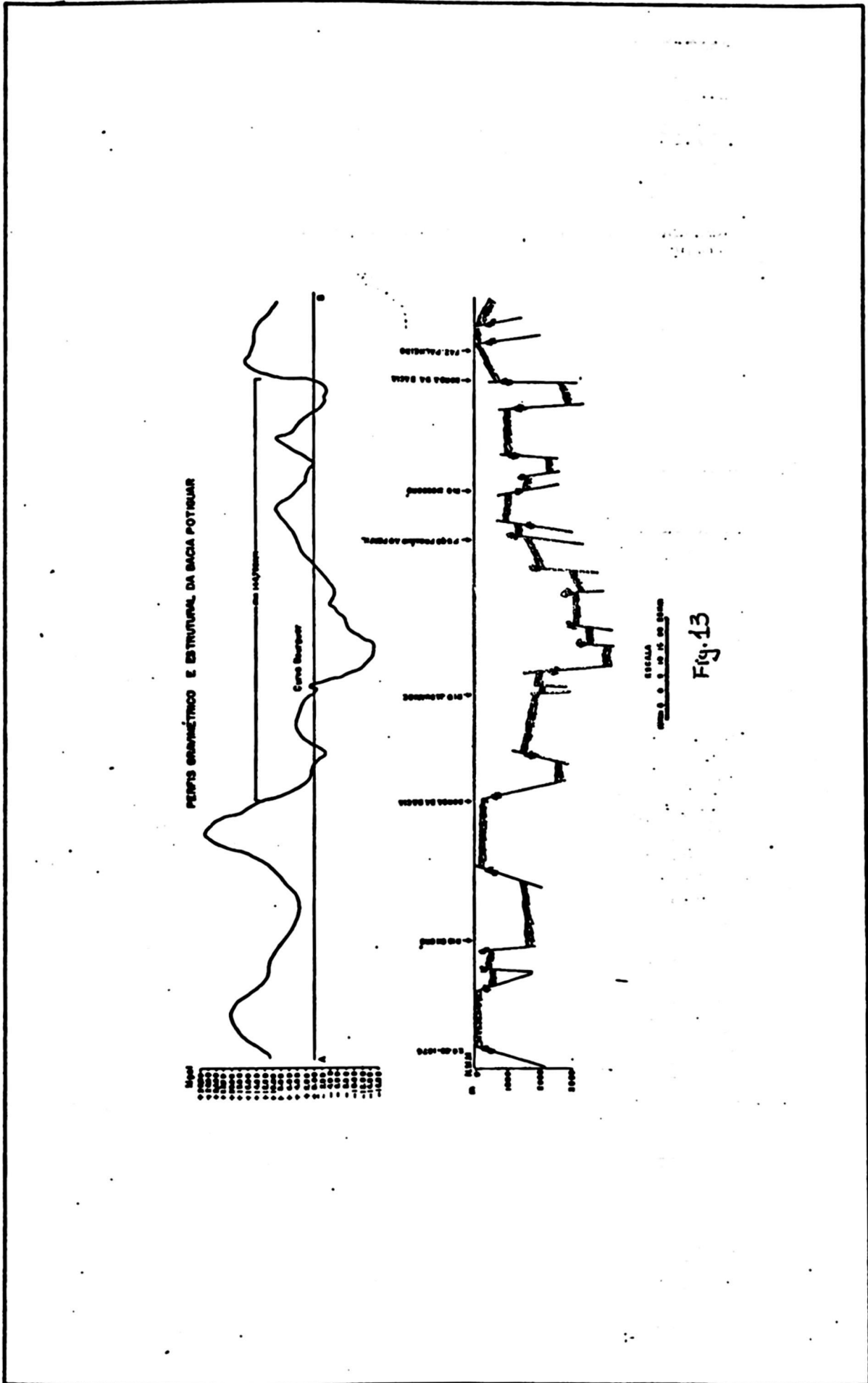
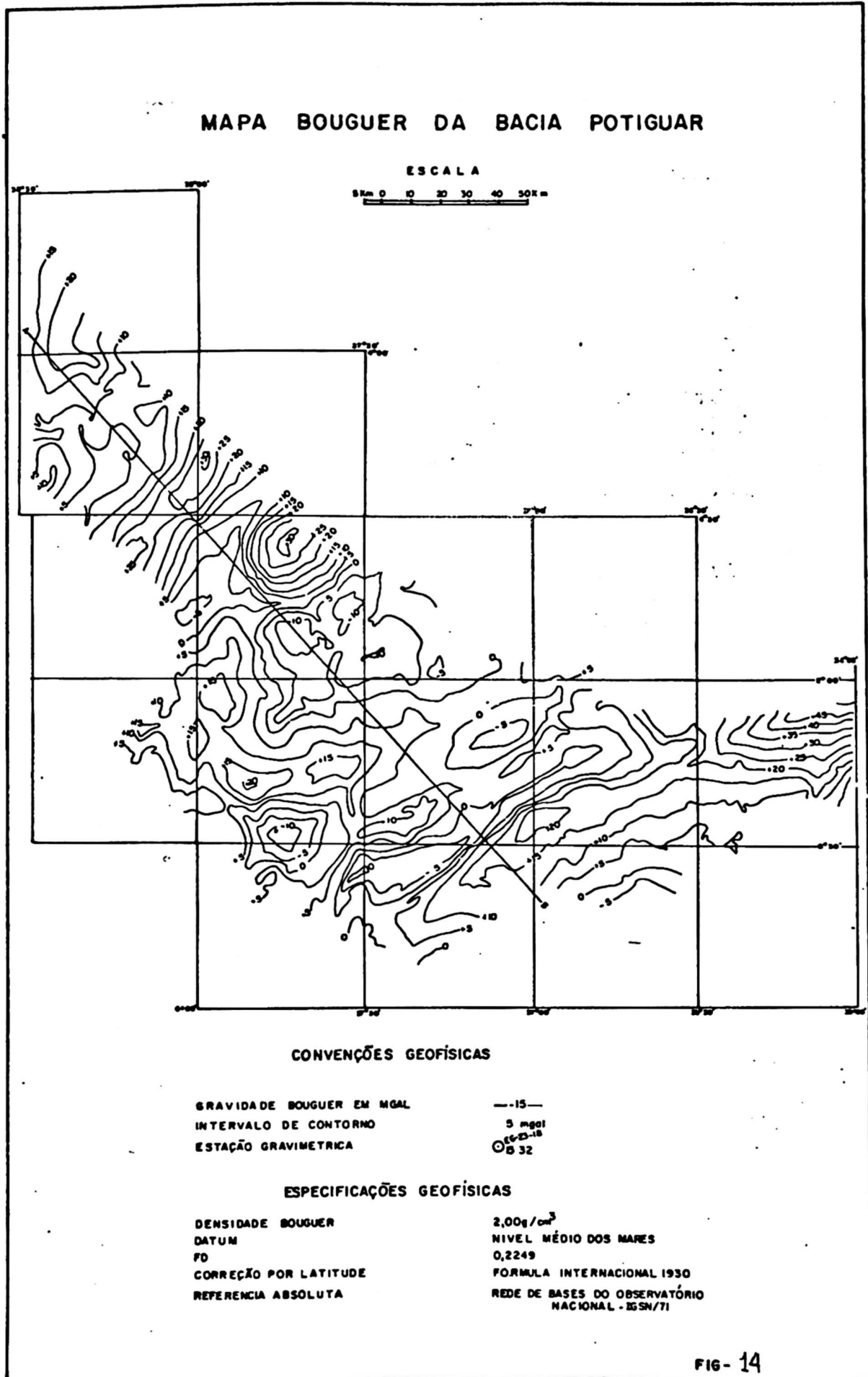
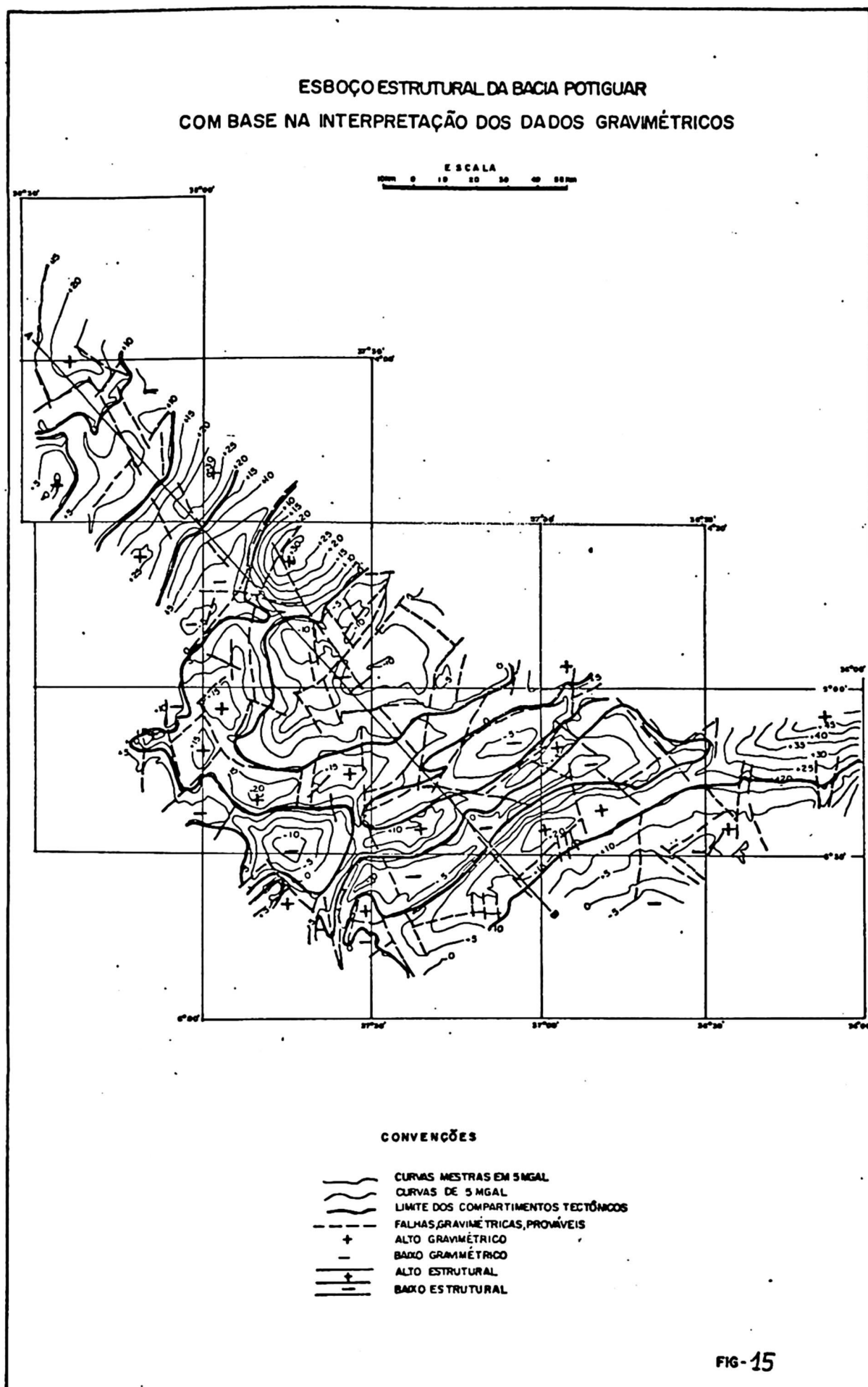


Fig. 13

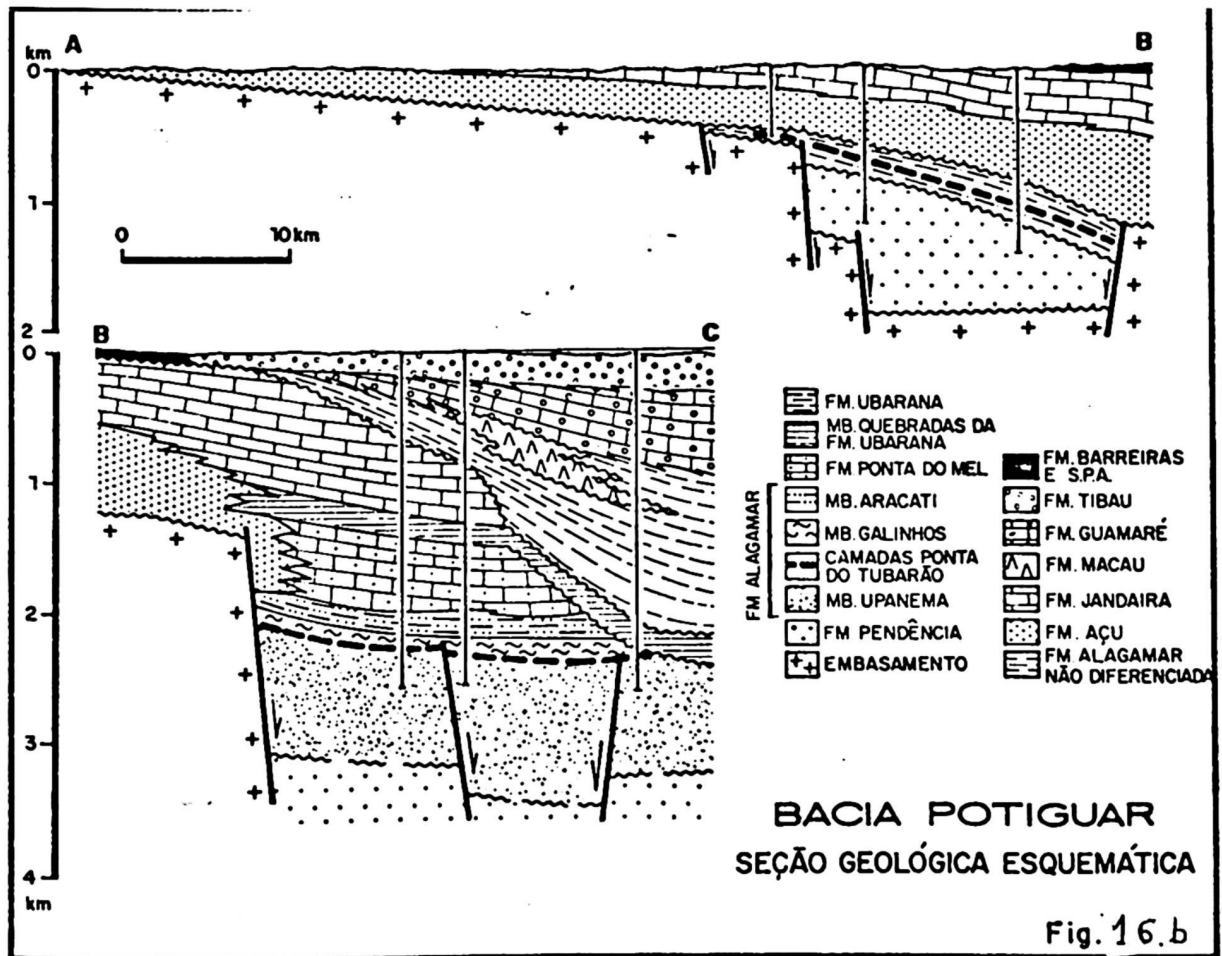
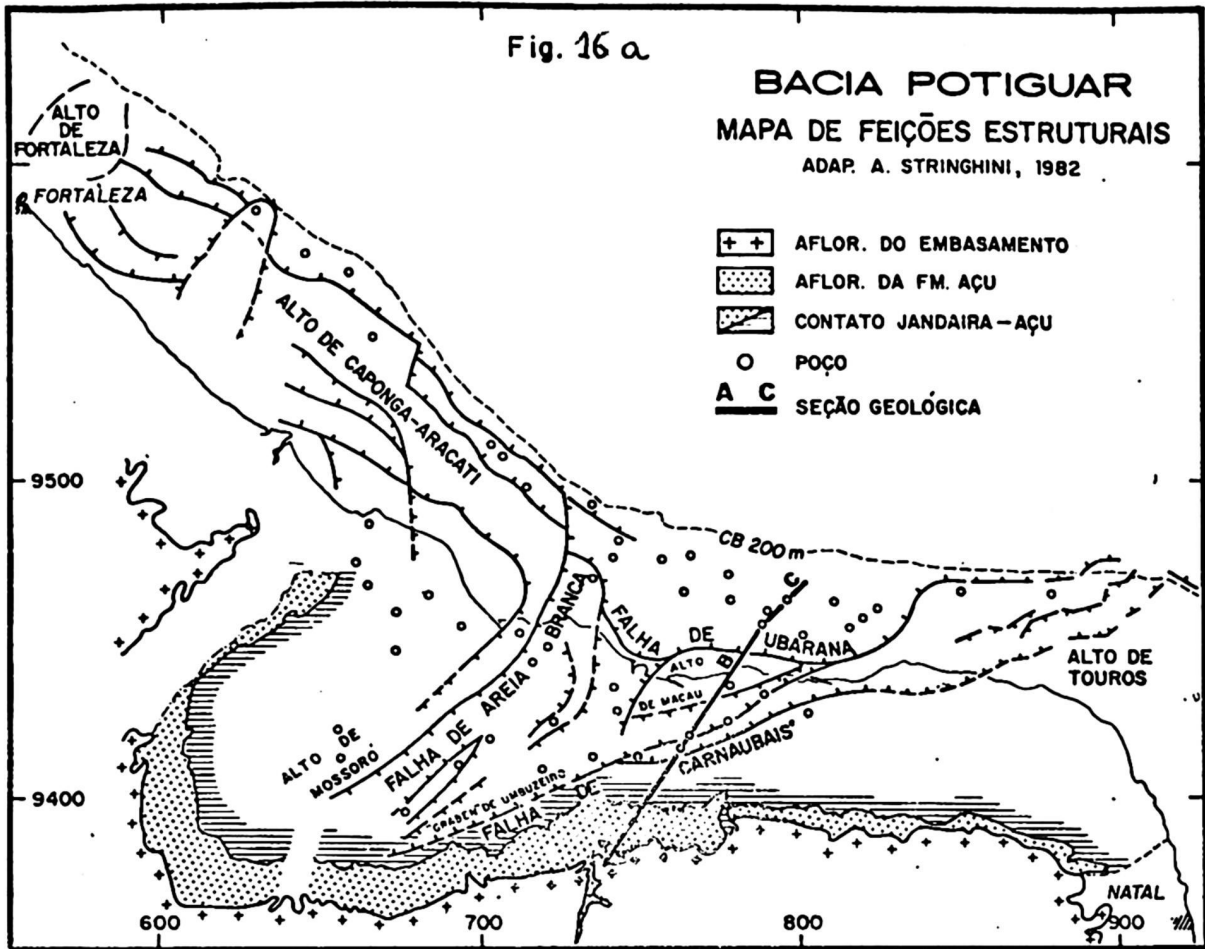
Fonte: Gomes & Motta, 1982



Fonte: Gomes & Motta, 1982



Fonte: Gomes & Motta, 1982



Segundo Asmus (1982), o tectonismo atuante na margem continental brasileira inclui-se como um dos eventos mais importantes da Reativação Wealdiana (ou Sul Atlântico) e está fundamentalmente ligado, no setor equatorial da margem, a movimentos verticais. Neste setor as feições estruturais dominantes são do tipo falhas normais, cuja idade corresponde ao início do processo de migração continental ("drifting") da América do Sul e da África.

Dentro do arcabouço estrutural exposto, inicia-se no Andar pré-Alagoas, em toda a Bacia Potiguar, a deposição sintectônica da Formação Pendência (sedimentos continentais com ostracóides) representada pelos sedimentos flúvio-lacustrinos e depósitos de turbiditos e leques aluviais associados a falhamentos.

Processos erosivos começam a atuar nas partes mais elevadas na área emersa, enquanto na área submersa prossegue a sedimentação dos clásticos basais da Formação Alagamar (Membro Upanema). Somente no tempo Alagoas a sedimentação sintectônica da Unidade Alagamar desenvolve-se em direção à costa atual, atingindo a área emersa da bacia.

Houve a seguir um período atectônico que culminou com a deposição das Camadas Ponta do Tubarão (Formação Alagamar), marcando o final da sedimentação continental na área submersa (plataforma continental).

### 2.3.2. Seqüência "Drifting" ou Transicional

O estágio tectônico controlador da deposição desta seqüência denominado estágio "drifting" ou proto-oceano caracteriza-se no setor equatorial da margem continental brasileira, por uma intensificação dos falhamentos responsáveis pela implantação das bacias neste setor, como também marca o início da formação das estruturas transversais do tipo zona de fratura oceânica (Gorini, 1977).

Assim sendo, a deriva que caracterizou o início da tração no setor equatorial da margem continental, no Alagoano-Albiano, posterior a fragmentação continental do estágio "rift-valley", é contemporânea ao cisalhamento intracontinental e portanto à fase principal da fragmentação (rifteamento) do setor norte da margem.

No setor equatorial da margem continental, a idade principal das falhas normais é alagoana-albiana, enquanto que no setor leste, sudeste e sul as falhas são predominantemente pré-Alagoas.

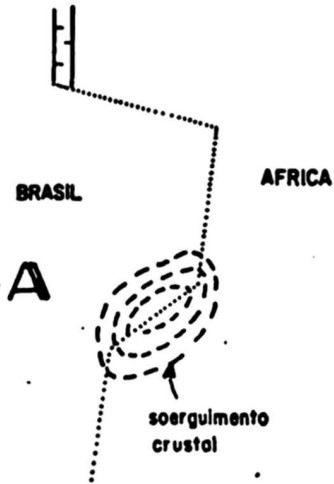
Decorre de tal inferência, uma implicação importante no setor leste-sudeste-sul com o início da formação do assoalho oceânico e, em consequência, o limite crosta continental-crosta oceânica. O início da formação deste assoalho oceânico teria acontecido apenas no final do Alagoano e princípio do Albiano, originando a "Depressão Afro-Brasileira" (Estrella, 1972), neste setor da margem continental, onde se instalou o proto-oceano estendendo-se até a Bacia Sergipe/Alagoas. As características estruturais regionais propiciavam a existência de elementos segregadores capazes de criar as condições restritivas desenvolvendo-se um espesso intervalo evaporítico.

Assim sendo, a Bacia Potiguar situada no setor equatorial da margem estava fora destas condições de restrição do Aptiano, reinantes na "Depressão Afro-Brasileira". Como consequência, enquanto no setor leste da margem continental predominava uma sedimentação tipicamente evaporítica no Aptiano/Albiano, na Bacia Potiguar desenvolvia-se uma sedimentação transicional representada por um sistema deltáico com influência marinha (Membros Galinhos e Aracati da Formação Alagamar) (fig. 17a).

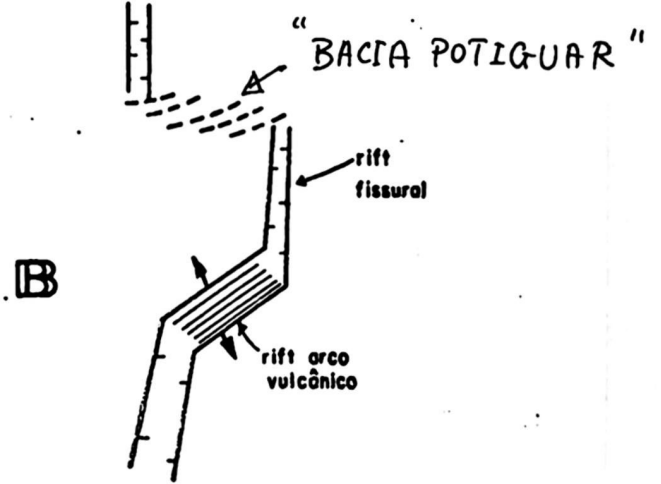
### 2.3.3. Seqüência de Oceano Aberto ou Marinha

O progressivo alargamento do oceano como consequência da formação de novo assoalho oceânico, o resfriamento da crosta

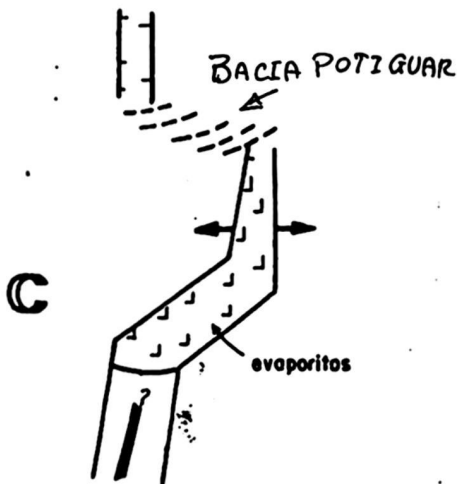
NEOJÚRASSICO (DONJOANIANO)



EOCRETÁCEO (BAHIANO)



EOCRETÁCEO (ALAGOANO)



EOCRETÁCEO (ALBIANO)

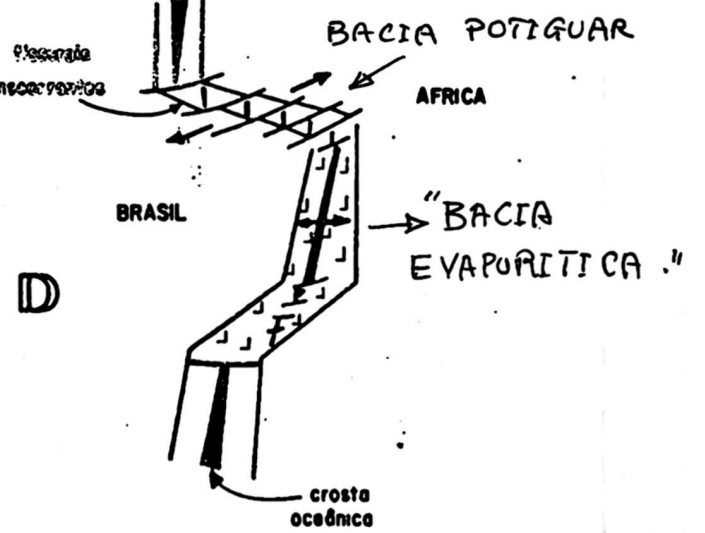


Fig-17a

Fonte: Asmus (1982)



ta oceânica próxima a margem e, como resultado, sua continuada subsidência, caracterizam um estágio tectônico de relativa quiescência, sem falhamentos expressivos. O desenvolvimento deste estilo tectônico, na margem continental brasileira, favorece o estabelecimento de condições oceânicas (francamente marinhas), a partir do Cenomaniano Superior-Turoniano, responsável pela deposição de espessa seqüência marinha. Esta seção caracteriza-se bioestratigraficamente por foraminíferos planctônicos, nanofósseis e palinóforos (Beurlen, 1982).

Neste período, a Bacia Potiguar é submetida a um ciclo erosivo e uma lenta e generalizada subsidência, acompanhada de basculamento para N-NE, na direção do mar. Tais condições favoreceram o desenvolvimento de dois ciclos regressivos-transgressivos caracterizados na área submersa da bacia pela deposição da Formação Ponta do Mel predominantemente de plataforma rasa (calcarenitos), associada a planície de maré pouco desenvolvida e mar aberto (calcilutito e plantônicos), e os turbiditos de Membro Quebradas (porção inferior da Formação Ubarana).

Concomitantemente, ocorria na área emersa a deposição da Formação Açu, representada na seção inferior pelos sedimentos terrígenos grosseiros aluviais (reservatório dos campos petrolíferos das Fazendas Belém, São João e Alto do Rodrigues) e na seção superior pelos terrígenos finos deltáicos (portadores de óleo na região de Mossoró), lagunares e litorâneos (figs. 17 e 18).

No fim do Turoniano, na área submersa desenvolveu-se a plataforma carbonática da Formação Jandaíra, que transgride a bacia na área emersa.

A partir do Campaniano a bacia é submetida a um basculamento geral para norte, além de um vulcanismo miocênico na área de Reentrância de Ubarana (fig. 17). É nesse estágio que se processa o entulhamento final da bacia por sucessivas progradações de clásticos e carbonatos que se espessam no sentido do mar (ciclo

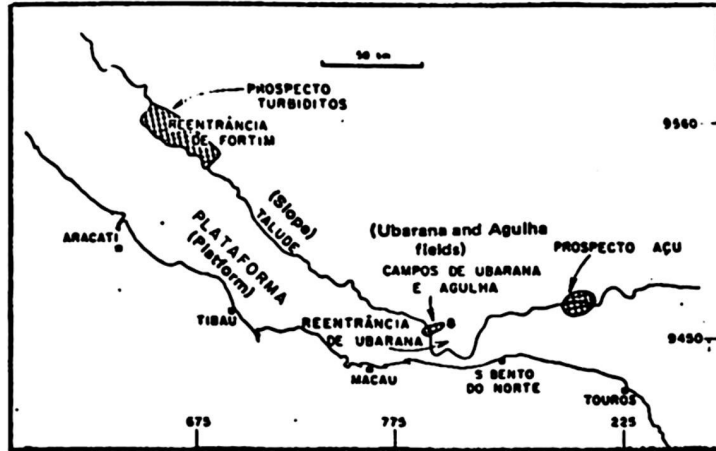


Fig. 17 Paleogeography of the Jandaia Formation, with the location of present prospects and sites of the Ubarana and Agulha fields.

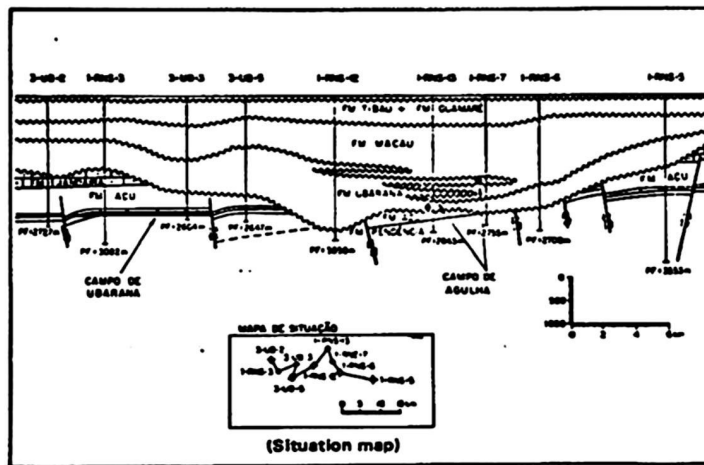


Fig. 18 Geological cross-section through the Ubarana and Agulha fields, underlining the structural character of the former and the stratigraphy of the latter.

Fonte: Araújo et alii, 1978

erosivo-regressivo).

Esta seqüência progradante que se estende até o Mioceno caracteriza-se por depósitos de talude e planície bacial (Formação Ubarana); na parte média, acha-se a seqüência carbonática de plataforma (Formação Guamaré) e seguem-se os depósitos de "fan-delta" (Formação Tibau).

Estão presentes ainda na bacia depósitos do Neogeno representados pelos sedimentos Barreiras e depósitos de praia e alúviões (área emersa).

A dinâmica de algumas falhas ou feixes de falhas continuam ainda hoje a desnivelar suavemente os blocos em que a bacia se acha compartimentada. Exemplo deste processo é a tendência migratória do estuário do Rio Açu de leste para oeste (Fortes, 1982).

Do acima exposto conclui-se que a sedimentação marinha na Bacia Potiguar inicia-se em ambiente relativamente profundo, o qual se torna gradativamente mais raso até o final, inclusive na seqüência progradante. Esta evolução sugere uma situação regressiva contínua do Turoniano até o Quaternário; a fase transgressiva propriamente dita deve ter ocorrido, portanto durante um certo período de tempo, equivalente ao Cenomaniano Médio, sem todavia ter deixado registro litológico.

### 3. METALOGENIA DO ENXOFRE

#### 3.1. Generalidades

##### 3.1.1. Obtenção do Enxofre

Aproximadamente 60% da produção mundial de enxofre se apresenta sob a forma nativa ou elementar e a parte restante é constituída de subprodutos, denominados genericamente de enxofre não elementar ou enxofre sob outras formas.

Pouco mais da metade do enxofre nativo provém do refino de petróleo e do gás natural; cerca de 40% da exploração de jazidas de enxofre nativo pelo Processo "Frasch", o qual consiste na injeção de água superaquecida, sob pressão, que funde o enxofre contido na rocha e permite o seu bombeamento até a superfície, em forma líquida; e finalmente, da mineração, responsável por apenas 5%. A parte restante da produção mundial (40%), corresponde ao enxofre não elementar, que é subproduto, geralmente sob a forma de ácido sulfúrico, da produção de metais não-ferrosos, como chumbo, cobre, zinco e níquel, do beneficiamento de minérios sulfetados, como a pirita, e ainda, do carvão e do xisto.

De acordo com a origem, método de obtenção ou especificações, recebe por vezes o enxofre denominações especiais, como:

- enxofre nativo: encontrado na natureza sob a forma elementar;
- enxofre "Frasch": enxofre nativo obtido pelo método "Frasch";
- enxofre recuperado: obtido do gás natural e do refino do petróleo;
- enxofre cru (Brimstone): designação comum, referente ao enxofre elementar com 99,0% a 99,9% de pureza.

### 3.1.2. Enxofre no Brasil

O enxofre é produzido no Brasil em quantidade que atende a menos de 15% do consumo interno.

Da produção nacional, que em 1980 atingiu 126 mil toneladas, metade foi obtida sob a forma de enxofre elementar proveniente do refino do petróleo e, em diminuta proporção, do processamento do xisto. O restante, corresponde a enxofre contido no ácido sulfúrico, resultou do aproveitamento de rejeitos de carvão e, com menor peso, da metalurgia do zinco.

Em 1980 o consumo de enxofre superou um milhão de toneladas, registrando-se crescimento de quase 40% em relação ao ano anterior. Esta expressiva elevação pode ser creditada ao desenvolvimento da produção interna de fertilizantes fosfatados (fig. 19).

### 3.1.3. Importações Brasileiras de Enxofre

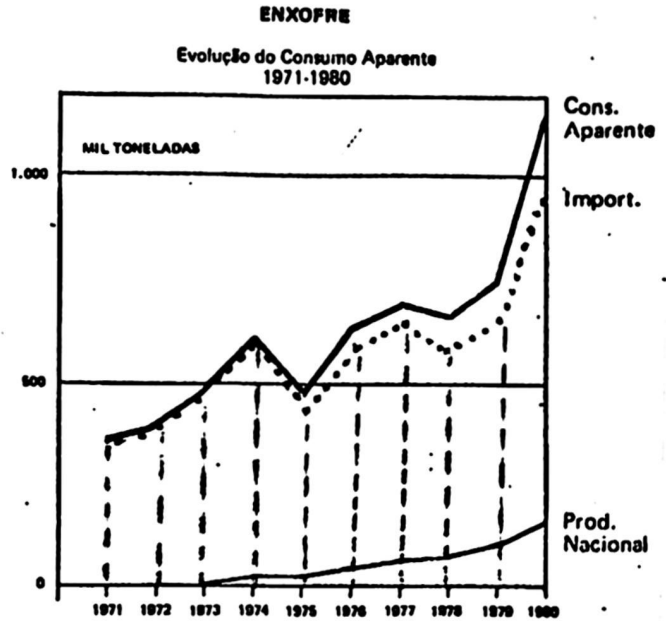
O Brasil se situa entre os dez maiores importadores mundiais de enxofre, tendo as importações alcançado 940 mil toneladas em 1980, o que acarretou dispêndio de divisas de US\$ 130 milhões, mais de duas vezes o verificado em 1979, quando foram adquiridos 670 mil toneladas ao custo de US\$ 54 milhões.

Este significativo acréscimo decorreu não só do aumento do volume importado, de 40% mas principalmente da acentuada subida do preço do produto, da ordem de 70%.

Na última década as importações dessa substância cresceram em média de 14% anualmente, enquanto o preço se elevava 16% também ao ano. Mantidas essas taxas, a evasão de divisas atingirá, em 1985 aproximadamente US\$ 500 milhões (figs. 20 e 21).

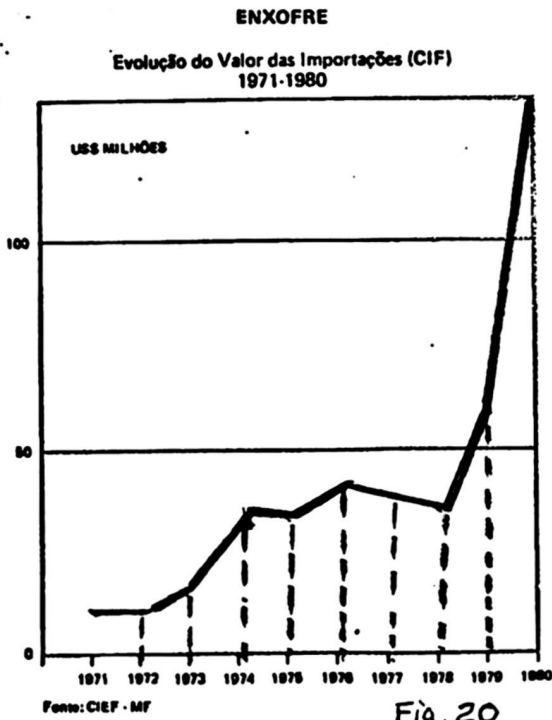
### 3.1.4. Mercado Mundial do Enxofre

A produção mundial de enxofre atingiu, em 1980, pouco me



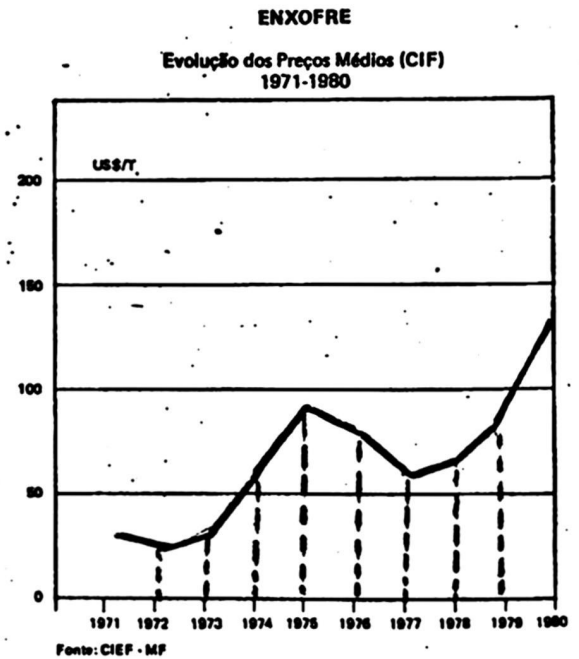
Fonte: CIEF - MF e Fevereiro

Fig. 19



Fonte: CIEF - MF

Fig. 20



Fonte: CIEF - MF

Fig. 21

nos de 60 milhões de toneladas. Os principais produtores são, em ordem decrescente, Estados Unidos, União Soviética, Canadá e Polônia, responsáveis, em conjunto, por mais de 60% da oferta do produto. Japão, México, França e Holanda detêm 15% da produção.

Dentre os exportadores, é o Canadá o mais importante, com cerca de 30% do mercado internacional, seguido da Polônia; Estados Unidos, França e México apresentam-se também como exportadores de expressão. O nível de consumo de enxofre, como mencionado, representa indicador do estágio de industrialização alcançado por um país. Assim, os maiores consumidores, Estados Unidos, Rússia, Japão, França e Alemanha Ocidental constituem, não por coincidência, as economias mais desenvolvidas.

O consumo de enxofre aumentará a média de 4-5% por ano, alcançando 30 milhões de t/ano, no ano 2.000, ou seja, cerca de três vezes à média atual (Hazleton, 1970; Lewis, 1970).

O Brasil ainda não figura entre os maiores consumidores mundiais de enxofre e, em termos per capita, o grau de utilização aqui é quase sete vezes menor do que o dos Estados Unidos e inferior a um terço do registrado na Alemanha Ocidental.

Diante de tais considerações, é louvável o programa desenvolvido pela Petromisa, na Bacia Sedimentar Sergipe/Alagoas, nos estudos de definir a viabilidade econômica para o depósito de Castanhal, primeiro depósito de enxofre nativo do Brasil.

### 3.2. Ambiente Geológico

#### 3.2.1. Geoquímica

O enxofre é o 13º elemento em ordem de abundância nas rochas, e está presente nas rochas ígneas com valor em torno de 520 ppm. No magma o enxofre ocorre como íon-sulfídrico, combinando a maioria das vezes com íons metálicos, como também com apreciável quantidade de hidrogênio e oxigênio.

As rochas sedimentares contêm larga quantidade desta substância: arenito 2.000 ppm; folhelho 2.600 ppm e calcário 1.100 ppm.

Na presença de abundância de oxigênio, o íon sulfídrico é oxigenado para íon sulfato, cuja forma é encontrada na atmosfera.

O enxofre é indispensável às plantas e animais e está sendo constantemente absorvido e liberado durante o ciclo biológico.

Assim, o enxofre está presente nos ciclos orgânicos e inorgânicos, ocorrendo na litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera (Rankama & Sahama, 1950).

### 3.2.1.1. Ciclo Inorgânico

O enxofre trazido do interior da crosta terrestre pelo magma, combina próximo à superfície com ferro e outros elementos metálicos formando sulfetos, ou se o oxigênio está disponível forma sulfatos.

Quando o magma alcança a superfície em forma de erupções vulcânicas, o enxofre nele contido pode combinar-se com o hidrogênio e ser expelido para a atmosfera como gás sulfídrico; combinar com o oxigênio e também ser expelido sob a forma de gás; ou combinar com metal e formar sulfetos metálicos.

A água subterrânea ou de superfície pode lixiviar os sulfatos e transportar seus sais para o oceano, onde o íon sulfato está acumulado numa concentração de 2.650 ppm.

As grandes incursões marinhas no continente, em período climático de aridez, sob condições restritivas, submetidas a intensa evaporação e conseqüentemente com o aumento da salinidade da salmoura, dão origem a sucessiva precipitação de carbonato, sulfatos, cloretos e brometos de cálcio, sódio, potássio e magnésio. Grande quantidade de sulfato de cálcio, gipsita, tem sido originada a partir de salmouras marinhas ao longo do tempo geológico (Borchert & Muir, 1964).



### 3.2.1.2. Ciclo Orgânico

O enxofre é um essencial constituinte de certas proteínas e gorduras necessárias as plantas e animais; as plantas utilizam o enxofre, como íon sulfato, dos solos, água subterrânea ou de água do mar. Os animais obtém seu enxofre através da água ou do consumo de plantas ou de outros animais. Depois da morte a decomposição dos seres vivos, o enxofre é liberado para a terra, para os solos ou compostos úmicos ou é expelido para a atmosfera; no mar, volta para a água.

O ciclo é balanceado nos oceanos, mas na terra, o enxofre é expelido parte para a atmosfera e parte vai para o mar através da lixiviação dos solos pelas águas superficiais.

As bactérias usam os compostos de enxofre no seu metabolismo; algumas bactérias reduzem sulfato, outras oxidam sulfetos tanto para sulfatos ou para o elemento enxofre e outras ainda oxidam o elemento enxofre (Davis, 1967). Em ambiente exposto ao ar o ciclo bacterial do enxofre tende a ser completo e balanceado, mas em ambiente anaeróbico a reação resulta somente na redução dos íons de sulfato.

A redução do sulfato é acompanhada largamente por uma espécie DESULFOVIBRIO desulfuricans, um anaeróbico encontrado em águas estagnadas, pântanos, águas profundas deficientes em oxigênio nos mares e oceanos e em água subterrânea, salmouras de campo de óleo e petróleo.

Desulfovibrio usam matéria orgânica sendo planta, madeira ou animal e hidrocarbonetos líquidos ou gasosos, como recurso de carbono e hidrogênio (fonte de energia); ao mesmo tempo elas usam íon sulfato para suprir o oxigênio e enxofre. Estas bactérias convertem então as águas sulfatadas para águas carbonatadas e o cálcio disponível pode dar origem a calcário. O gás sulfídrico que escapa para a atmosfera pode ser retido em profundidade

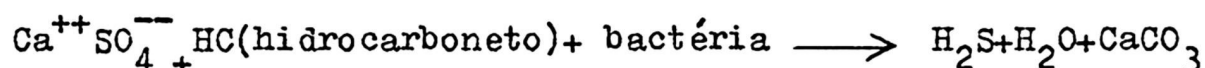
na rocha e reagir com íons adicionais de sulfato e produzir enxofre; combinar com matéria orgânica para formar moléculas de enxofre orgânico; ou combinar com íons metálicos para formar sulfetos metálicos.

As atividades de redução do sulfato pelas bactérias, são responsáveis provavelmente pela maior parte dos sulfetos metálicos nas rochas sedimentares de todas as idades. A maioria dos compostos de enxofre no petróleo, asfalto, kerogeno e carvão são provenientes destas atividades (Thode & Monstes, 1965).

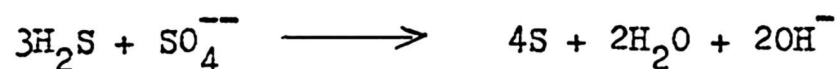
O gás sulfídrico biogênico tem formado alguns tipos de depósitos. Isto tem sugerido que a bactéria produz o gás sulfídrico que reduz o sal solúvel e precipita concentrações de enxofre. Onde estas bactérias dispõem de uma fonte de hidrocarbonetos e uma ampla seqüência de rochas anidriticas, elas formam massas de calcário biogênico impregnadas com elemento enxofre, constituindo o principal depósito de enxofre do mundo.

De acordo com Hinds & Cunningham (1970) um esquema simplificado do processamento da reação seria:

- reação de redução do sulfato:



- reação de oxidação de H<sub>2</sub>S:



### 3.3. Tipos de Depósitos de Enxofre

Os principais depósitos de enxofre são os seguintes:

#### 3.3.1. Depósitos associados a "cap-rock" dos domos de sal

Depósitos de enxofre nativo ou elementar estão associados ao "cap-rock" de anidrita de idade provavelmente cenozóica, nos

domos de sal na Costa do Golfo, tanto na parte terrestre, como na submersa, e são os responsáveis pela maior parte da produção de enxofre nativo dos Estados Unidos.

Estes depósitos variam de pequenos bolsões contendo várias toneladas à grandes acumulações com dezenas de milhões de toneladas de enxofre. O depósito do domo de Boling, o maior da Costa do Golfo, localizado numa área de 1.500 hectares tem uma produção acumulada de 70 milhões de toneladas.

Um "cap-rock" bem desenvolvido, compõe-se de uma camada inferior de anidrita granular; uma zona de transição (anidrita, gipsita e calcário) e uma zona superior de carbonato. É na zona de transição que se localizam os depósitos comerciais de enxofre.

Nem sempre, contudo, essas três zonas mostram-se distintas e facilmente identificáveis. Além do mais uma ou mais zonas podem estar ausentes, dependendo do estágio de formação em que a mesma se encontra, ou do grau de intensidade erosiva que porventura a mesma tenha sofrido.

Feely & Kulp (1957) estudando os depósitos de enxofre dos domos da Costa do Golfo concluíram que o processo de formação do enxofre é proveniente da redução do sulfato da anidrita por bactéria na presença de hidrocarbonetos, com a formação de carbonato de cálcio e gás sulfídrico, com a subsequente oxidação deste, liberando então o enxofre, que se deposita nos vazios da rocha calcária formada na primeira reação.

### 3.3.2. Depósitos associados a camadas de anidrita

Depósitos deste tipo ocorrem em seqüência de rochas de idade permiana no oeste do Texas, como também na Polônia, Rússia, Sicília, Nova Escócia e Iraque.

Segundo Bodenlos (1973), toda bacia evaporítica portadora de hidrocarbonetos, é altamente promissora para também conter de

pósitos de enxofre, formando depósitos do tipo estratiforme, a exemplo do que ocorre na Formação Castile na Bacia Delaware no oeste do Texas.

A Formação Castile é composta de anidrita, calcita bandeada com anidrita, halita e calcário, somando uma espessura máxima de aproximadamente 600 m.

A zona de calcita bandeada com anidrita, juntamente com os dois intervalos de halita compõem os 2/3 inferiores da formação ou, cerca de 400 m.

Em algumas áreas na Bacia de Delaware a anidrita bandeada inferior grada lateralmente para calcário laminado. O terço superior da formação, cerca de 200 m, consiste de anidrita maciça, intercalada com numerosas línguas de halita, que em determinadas direções chegam a coalescer com as halitas basais.

O enxofre na Formação Castile é encontrado em massas irregulares de calcário secundário, poroso e brechado, recoberto por anidrita maciça, argila ou siltito.

A gênese do enxofre neste tipo de depósito obedece ao mesmo processo apresentado por Feely & Kulp (1957), para os depósitos de enxofre nos "cap-rock" dos domos de sal da Costa do Golfo.

Segundo Hanna (1934), o ataque das bactérias nas anidritas produzindo lentes de calcário impregnadas com enxofre, obedece a dois estágios: no primeiro há a formação de calcário cinza de baixa porosidade; no segundo estágio forma-se calcário com alta porosidade, contendo grandes cristais de calcita bem cristalizada, em cujos interstícios deposita-se enxofre nativo.

### 3.3.3. Depósitos Vulcânicos

Estes depósitos são de menor importância do que os dois tipos acima mencionados, entretanto apresentam uma ampla distribuição. São conhecidos depósitos de enxofre deste tipo em quase to

das as regiões vulcânicas do mundo, principalmente no cinturão Circum-Pacífico.

Em virtude da obtenção do enxofre a partir de cinzas vulcânicas apresentar custo operacional muito elevado, só poucos depósitos deste tipo são explorados, como por exemplo no Japão e países Andinos. Depósitos de enxofre de fontes quentes são encontrados no oeste do Texas.

#### 3.3.4. Outros Tipos de Depósitos

Entre os depósitos de enxofre combinados os mais importantes são os dos sulfetos metálicos ("depósitos de pirita"), responsáveis por 28% da produção mundial no ano 1968. Os principais produtores foram Japão, Rússia, Espanha, China e Itália.

Uma crescente fonte de produção de enxofre são dos gases residuais de refinarias, que forneceram em 1970 cerca de 300 mil toneladas (Japão, Estados Unidos e Canadá).

Outras fontes potenciais de enxofre são: anidrita e gipsita, que podem ser tratadas para extrair-se enxofre de ácido sulfúrico; o enxofre contido no carvão, folhelhos e areias betuminosas podem fornecer o elemento enxofre, porém são pouco explorados; Mesmo a água do mar poderá se constituir uma fonte recuperável de enxofre no futuro.

#### 3.4. Condicionamento Geológico Favorável à Formação de Depósitos de Enxofre Nativo em Bacias Sedimentares

A origem dos depósitos de enxofre nativo, tipo estratiforme, em termos genéricos, baseia-se na teoria clássica da ação biogênica de bactérias redutoras de sulfato, conforme abordado nos itens 3.2.1.2 e 3.3.2.

Segundo Smith (1978) esta teoria requer a existência simultânea de 7 parâmetros fundamentais, necessários para um condicio-

namento geológico favorável à formação de depósitos de enxofre.

Estes parâmetros são os seguintes:

- Bacia Evaporítica com espessa seqüência de anidrita/gipsita.

É condição fundamental e necessária para uma ambiência geológica favorável à formação de depósitos de enxofre nativo estratiforme, que a bacia seja evaporítica e esteja presente uma espessa seqüência de anidrita/gipsita.

As bactérias "atacam" as camadas sulfatadas (anidrita/gipsita) com a conseqüente redução do sulfato, formando água e gás sulfídrico.

É necessário também que as camadas de gipsita/anidrita tenham uma espessura considerável para evitar que o gás sulfídrico que é altamente móvel tenda a escapar para outras zonas.

Outro ponto que se deve levar em consideração é que uma seqüência ampla de anidrita favorece uma variação faciológica-textural maior; as anidritas basais de textura granular ajudam a circulação de hidrocarbonetos e da água subterrânea; as anidritas superiores com textura maciça funcionam como "trap", impedindo a fuga do gás sulfídrico para outros horizontes.

- Bacia Petrolífera

É necessário que a bacia seja petrolífera, uma vez que as bactérias anaeróbicas usam, como fonte de energia, o carbono e o hidrogênio, presentes nos hidrocarbonetos, imprescindíveis ao seu metabolismo.

- Estruturas Favoráveis

Para que se processe a migração do petróleo, ou seja, dos hidrocarbonetos para as zonas sulfáticas (anidrita/

gipsita), a presença de estruturas favorecem esta migração, como por exemplo, estrutura dômica cortada por pequenas falhas adjacentes às estruturas de colapso.

- Permeabilidade na Camada de Sulfato

A presença de anidritas granulares basais favorecem a circulação de hidrocarbonetos e água subterrânea, substâncias necessárias ao processo de formação de enxofre nativo.

- Ausência de Sais Solúveis

A lixiviação dos sais solúveis concorre para aumentar a permeabilidade das zonas de anidrita/gipsita, como também acarreta o surgimento de estruturas de brecha e colapso, favorecendo a circulação dos hidrocarbonetos e de água subterrânea.

- Agente Capaz de Oxidar o Gás Sulfídrico

A reação que se segue a redução do sulfato pelas bactérias com a formação de carbonato, água e gás sulfídrico, é a oxidação deste gás sulfídrico, para então precipitar o enxofre nativo.

Estes agentes podem ser íons adicionais de sulfato presentes no meio anaeróbico, como também a água subterrânea; daí a importância desta última substância, no processo de formação de enxofre nativo estratiforme.

- Presença de Trapeamento

É necessário que haja um selamento na zona sulfatada, para evitar a fuga do gás sulfídrico; este fato é evidenciado pela presença, às vezes, de calcário "secundário" estéril em áreas próximas a jazimento de enxofre nativo.

Estes "traps" podem ser: anidritas maciças e cama

das de siltitos ou argilas.

### 3.5. Enxofre Nativo nas Bacias Sedimentares Brasileiras

Depósito de enxofre nativo em bacias evaporíticas/petrolíferas, no Brasil, só é conhecido até então na Bacia de Sergipe/Alagoas, na região de Castanhal, descoberto pela PETROMISA.

Geneticamente, Morelli et alii (1982) admitem uma origem bioepigenética para o enxofre nativo, através da ação de bactérias redutoras de sulfato de cálcio em presença de hidrocarbonetos. A hospedeira da mineralização é um calcário secundário da Formação Muribeca, resultante da transformação de anidrita/gipsita depositadas em ambiente evaporítico-lagunar durante o Cretáceo Inferior (Aptiano) (figs. 22 e 23).

O minério apresenta caracter lenticular, situando-se a uma profundidade média de 200 m, com espessura de 6,7 m aproximadamente e teores irregulares (médio de 7,1% e máximo de 53% de S).

A reserva indicada é de 3.624.797 toneladas de enxofre "in situ", distribuídas irregularmente por 3,7 km<sup>2</sup>.

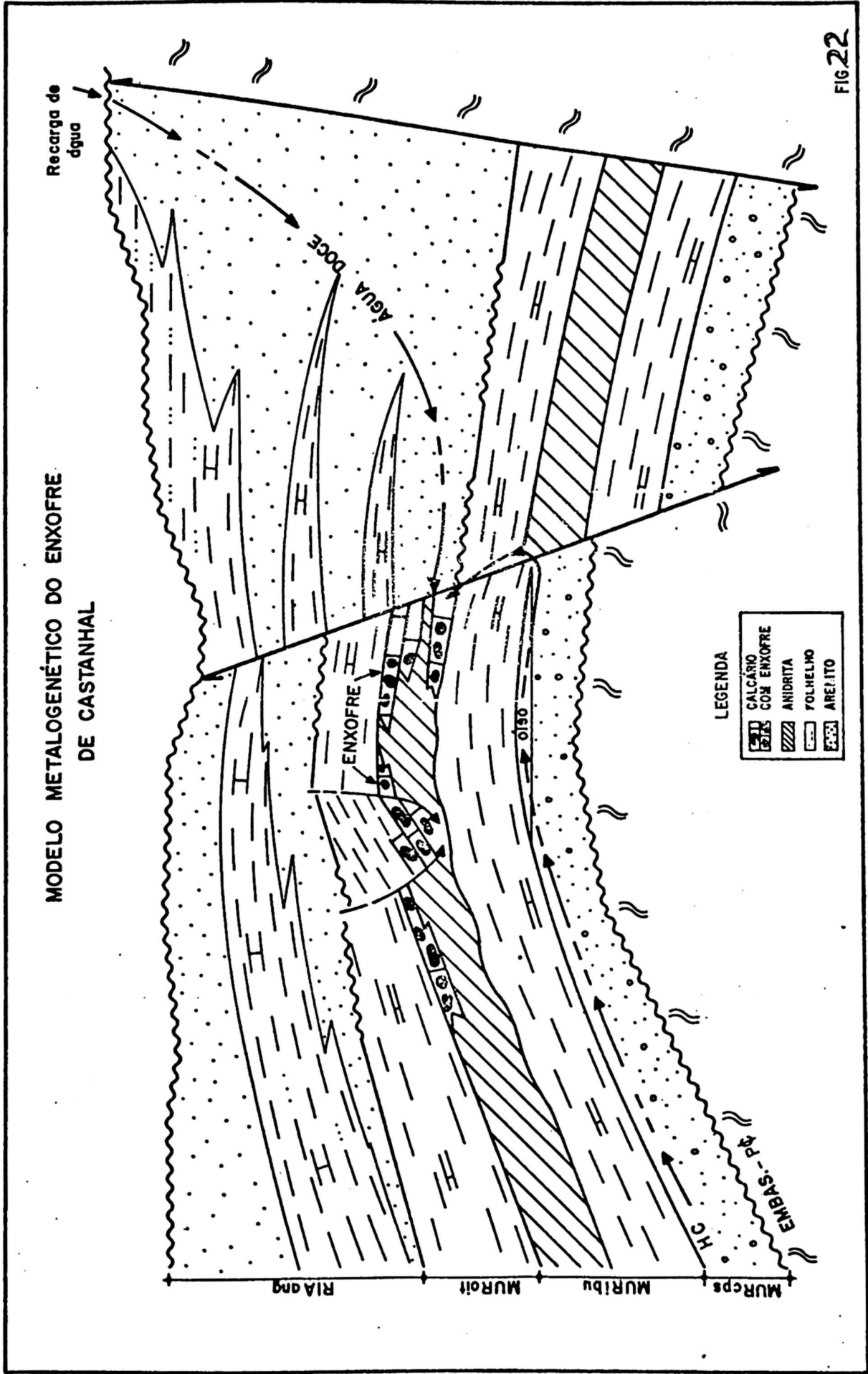
Estudos de viabilidades econômica estão em desenvolvimento.

Com a descoberta do depósito de enxofre nativo de Castanhal, a Bacia Sergipe/Alagoas constitui-se na única bacia sedimentar brasileira a conter este tipo de depósito comprovadamente.

Entretanto, as bacias evaporíticas/petrolíferas localizadas no setor leste-sudeste da margem continental brasileira, apresentam um condicionamento geológico altamente favorável a presença de enxofre, tanto na parte emersa como submersa.

Dentre estas bacias, merece destaque a de Espírito Santo, cuja geologia da Plataforma de São Mateus (Formação Barra Nova e Formação Mariricu) apresentam uma ambiência geológica altamente favorável a formação de depósitos de enxofre. As características geológicas destas formações são muito semelhantes as da Formação





Fonte: Morelli et alii, 1982

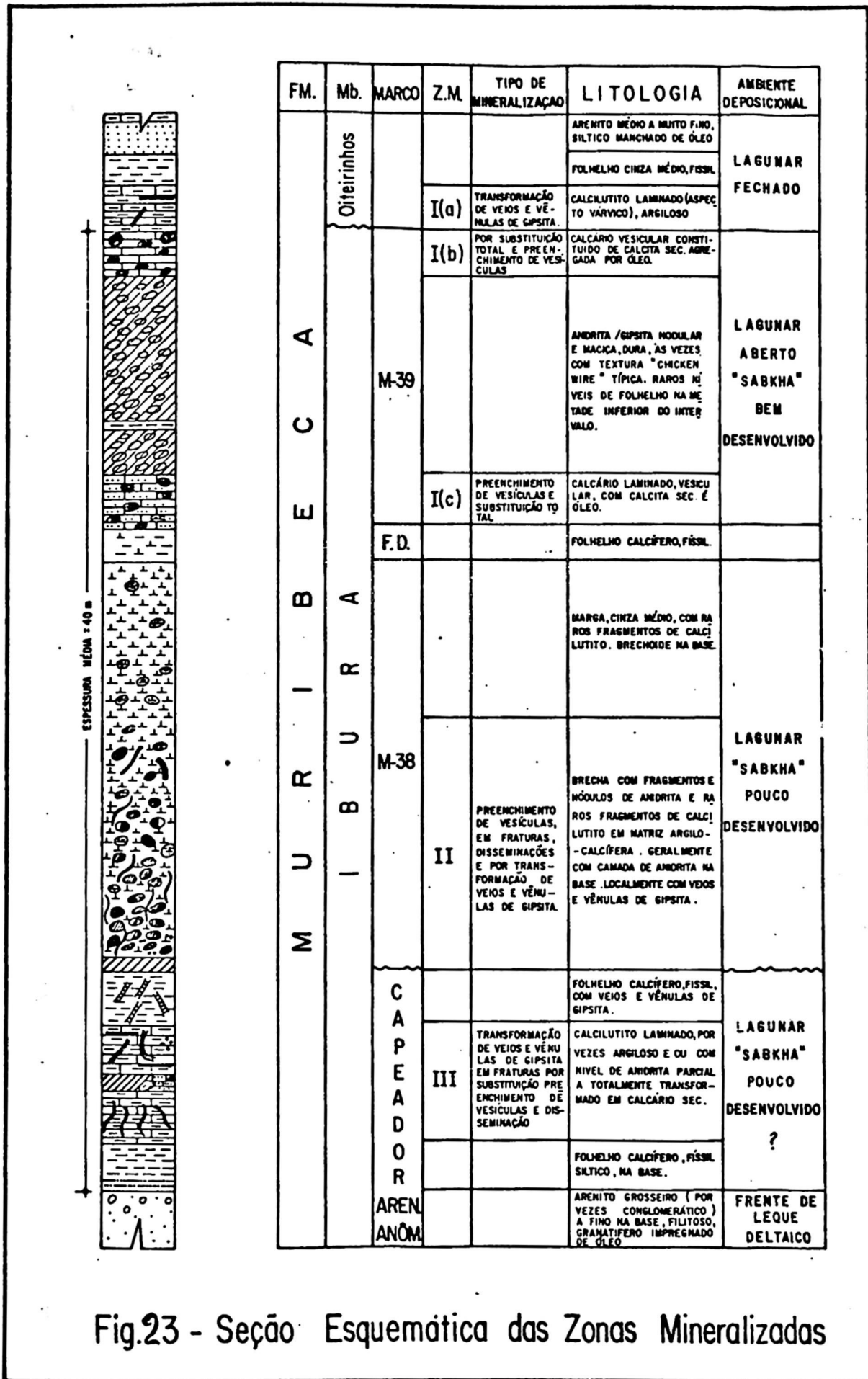


Fig.23 - Seção Esquemática das Zonas Mineralizadas

Muribeca, unidade que contém os depósitos de enxofre, da Bacia Sergipe/Alagoas.

Segundo Rocha, 1977 (In: CPRM/DIGEOM - Enxofre na Plataforma Continental; Notas e Comentários) a Plataforma Continental Brasileira constitui-se uma fonte de alto potencial para produção de enxofre, nos domos de sal descobertos pela Petrobrás na Plataforma de Espírito Santo e Sul da Bahia, a semelhança do que ocorre no Costa do Golfo, tanto na parte terrestre como submersa, nos Estados Unidos. Dois destes domos perfurados na Plataforma de Louisiana são responsáveis por mais de 20% da produção total de enxofre dos Estados Unidos.

Em Suszczynski, 1975, "Os Recursos Minerais e Potenciais do Brasil e sua Metalogênese", o enxofre elementar poderá ser encontrado nos grandes depósitos de gipsita da plataforma brasileira, como consequência da redução superimposta. Os esforços causados por falhamentos e dobramentos sobre as camadas de anidrita/gipsita, poderiam levar à recristalização desta e à sua redução, originando o enxofre nativo.

#### 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme discutidos nos itens 2.3 e 2.3.2, as bacias marginais brasileiras do setor sul-sudeste-leste, apresentam um desenvolvimento tectono-geológico diferente das bacias situadas no setor norte-equatorial (Asmus, 1982).

Decorre de tal inferência, uma implicação importante no desenvolvimento das seqüências deposicionais das bacias localizadas em setores diferentes.

No período Alagoas, no setor sul-sudeste-leste, o início da formação do assoalho oceânico (e em consequência, o limite crosta continental-crosta oceânica) e a instalação do proto-oceano-Atlântico Sul, na "Depressão Afro-Brasileira", favoreciam um

ambiente de condições extremas de restrição. Tal situação propiciou o desenvolvimento de uma "ampla bacia evaporítica", neste setor da margem continental, estendendo-a até a Bacia Sergipe/Alagoas, com o desenvolvimento de espessa seqüência evaporítica (fig. 17a).

Assim sendo, no Aptiano/Albiano, enquanto no setor sul-sudeste-leste da margem continental predominava uma sedimentação tipicamente evaporítica, na Bacia Potiguar, situada no setor equatorial, desenvolvia-se uma sedimentação transicional representada por um sistema deltáico com influência marinha (Membros Galinhos e Aracati). A seguir estabeleceu-se na bacia condições de oceano aberto, representadas pela sedimentação fluvial-deltáica da Formação Açu (área emersa), os ciclos regressivo-transgressivo das Formações Ponta do Mel e Ubarana (área submersa), seguindo-se a sedimentação responsável pela plataforma carbonática da Formação Jandaíra.

Este condicionamento tectono-geológico não assegura a Bacia Potiguar a classificação de bacia evaporítica de condições de proto-oceano com o desenvolvimento de ampla seqüência evaporítica atingindo até os termos mais solúveis.

O depósito de enxofre de Castanhal situado na Bacia Sergipe/Alagoas, pertence a Formação Muribeca, seqüência evaporítica com 300 m aproximadamente de espessura, desenvolvida sob condições extremas de restrição (proto-oceano Atlântico), em ambiente lagunar - "Sabkha" (fig. 23).

Na Bacia de Delaware, nos Estados Unidos, a Formação Castile, unidade evaporítica onde ocorrem as mineralizações de enxofre, tem uma espessura da ordem de 600 m.

Os únicos registros da presença de "evaporitos" na Bacia Potiguar são as intercalações de gipsita nos calcários Jandaíra, onde se desenvolvem os garimpos da região.

Segundo comunicação verbal (1982) dos geólogos da Petrobrás, Fortes, F.P. e Souza, S., conhecedores da geologia da bacia,

os leitos de gipsita onde se localizam as "minas" apresentam espessura inexpressiva, não sendo possível nem mesmo mecanizá-las, consituindo-se verdadeiros garimpos.

Morelli et alii (1982), estudando a mineralização gipsífera de Dix-Sept Rosado, RN, afirmam que a mineralização consiste: "lentes de gipsita inseridas no interior de uma sedimentação essencialmente carbonática e calcítica".

No perfil litotípico exposto pelos autores acima referidos, a gipsita apresenta uma espessura de 1,2 m.

A presença isolada desse tipo de sal nessa bacia deve-se a condições de restrição extremamente local, conforme ocorre também na plataforma do Ceará (Asmus, comunicação verbal, 1982).

Negada assim a condição de bacia evaporítica para a Bacia Potiguar, de acordo com os estudos realizados, e tomando-se por base os princípios de Smith (1978), discutidos no item 3.4., conclue-se que a Bacia Potiguar não apresenta um condicionamento geológico favorável a formação de depósitos de enxofre nativo.

Assim sendo, desaconselhamos os investimentos em pesquisa de enxofre nativo nas áreas do Projeto Aracati, CE-06/80 e CE-07/80, localizadas na Bacia Potiguar, na região da Fazenda Belém, Alto Caponga-Aracati, no Estado do Ceará.

Outrossim, informamos que a Petrobrás dispõe de dados de perfis elétricos Raio Gama, Densidade e Eletro indução dos poços 3-FZB-4-CE, 1-FLP-1-CE, 3-FZB-5-CE, e RG-1-CE, localizados na área da Fazenda Belém. A aquisição de tais dados pela CPRM é bastante aconselhável, por se tratar de importante subsídio para a compreensão mais acurada da estratigrafia e das possibilidades metalogenéticas negativas para enxofre, nas áreas requeridas por esta Companhia.

Finalizando, recomenda-se a CPRM concentrar seus esforços de pesquisa para enxofre nativo nas bacias marginais localizadas no setor sudeste-leste da margem continental, tanto na parte emer

sa como também na área submersa.

A demora na distribuição do presente relatório, deve-se ao fato que a maior parte das informações constante neste documento, não haviam sido ainda divulgadas pelos seus autores. Só recentemente, após a publicação das mesmas, fomos autorizados a fazer uso destas informações.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são expressos ao Sr. Superintendente de Recursos Minerais da CPRM, geólogo Judson da Cunha e Silva, pelo apoio e a oportunidade de realizar este trabalho. Aos geólogos Sérgio M. de Souza da Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRÁS e Jairo Mascarenhas da Rocha da Petrobrás Mineração S.A. - PETROMISA, pelas valiosas discussões sobre a geologia da Bacia Potiguar e a Metalogenia do Enxofre. Ao funcionário Almir Fraga, desta Divisão, pelo trabalho de datilografia.

Rio de Janeiro, 29 de novembro de 1982

Maria Glícia da Nóbrega Coutinho  
Chefe substituto da DIGOEM

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M.B. de; GOMES, J.B. & SOUZA, S.M. - 1978 - Bacia Potiguar - aspectos gerais e perspectivas petrolíferas.(OB-78.02) Rio de Janeiro, Offshore Brazil 78 Conference, June 27, 30 (ISBN 0-900-254-06-8).
- AL-SAWAF, F.D.S. - 1977 - Sulfate Reduction and Sulfur Deposition in the Lower Fars Formation, Northern Iraq. Economic Geology, V-72: U.S.A.
- ASMUS, H.E. & PORTO, R. - 1972 - Classificação das Bacias Sedimentares Brasileiras, segundo a Tectônica de Placas. Soc. Bras. Geologia; Anais XXVI Congr. Bras. Geologia; Belém, PA.
- ASMUS, H.E. - 1982 - Significado Geotectônico das Feições Estruturais das Bacias Marginais Brasileiras e Áreas Adjacentes. Soc. Bras. Geol. XXXII Congr. Bras. Geologia; Salvador, BA.
- BEURLLEN, K. - 1961 - Observações Paleontológicas no Cretáceo do Rio Grande do Norte e Ceará com descrição de Amonoides. Mossoro (S.ed.); Coleção Mossoroense, nº 52.
- BEURLLEN, K. - 1966 - Geologia da Região de Mossoró. Mossoró, RN.
- BEURLLEN, G. - 1982 - Bioestratigrafia e Geostória da Seção Marinha da Margem Continental Brasileira; Bol. Téc. PETROBRÁS, 25 (2):77-83. Rio de Janeiro, RJ.
- BODENLOS, A.J. - 1973 - "Sulfur", U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 820; IN: UNITED STATES MINERAL RESOURCES.
- CASTRO, J.C.; BARROCAS, S.L.S. & LIMA, H.P. - 1981 - Facies, diagênese e modelos de acumulação da Formação Açú, parte emersa da Bacia Potiguar. PETROBRÁS, CENPES. Relatório Interno.

- CASTRO, J.C.; BARROCAS, S.L.S. & LIMA, H.P. - 1982 - A Sedimentação da Formação Açu, Cretáceo Médio da Bacia Potiguar, e um Análogo Recente: o Estuário do Rio Açu na Região de Macau, RN. Soc. Bras. Geol.: Anais XXXII Congr. Bras. Geol. Salvador, BA.
- C.P.R.M. - 1976 - Anteprojeto Enxofre na Bacia Evaporítica de Sergipe; DEGEO/DIGEOM. Rio de Janeiro, RJ.
- C.P.R.M. - 1977 - Enxofre na Plataforma Continental - Notas e Comentários; DEGEO/DIGEOM. Rio de Janeiro, RJ.
- CYPRIANO, J.L. & NUNES, A.B. - 1968 - Geologia da Bacia Potiguar. PETROBRÁS, DEXPRO. Relatório Interno.
- DINIZ, R.F. & SRIVASTAVA, N.K. - 1981 - Estudos Microfaciológicos e Ambientais da Formação Jandaíra na região de Gov. DIXSEPT Rosado (RN). Soc. Bras. Geologia. X Simpósio de Geologia do Nordeste; Recife, 1981.
- ESTRELLA, G.O. - 1972 - O Estágio "Rift" nas Bacias Marginais do Leste Brasileiro. Soc. Bras. Geol.; Anais XVI Congr. Brasileiro de Geologia; V. 3.
- FEELY, W.H. & KUIP, J.L. - 1957 - Origin of Gulf Coast Salt - Dome Sulphur Deposits. Bol. of AAPG; V-41; Nº 8; U.S.A.
- FISHER, W.L.; ESTRELLA, G. & GOMES, J.B. - 1975 - Depositional Systems of Santonian to Miocene Formations in the Potiguar Basin: their relationship to oil and gas exploration. PETROBRÁS; DEXPRO, DIVEX. Relatório Interno.
- FORTES, F.P. - 1982 - Utilização Combinada da Fotogeologia com a Magnetometria, Gravimetria e Sísmica, na Prospecção de Petróleo na Bacia Potiguar. Soc. Bras. Geol.: Anais XXXII Congr. Bras. Geologia; Salvador, BA.



- GOMES, R.A.A.D. & MOTTA, A.C. - 1982 - Compartimentação Tectônica da Bacia Potiguar Interpretada a partir de Mapa Bouguer. Soc. Bras. Geologia: Anais XXXII Congr. Bras. Geologia; Set./Salvador, BA.
- HINDS, J.S. & CUNNINGHAM, R.R. - 1970 - Elemental Sulfur in Eddy County, New Mexico; Publishing by U.S. Government Printing Office.
- KEGEL, W. - 1957 - Contribuição ao Estudo da Bacia Costeira do Rio Grande do Norte; Bol. DNPM/DGM Nº 170. DNPM; Rio de Janeiro - RJ.
- KREIDLER, W. - 1949 - Final Geological report on the Sedimentary Coastal Belt of the States of Rio Grande do Norte and that part at the State of Ceará South and East of Fortaleza. PETROBRÁS, DEPEX; DIVEX. Relatório Interno Nº 105. Rio de Janeiro, RJ.
- KREIDLER, W. - 1949 - Mapas de Reconhecimento Geológico da Área Sedimentar Costeira do Rio Grande do Norte e Ceará. Conselho Nacional do Petróleo; Arquivo B, GD-82-87 V; Rio de Janeiro, RJ.
- LEHNER, P. - 1969 - Salt Tectonics and Pleistocene Stratigraphy on Continental Slope of Northern Gulf of Mexico, Bol. of AAPG, V-53 Nº 12: Houston, Tx. U.S.A.
- MAYER, E. - 1974 - Estratigrafia Preliminar da Plataforma Continental da Bacia Potiguar. PETROBRÁS. Relatório Interno.
- MIURA, K. & BARBOSA, J.C. - 1972 - Geologia da Plataforma Continental do Maranhão, Piauí, Ceará, e Rio Grande do Norte. Soc. Bras. Geologia: Anais XXVI Congr. Bras. Geologia.

- MONTEIRO, N. & MENOR, E. - 1981 - Considerações sobre a Mineralização Gipsífera de DIXSEPT - Rosado, Rio Grande do Norte. Soc. Bras. Geol. - X Simpósio de Geologia do Nordeste; Recife, 1981.
- MORELLI, B.; BARRETO, L.A.; FROTA, G.B.; PALHANO, S.G. & ANDRADE, E.S. - 1982 - Castanhal - O Primeiro Depósito Brasileiro de Enxofre Nativo. Soc. Bras. Geol.: Anais XXXII Congr. Bras. de Geologia.; Salvador, BA.
- OLIVEIRA, L.D.D.; OLIVEIRA, M.I.M. & DAMACENO, J.M. - 1981 - Estudo Petrográfico e Paleontológico de Travertinos na região de Jandaíra - RN. - Soc. Bras. Geologia - X Simpósio de Geologia do Nordeste, Recife, 1981.
- OJEDA, H.A.O. & SANTO, E.R. - 1982 - Bacia Potiguar emersa: Geologia Regional com Integração de Dados Exploratórios (em preparação). PETROBRÁS, DEPEX, DIVIB. Relatório Interno.
- REGALI, M.S.P. & GONZAGA, S.M. - 1982 - Palinocronoestratigrafia da Bacia Potiguar. PETROBRÁS, CENPES, DIVEX, SEPALE. Relatório Interno.
- SAMPAIO, A.Y. & SCHALLER, H. - 1967 - Introdução a Estratigrafia Cretácea da Bacia Potiguar. PETROBRÁS, DIREX/RPNE, 508.
- SMITH, A.R. - 1978 - Sulfur Deposits in Ochoan Rock of Southeast New Mexico and West Texas. New Mexico. Bureau Mines & Mineral Resources. Circular 159.
- SOUZA, S.M. - 1982 - Atualização da Lito-estratigrafia da Bacia Potiguar. Soc. Bras. Geol.: Anais XXXII Congr. Bras. Geol.
- TIBANA, P. & TERRA, G.J.S. - 1981 - Sequências Carbonáticas do Cretáceo na Bacia Potiguar. Bol. Téc. PETROBRÁS, 24(3): 174 - 183.