

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA DE
RESERVATÓRIOS

Carlos Moreira Soares

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA E GEOESTATÍSTICA DE
RESERVATÓRIOS DELTAICOS DA BACIA DO
RECÔNCAVO (BA)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como
requisito parcial para obtenção do título de Mestre em
Geoengenharia de Reservatórios.

Orientador: Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn - PETROBRÁS

CAMPINAS - SÃO PAULO

Este exemplar corresponde ⁷⁵ a
redação final da tese defendida
por Carlos Moreira Soares
e aprovada pela Comissão Julgadora
em 02.07.97

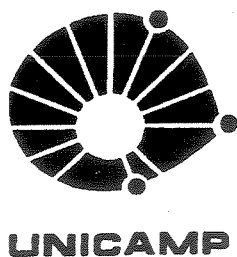
Carlos H. Bruhn

ORIENTADOR

Julho - 1997

So11a

31494/BC



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA DE
RESERVATÓRIOS

Carlos Moreira Soares

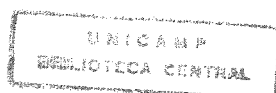
**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA E GEOESTATÍSTICA DE
RESERVATÓRIOS DELTAICOS DA BACIA DO
RECÔNCAVO (BA)**

Orientador: Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn[†] - PETROBRÁS

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geoengenharia de Reservatórios.

CAMPINAS - SÃO PAULO

Julho - 1997



UNIDADE	13C
N.º CHAMADA:	111a
V.	Ex.
TUMBO BC/	31494
PROC.	281197
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/03/97
CPD	

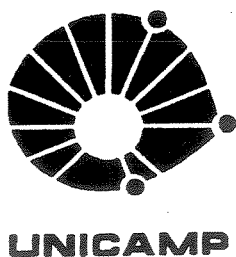
CM-00099926-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA
PELA BIBLIOTECA I.G - UNICAMP

Solla Soares, Carlos Moreira
Análise estratigráfica e geoestatística de reservatórios
deltaicos da Bacia do Recôncavo (BA) / Carlos Moreira
Soares.- Campinas,SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Carlos Henrique Lima Bruhn
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de
Campinas, Instituto de Geociências.

1- Reservatórios - Bahia. 2. Geologia Estratigrafia.
3. Geoestatística. I. Bruhn, Carlos Henrique Lima.
II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Geociências. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

AUTOR: Carlos Moreira Soares

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA E
GEOESTATÍSTICA DE RESERVATÓRIOS DELTAICOS DA BACIA
DO RECÔNCAVO (BA)

ORIENTADOR: Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn

Aprovada em: 02/07/97

PRESIDENTE: Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn

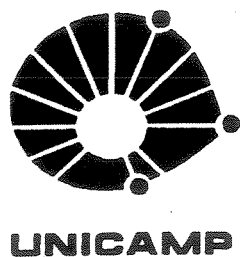
EXAMINADORES:

Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn - Orientador

Prof. Dr. CHANG HUNG KIANG

Prof. Dr. ARMANDO ZAUPA REMACRE

Campinas, 02 de julho de 1997.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA DE
RESERVATÓRIOS

DEDICATÓRIA

Para minha mãe Maria Clélia e meu pai Celso (*in memorian*), pela presença constante, carinho e confiança que sempre depositaram em mim.

Para meus irmãos, cunhada e sobrinhos, pelo apoio e momentos agradáveis que me proporcionam.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA DE
RESERVATÓRIOS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador Carlos Henrique Lima Bruhn, pelo grande entusiasmo com que direcionou o trabalho, demonstrando em todas as situações um equilíbrio perfeito entre profissionalismo e cordialidade.

Encontram-se entre os principais colaboradores, o geólogo Milton José de Souza (Petrobrás) e o professor Armando Zaupa Remacre (Unicamp) pela definição da linha de pesquisa e pelas valiosas sugestões; a geóloga Marcella Maria de Melo Cortez, colega e amiga, que além das incontáveis dicas, sempre acreditou no sucesso desse estudo; além do técnico de geofísica e amigo Jorge Campos, peça fundamental na realização do presente trabalho.

Ao corpo técnico do distrito da Petrobrás em Salvador pelo enorme apoio e carinho dispensados a mim durante todo o período de elaboração dessa pesquisa, aos geólogos Sérgio Luís, Ferradans, Reginaldo, Magalhães, Sarnelli, Argemiro, Glória, Cristóvão; aos engenheiros e técnicos ligados à área de estudo, Freire, Nazar, Magnólia, etc...(desculpem se esqueci alguém); enfim, o meu muito obrigado.

Ao grupo da Unicamp pelo apoio, professores Ivan e Antônio Cláudio, engenheiro Moacir Cornetti, Creuza, Wellington; aos funcionários do CEPETRO pela boa vontade e às bibliotecárias do IG pela atenção.

Aos colegas de turma Borba, Jonas, Paulo, Poletto, Glauber, Alexandre e Garcia, pela grandiosa colaboração e pelo clima amigável de convivência.

Aos colegas da GEREV e GECAR pelo apoio, à turma do DESENHO.

À Petrobrás pela confiança em mim depositada.

Aos grandes amigos que eu fiz em Campinas, Márcia, Paula, Eduardo, Sheila, João Mauro,...

Aos meus pais, sempre presentes.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA DE
RESERVATÓRIOS

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA E GEOESTATÍSTICA DE RESERVATÓRIOS
DELTAICOS DA BACIA DO RECÔNCAVO (BA)

Dissertação de Mestrado

Carlos Moreira Soares

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar a geometria externa de reservatórios deltaicos, incluindo uma análise da distribuição areal dos arenitos através de técnicas geoestatísticas, com ênfase na variografia e krigagem.

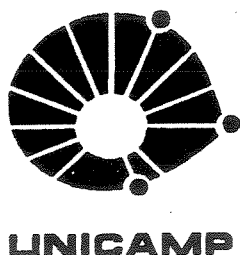
Foi elaborado um estudo estratigráfico de alta resolução em área de 25 km², utilizando informações de 276 poços de um importante campo produtor de petróleo na Bacia do Recôncavo (nordeste do Brasil).

O intervalo pesquisado registra o progressivo afogamento de um delta por um lago. A interpretação dos testemunhos e seções estratigráficas identificou os principais reservatórios como conjuntos de lobos de frente deltaica amalgamados e, secundariamente, depósitos originados pelo rompimento dos diques marginais de canais distributários.

A análise variográfica detalhada da variável espessura de arenito, realizada para cada unidade estratigráfica ou zona mapeada, revelou alguns elementos geométricos importantes. A partir da feição informalmente denominada de efeito “buraco”, quantificou-se a largura média do conjunto de lobos deltaicos (segundo seu eixo transversal) de uma das zonas. O mesmo não foi possível nas demais devido a amalgamação lateral desses corpos, refletidos pelos vários *imbricamentos* presentes.

O confronto dos mapas krigados de espessura de arenito das principais zonas sugere que a direção preferencial de deposição do sistema é NNW/SSE, bem como ilustra os arranjos de compensação e amalgamação dos lobos deltaicos.

Em análises estratigráficas de detalhe, é de grande importância a observação do intervalo de estudo no contexto geológico regional em que o mesmo se insere, objetivando o estabelecimento de relações genéticas com os ambientes deposicionais contíguos. Da mesma forma numa abordagem geoestatística, é recomendável um prévio reconhecimento dos processos geológicos que atuaram na área de estudo, das dimensões desta área, do tipo e o que representa a variável em tratamento e, principalmente, das escalas de variabilidade presentes em função da geometria externa dos corpos rochosos.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA DE
RESERVATÓRIOS

GEOSTATISTICAL AND STRATIGRAPHIC ANALYSIS OF DELTAIC
RESERVOIRS FROM THE RECÔNCAVO BASIN, BRAZIL

Master Dissertation

Carlos Moreira Soares

ABSTRACT

This study presents the characterization of the external geometry of deltaic oil reservoirs, including the description of their areal distribution using geostatistic tools, such as variography and kriging.

A high-resolution stratigraphic study was developed over a 25 km² area, by using data from 276 closely-spaced wells of an oil-producer field from the Recôncavo Basin, northeastern Brazil.

The studied succession records the progressive lacustrine transgression of a deltaic environment. Core data and stratigraphic cross sections suggest that the oil reservoirs are mostly amalgamated, delta-front lobes, and subordinately, crevasse deposits.

Some important geometrical elements were recognized by the detailed variographic analysis developed for each stratigraphic unit (zone). The average width for the groups of deltaic lobes of one zone was measured from the variographic feature informally named as *hole* effect. This procedure was not possible for the other zones due to the intense lateral amalgamation of sandstones, indicated by many variographic *nested structures*.

Net sand krigged maps for the main zones suggest a NNW-SSE orientation for the deltaic lobes, as also their common amalgamation and compensation arrangements.

High-resolution stratigraphic analyses should include a more regional characterization of the depositional system that comprises the studied succession. On the other hand, geostatistical studies should be developed only after the recognition of (1) the depositional processes acting in the study area, and (2) the geological meaning of the variable to be treated, including its spatial variability scales as a function of sandbody thickness, orientation and amalgamation.

Sumário

	pág.
1) INTRODUÇÃO	1
1.1 - GENERALIDADES	1
1.2 - OBJETIVOS	2
1.3 - METODOLOGIA DE TRABALHO	3
2) GEOLOGIA DA BACIA DO RECÔNCAVO	5
2.1 - TRABALHOS ANTERIORES	5
2.2 - GEOLOGIA ESTRUTURAL E LITOESTRATIGRAFIA	7
3) AMBIENTE DELTAICO DE SEDIMENTAÇÃO	12
3.1 - INTRODUÇÃO	12
3.2 - HISTÓRICO	12
3.3 - PROCESSOS ATUANTES NA FORMAÇÃO DE DELTAS	13
3.4 - CLASSIFICAÇÃO DE DELTAS	16
3.5 - SUBAMBIENTES DO COMPLEXO DELTAICO	20
3.6 - GEOMETRIA TÍPICA DOS DEPÓSITOS	22
3.7 - SUCESSÕES DE FÁCIES DO SISTEMA DEPOSICIONAL DELTAICO	24
3.8 - CONCEITOS DE ESTRATIGRAFIA MODERNA APLICADOS A SISTEMAS DELTAICOS	25
4) ESTRATIGRAFIA DE ALTA RESOLUÇÃO	28
4.1 - GENERALIDADES	28
4.2 - TRATAMENTO DOS DADOS	30
4.3 - ANÁLISE DOS TESTEMUNHOS	34
4.4 - SEÇÕES ESTRATIGRÁFICAS	41

	pág.
4.5 - SISTEMA DEPOSICIONAL	46
4.6 - GEOMETRIA E HETEROGENEIDADES DE RESERVATÓRIO	50
5) ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	60
5.1 - INTRODUÇÃO	60
5.2 - OBJETIVOS	60
5.3 - ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS	61
5.4 - ANÁLISE ESTRUTURAL	66
5.4.1) <i>VARIOGRAFIA</i>	66
5.4.2) <i>ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS</i>	71
5.4.3) <i>VARIOGRAFIA EXPERIMENTAL</i>	75
5.4.4) <i>MODELAGEM DOS VARIOGRAMAS</i>	87
5.5 - PESQUISA DE VIZINHANÇA	96
5.6 - VALIDAÇÃO CRUZADA	98
5.7 - KRIGAGEM	102
5.8 - RESULTADOS	106
6) CONCLUSÕES	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

Lista de Figuras

	pág.
2.1 Carta litoestratigráfica da Bacia do Recôncavo	6
2.2 Mapa de localização da Bacia do Recôncavo e da área de estudo	7
3.1 Processos atuantes entre o fluxo do canal distributário e a bacia receptora na frente deltaica	14
3.2 Seção esquemática de um delta tipo “Gilbert”	15
3.3 Diagrama ternário dos tipos de deltas, baseado no processo atuante na frente deltaica	17
3.4 Diagrama simplificado dos principais subambientes do sistema deltaico	21
3.5 Geometria esperada para os lobos de deltas dominados por rios	23
4.1 Mapa de localização dos poços e seções estratigráficas	29
4.2 Seções estratigráficas A-A’ e D-D’	32
4.3 Seções estratigráficas B-B’ e C-C’	33
4.4 Testemunhos da fácies 1	35
4.5 Testemunhos da fácies 2, 3, 4 e 5	37
4.6 Testemunhos da fácies 6, 7 e 8	39 e 40
4.7 Intervalo de estudo (sub-ciclo) inserido num ciclo estratigráfico de transgressão do lago	42
4.8 (S1) Mapa base com valores proporcionais de espessura	55
4.9 (S2) Mapa base com valores proporcionais de espessura	55
4.10 (S3) Mapa base com valores proporcionais de espessura	56

	pág.
4.11 (S4) Mapa base com valores proporcionais de espessura	56
4.12 (S5) Mapa base com valores proporcionais de espessura	57
4.13 (S6) Mapa base com valores proporcionais de espessura	57
5.1 Histogramas de frequência da variável espessura para as diferentes zonas mapeadas	63
5.2 Modelos teóricos mais adotados de variogramas	68
5.3 Modelo teórico de variograma senoidal	69
5.4 Principais parâmetros adotados numa pesquisa variográfica	73
5.5 Variogramas experimentais da zona S2	76
5.6 Variogramas experimentais da zona S3	78
5.7 Variogramas experimentais da zona S4	80
5.8 Variogramas experimentais da zona S5	82
5.9 Diagramas em rosa dos alcances obtidos na pesquisa variográfica	85
5.10 Modelo variográfico da zona S2	90
5.11 Modelo variográfico da zona S3	92
5.12 Modelo variográfico da zona S4	94
5.13 Modelo variográfico da zona S5	95
5.14 (S2) Validação cruzada	99
5.15 (S3) Validação cruzada	99
5.16 (S4) Validação cruzada	100
5.17 (S5) Validação cruzada	100
5.18 (S2) Mapa krigado de espessura	104
5.19 (S3) Mapa krigado de espessura	104
5.20 (S4) Mapa krigado de espessura	105
5.21 (S5) Mapa krigado de espessura	105

Lista de Tabelas

	pág.
5.1 Estatística básica das amostras	62
5.2 Valores dos alcances obtidos pelos variogramas experimentais (segundo valores fixos de variabilidade arbitrados individualmente para cada zona)	84
5.3 Direções preferenciais do fenômeno geológico em estudo (espessura de arenito)	86
5.4 Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S2	89
5.5 Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S3	91
5.6 Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S4	93
5.7 Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S5	95

1) INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

A Bacia do Recôncavo é uma das mais bem estudadas geologicamente devido ao seu pioneirismo na exploração de petróleo no Brasil. Por esse motivo, as pesquisas desenvolvidas nos seus reservatórios contam com uma infinidade de dados e informações que foram obtidos durante vários anos.

Devido a continuada produção de petróleo nesse período, seus campos detêm hoje reservas relativamente reduzidas. Consequentemente os profissionais de geoengenharia e demais áreas afins como a sísmica, geoestatística, geoquímica, entre outras, têm trabalhado exaustivamente e de maneira integrada para buscar técnicas cada vez mais sofisticadas, numa tentativa de aumentar o fator de recuperação de hidrocarbonetos dessas jazidas, bem como de descobrir novas acumulações.

A indústria petrolífera mundial encontra-se dentro de um cenário não muito favorável, com as jazidas ainda não descobertas apresentando um crescente grau de complexidade, num período com pouca disponibilidade de recursos. Por isso, existe uma tendência das companhias de petróleo em promover um **sinergismo** entre as disciplinas e profissionais de diversas áreas, para que a soma dos esforços alcance resultados mais lucrativos, valendo-se da tecnologia atual de prospecção e lavra.

O conhecimento dos processos atuantes e depósitos gerados nos ambientes geológicos de sedimentação tem evoluído muito ultimamente. As incessantes pesquisas realizadas em ambientes atualmente em formação, revelam uma grande analogia com aqueles similares do passado, em particular aos sistemas deltaicos (Bhattacharya & Walker, 1992). Nesse contexto, existe uma necessidade crescente de se explorar os limites de resolução das ferramentas em uso, além de se testar aquelas recentemente introduzidas na indústria petrolífera, com o intuito de se modelar os fenômenos geológicos da maneira mais adequada possível. No caso estudado, antecedendo a aplicação da ferramenta de modelagem, precisamos ter uma ampla visão da distribuição física dos reservatórios e dos principais

fatores controladores da dinâmica dos fluidos que os percolam.

1.2 - OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principais objetivos, a **caracterização da geometria externa e alguns elementos de arquitetura da geometria interna de reservatórios deltaicos da Bacia do Recôncavo**, englobando um estudo **estratigráfico de alta resolução**, e uma posterior análise dos padrões de **comportamento e distribuição areal desses corpos através das técnicas quantitativas empregadas pela geoestatística**. O estudo não se propõe a testar uma metodologia nova, mas sim a buscar relações entre alguns elementos geológicos básicos, como dimensões de corpos arenosos e a distribuição espacial deles, com os parâmetros usados numa abordagem geoestatística e os respectivos produtos gerados, principalmente pela **análise variográfica** e também pela **krigagem**.

Numa visão técnica, o trabalho pode ser considerado de amplo interesse para a geoengenharia de reservatórios, pois foi elaborado um estudo estratigráfico a nível de detalhe, de um importante reservatório deltaico da Bacia do Recôncavo (Formação Pojuca), utilizando uma densa malha de poços e com muitas informações extraídas de testemunhos; para em seguida serem aplicadas as técnicas de variografia e krigagem que vêm se aprimorando dia a dia. Além disso, os resultados obtidos poderão auxiliar no aperfeiçoamento do projeto de injeção de água que está sendo realizado no campo estudado, objetivando uma maior recuperação de petróleo.

É oportuno lembrar que a condução da presente pesquisa foi dirigida principalmente para a caracterização da fração reservatório dos arenitos deltaicos, e posterior análise do comportamento variográfico da variável **espessura**, visando obter elementos geométricos desses corpos. Alguns procedimentos como a pesquisa e identificação dos subambientes do sistema deltaico, a utilização da técnica de krigagem para se obter os mapas de espessura dos reservatórios, além de outros, foram de importância crucial para os resultados obtidos, funcionando contudo como ferramentas auxiliares na maior parte do tempo. Caso algum outro tipo de projeto específico seja desenvolvido na área, e que esteja englobando

assuntos que necessitem objetivamente dessas informações, os procedimentos e técnicas de abordagem devem ser adequados às novas metas.

1.3 - METODOLOGIA DE TRABALHO

O trabalho pode ser dividido em duas etapas principais:

- Caracterização estratigráfica de alta resolução de arenitos deltaicos;
- Estudo dos padrões de distribuição e comportamento desses reservatórios através de técnicas geoestatísticas, com ênfase na **variografia** e também na **krigagem**.

A primeira etapa foi iniciada com a elaboração de um levantamento da bibliografia existente sobre a geologia da Bacia do Recôncavo, o nível estratigráfico em estudo, bem como sobre a sedimentação nos subambientes do sistema deltaico.

Após a descrição dos testemunhos de 15 poços (num total de 540m), elaborou-se uma correlação rocha x perfil basicamente através dos perfis de potencial espontâneo, raios gama e resistividade, sendo enfatizada a identificação de litofácies, para posterior definição das frações reservatório e não reservatório.

Os trabalhos de caracterização estratigráfica prosseguiram com a confecção de 19 seções estratigráficas de alta resolução (escalas horizontal de 1:1000 e vertical de 1:500). Com as seções concluídas, foram marcados os corpos arenosos identificados nos perfis dos 276 poços através de correlação, seguindo-se alguns critérios na definição do zoneamento.

A partir da individualização de 6 zonas, foi elaborado um arquivo de dados com os valores de isólitais de arenito em cada um dos poços da área.

Para a execução da segunda etapa desse trabalho, utilizou-se um programa geoestatístico denominado ISATIS (ISATIS, 1994). No estágio de carregamento dos dados, foram retirados 5 poços do arquivo para que fosse feita uma validação do método utilizado, a partir dos mapas obtidos.

Em seguida, foi desenvolvida uma análise da estatística básica das amostras.

Na fase da análise estrutural, elaborou-se primeiramente uma pesquisa detalhada da sensibilidade dos parâmetros que seriam usados na confecção dos

variogramas experimentais, devido a importância de uma elaboração criteriosa desses variogramas para que os objetivos pretendidos fossem alcançados.

A análise estrutural propriamente dita também foi feita a nível de detalhe, e individualmente para as principais zonas. As direções dos variogramas experimentais foram separadas com ângulos de apenas 10° , no intuito de que as direções de anisotropia dos arenitos deltaicos ficassem bem evidenciadas.

A fase que se seguiu foi a modelagem dos variogramas nas direções ortogonais de maior e menor direção de continuidade do fenômeno geológico em evidência, também individualizada só nas zonas principais. Em seguida, foram carregados os parâmetros de vizinhança ideais obtidos na pesquisa realizada, no mesmo arquivo contendo os modelos variográficos.

Foi feita uma validação cruzada para verificação do funcionamento do método e dos parâmetros utilizados, e depois uma krigagem a partir do espaço amostral existente, usando o método da krigagem ordinária.

No final do trabalho foram integrados os resultados das duas etapas, confrontando-se os elementos obtidos pela estratigrafia de alta resolução com as tendências reveladas através da análise geoestatística.

2) GEOLOGIA DA BACIA DO RECÔNCAVO

2.1 - TRABALHOS ANTERIORES

Os trabalhos de prospecção petrolífera na Bacia do Recôncavo foram iniciados em 1937. Depois da realização de diversos programas de cunho exploratório ao longo dos anos seguintes, foram descobertas dezenas de acumulações de hidrocarbonetos.

Em meados de 1970, os estudos desenvolvidos na área reconheciam o pacote sedimentar cretácico presente como depositado em ambiente deltaico-lacustrino, alguns deles mencionando a influência de um sistema de leque aluvial proveniente de leste.

Alguns trabalhos geológicos mais específicos enfocando o Grupo Ilhas (em particular a Formação Pojuca) foram elaborados, onde pode-se destacar o de Horschutz (1972). Mais tarde, certos estudiosos adotaram a idéia dos reservatórios arenosos desse grupo terem sido originados por correntes de turbidez (Medeiros & Ponte, 1981).

A primeira carta estratigráfica das Bacias do Recôncavo e Tucano foi publicada por Viana *et al.* (1971), passando em seguida por várias adaptações, sendo a última feita por Caixeta *et al.* (1994) (fig. 2.1).

Um trabalho importante foi desenvolvido por Gaglianone *et al.* (1985), apontando os folhelhos e calcilitos da Formação Candeias como detentores do maior potencial gerador de hidrocarbonetos da bacia.

O modelo de evolução tectônica das Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, foi publicado por Milani (1984).

Dentre os inúmeros trabalhos realizados, não só com o objetivo de contribuir para o conhecimento da estratigrafia e evolução tectônica da bacia, mas com o intuito de serem estabelecidos critérios para campanhas exploratórias e desenvolvimento dos campos já descobertos, pode-se destacar os de Netto *et al.* (1984), Santos *et al.* (1990) e Figueiredo *et al.* (1994).

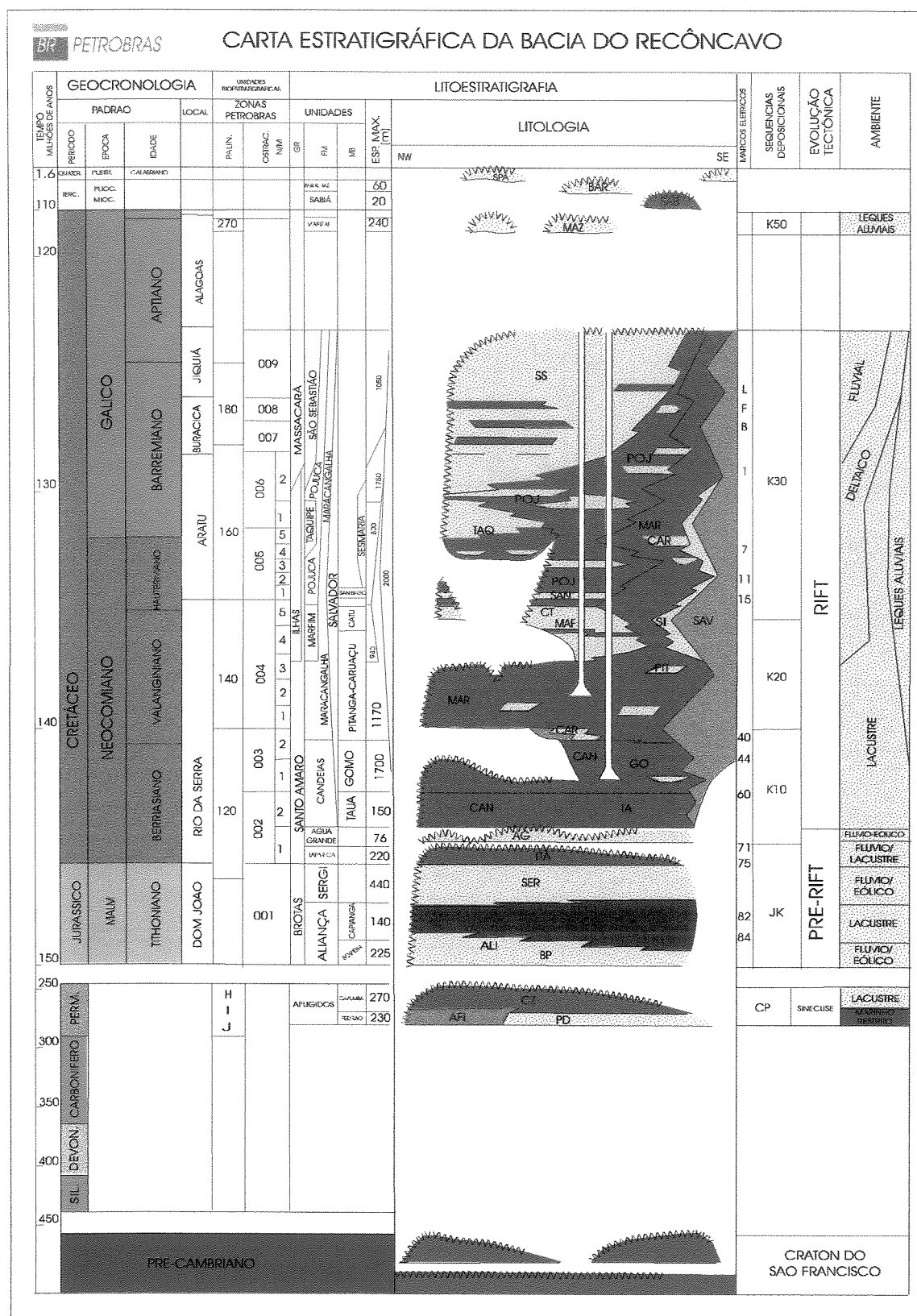


Figura 2.1 - Carta litoestratigráfica da Bacia do Recôncavo (Caixeta *et al.*, 1994).

2.2 - GEOLOGIA ESTRUTURAL E LITOESTRATIGRAFIA

A Bacia do Recôncavo está localizada na porção nordeste do Brasil, estendendo-se por uma área de aproximadamente 11.500 km² (fig. 2.2).

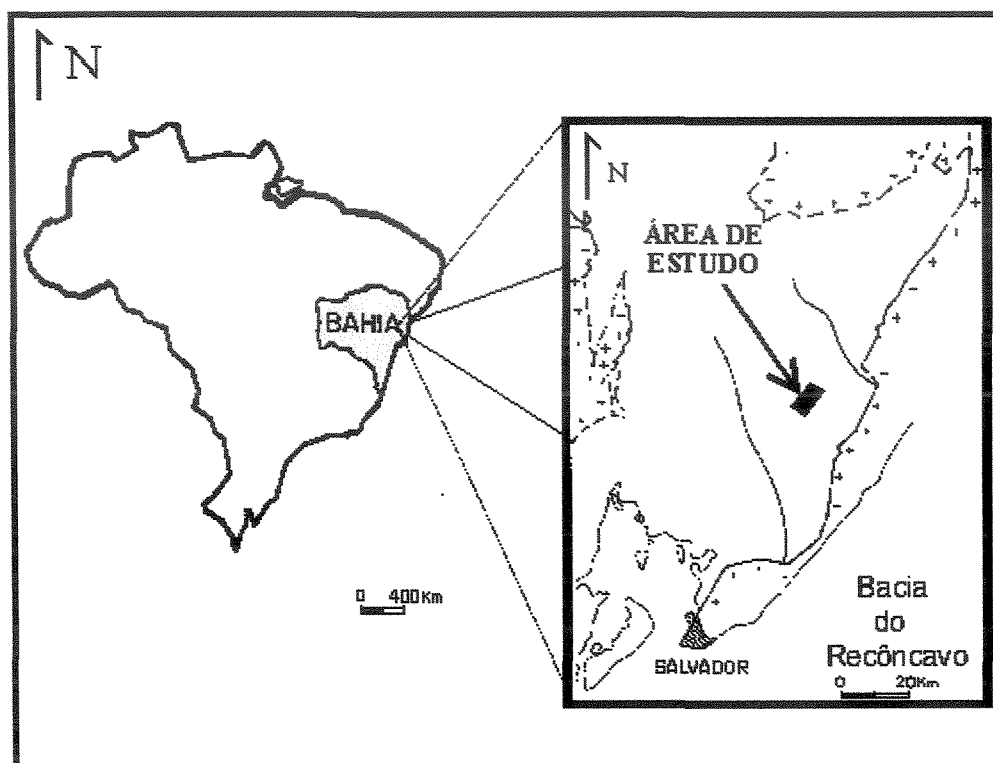


Figura 2.2 - Mapa de localização da Bacia do Recôncavo e da área de estudo.

Encontra-se dentro de um sistema de *rift-valleys* que se prolonga para norte, e abrange as bacias de Tucano e Jatobá. Seu limite a leste é marcado pelo Sistema de Falhas de Salvador, com rejeitos que podem ultrapassar os 6.000m; a oeste pela falha de Maragogipe, cujo rejeito máximo é de 500m; a norte pelo Alto de Aporá e a noroeste pelo Alto de Dom João. Ao sul, existe uma pequena porção da bacia submersa, separada da Bacia de Camamu pelo sistema de falhas da Barra, que corta a Ilha de Itaparica.

O meio-graben da bacia se alonga na direção NE-SW e tem suas camadas

mergulhando para SE, no sentido dos grandes depocentros. Esforços distensivos geraram falhamentos normais com direção aproximada N30°E, dividindo a bacia em áreas que foram relativamente estáveis denominadas patamares, e em áreas que tiveram maior taxa de subsidência, os baixos regionais. Outro sistema de direção N40°W inclui falhas de transferência que acomodaram diferentes taxas de estiramento crustal na história da formação da bacia (Milani & Davison, 1988; Santos *et al.*, 1990). Nesse contexto, destacam-se as falhas de Mata - Catu e Itanagra - Araçás (Braga, 1987), responsáveis pela divisão da bacia em três compartimentos: Nordeste, Central e Sul.

Cada um desses compartimentos apresenta suas particularidades, como por exemplo diferentes taxas de subsidência, presença ou não de diápiros de folhelho, entre outras. Sobre a Falha de Mata-Catu é importante salientar que, apesar do componente vertical do seu rejeito ser considerado principal, são observadas evidências de deslocamentos horizontais e movimentos transpressionais (Netto *et al.*, 1984; Santos *et al.*, 1990; Zabalaga & De Maman, 1990).

A sedimentação da Bacia do Recôncavo está relacionada ao processo de rifteamento sofrido pelo paleocontinente do Gondwana (Cretáceo Inferior). O pacote sedimentar abrange rochas paleozóicas, mesozóicas e cenozóicas sendo a sua maior parte depositada no Jurássico Superior e Cretáceo Inferior. Atinge uma espessura máxima de 6.000m, e encontra-se sobre rochas ígneas e metamórficas do embasamento (fig. 2.1).

Nesta seção, duas sequências sedimentares maiores são caracterizadas: a primeira, *pré-rift*, constituída por um sistema de leques aluviais e suas fácies associadas; e a segunda, *rift*, compondo-se de sedimentos aluviais, fluviais e deltaico-lacustrinos, que representam o registro completo do preenchimento de uma bacia lacustre tectonicamente ativa. Um pacote pouco espesso de sedimentos do Cretáceo Superior e Terciário (*pós-rift*), cobre parcialmente a seção sedimentar do Cretáceo Inferior.

Em função do estiramento e afinamento crustal por esforços de direção N30°- 40°W (Milani & Davison, 1988), desenvolveu-se prolongada subsidência na Bacia do Recôncavo, ocasionando uma sedimentação tipicamente continental (*red beds*) no Jurássico Superior (andar Dom João) que ultrapassou os limites atuais do *rift*. É nesse contexto que ocorreu a deposição dos folhelhos vermelhos,

evaporitos e arenitos do Grupo Brotas, abrangendo quase a totalidade da fase *pré-rift*, ou seja, numa ambiência de bacia intracratônica extensa, rasa e de tectonismo brando, com aporte sedimentar proveniente de W/SW. O referido Grupo engloba as formações Aliança e Sergi, sendo que a primeira revela um contato discordante com a Formação Afligidos. Da Formação Aliança fazem parte arcóseos e folhelhos avermelhados, advindos de sistema flúvio-lacustre e clima árido. Já os arenitos, folhelhos e conglomerados da Formação Sergi são atribuídos a sistemas fluviais entrelaçados com retrabalhamento eólico.

No início do Andar Rio da Serra, foi estabelecido o sistema lacustre que propiciou a deposição dos folhelhos da Formação Itaparica, depositada concordantemente sobre a Formação Sergi. Quando a taxa de sedimentação era maior que a de subsidência, esses sedimentos eram cobertos por progradações fluviais periódicas e pouco expressivas.

No final desse estágio, a bacia sofreu um basculamento para sul, evidenciado pelo truncamento dos folhelhos lacustres da Formação Itaparica contra a base dos arenitos sobrepostos da Formação Água Grande, originados a partir de sedimentação fluvial e contendo algumas fácies de retrabalhamento eólico (Cortez, 1996).

Em seguida é implantada a fase *rift*, que abrange quase a totalidade do Andar Rio da Serra, além dos andares Aratu, Buracica e Jiquiá. Estabeleceu-se novamente um ambiente lacustre, porém raso e anóxico, havendo um aumento da taxa de subsidência e uma mudança do clima relativamente árido para úmido. Nessas condições foram depositados os folhelhos cinza escuros da base da Formação Candeias, depositados discordantemente sobre a Formação Água Grande.

A partir desse momento a crosta começou a ser rompida e foi iniciada uma intensa tafrogenia, originando fossas onde lagos profundos se estabeleceram. Devido aos grandes rejeitos formados pelas falhas de borda, foram depositados em suas proximidades os espessos leques conglomeráticos sin-tectônicos da Formação Salvador, que ocorrem durante quase todo o Andar Rio da Serra e se estendem até o Andar Jiquiá. São constituídos basicamente de conglomerados polimíticos com grânulos e seixos de rochas granulíticas, carbonatos, quartzitos, arenitos e folhelhos, em matriz arenosa a siltico-argilosa. Nos referidos lagos,

ocorreu a sedimentação do Membro Gomo (Formação Candeias), composto por folhelhos intercalados por calcáreos e arenitos; e da Formação Maracangalha, constituída por arenitos e folhelhos. Nas áreas mais subsidentes com evidente atividade sísmica, estão presentes intercalações dos arenitos turbidíticos da Formação Maracangalha. Nessa época, devido ao espesso pacote de sedimentos depositado nas depressões, teve início um processo de argilocinese na bacia que persistiu até o Andar Buracica (Santos *et al.*, 1990).

Com um tectonismo bem mais brando e uma taxa de subsidência menor no final do Andar Rio da Serra, implantou-se um complexo deltaico proveniente de NW, sendo depositados os sedimentos do Grupo Ilhas que é composto das Formações Marfim, constituída por arenitos muito finos do Membro Catu e folhelhos; a Formação Pojuca, que exhibe intercalações de arenitos cinza muito finos a médios, folhelhos, siltitos e calcários; e a Formação Taquipe, composta de folhelhos com lentes de arenito, ocupando na bacia uma feição erosiva em forma de *canyon*. Entre os diversos arenitos que ocorrem na Formação Pojuca, podemos destacar o Membro Santiago (objeto desse estudo), caracterizado por arenitos finos a muito finos de distribuição regional, intercalados por lamitos, argilitos e delgadas camadas de calcilutitos / calcissiltitos. Essas rochas calcárias formam excelentes marcos elétricos, facilitando as tarefas de correlação na porção centro-norte da bacia. Os reservatórios deltaicos do presente estudo fazem parte do Andar Aratu (128-130 Ma), conforme datações bioestratigráficas baseadas em ostracodes e palinomorfos (Picarelli & Caixeta, 1991; Picarelli & Milhomen, 1992; Caixeta *et al.*, 1994).

Ainda na fase *rift*, logo no começo do Andar Buracica, a bacia rasa foi dominada por um ambiente fluvial. Nesse estágio iniciou-se a deposição da Formação São Sebastião (Grupo Massacará), constituída por arenitos finos a grossos intercalados por pelitos, persistindo até o final do Andar Jiquiá. Antes da deposição dos sedimentos desse andar, que também abrange rochas das Formações Pojuca, Maracangalha e Salvador, durante o Andar Buracica (e também depois) um novo período de atividade tectônica se instalou, ressaltando a compartimentação da bacia delineada pelas falhas de transferência.

A fase *pós-rift*, de pequena expressão, é composta pelas Formações Poço Verde (siltitos, arenitos e folhelhos) e Marizal (arenitos e conglomerados de

leques aluviais) do Andar Alagoas; e pelas Formações Sabiá (folhelhos, arenitos e carbonatos) e Barreiras (arenitos grossos a conglomeráticos) do Terciário.

Recobrando todo esse pacote, encontram-se os sedimentos de praia e aluvionares do Quaternário.

3) AMBIENTE DELTAICO DE SEDIMENTAÇÃO

3.1 - INTRODUÇÃO

Deltas são sistemas de sedimentação que ocupam uma posição intermediária entre ambientes subaéreos (continentais) e subaquosos (marinhos ou lacustres), formando depósitos nas áreas onde ocorre o encontro de rios com oceanos, mares semi-restritos ou lagos. Para que isso aconteça, o aporte sedimentar trazido pelo rio deve ser grande e de rápida deposição, o suficiente para que agentes atuantes no meio aquoso permanente como marés, ondas ou correntes submarinas não removam esse material para depositá-los nas regiões circunvizinhas.

Os sedimentos captados na bacia de drenagem e transportados pelo sistema fluvial formam um depocentro na área do delta (junto a costa), a medida que o fluxo do rio sofre uma **desaceleração** ao encontrar a bacia receptora, havendo uma tendência de deposição da fração grossa nesse local, sendo a fração fina transportada para áreas mais distais. Devido a esse grande acúmulo localizado de sedimentos, os deltas constituem ótimos *plays* para prospecção de hidrocarbonetos, carvão, linhito e também urânio (Galloway & Hobday, 1983).

Apesar do comportamento físico de um delta ser relativamente simples, a interação entre os processos subaéreos que atuam nos rios em associação com os processos subaquosos presentes na bacia de captação (seja num meio marinho ou lacustre), proporcionam a formação de vários subambientes dentro do sistema deltaico, gerando depósitos com características faciológicas e geometria bastante particulares.

3.2 - HISTÓRICO

O termo **delta** teve sua origem no ano de 400 AC, quando Herodotus comparou a planície aluvial na desembocadura do Rio Nilo com a letra grega Δ (Bhattacharya & Walker, 1992). A primeira pesquisa em deltas do passado foi

feita em 1885, onde foram descritos os deltas pleistocênicos do lago de *Bonneville*, Utah (E.U.A.).

Seguindo as mesmas idéias, elaborou-se um estudo no delta devoniano *Catskill* nos Appalaches, onde foi definido como **delta** um depósito parcialmente subaéreo formado por um rio num corpo aquoso permanente, constituído-se de estratos tanto terrestres quanto marinhos (ou lacustres).

A partir daí, os trabalhos mais significativos em deltas recentes englobaram o do Rio Fraser e o famoso delta do Rio Mississipi, onde foram desenvolvidas inúmeras pesquisas. Pode-se destacar o estudo de Scruton (1960), que atribuiu a **delta** um processo cíclico formado a partir de um depósito progradante originado por agente construtivo, seguido de sedimentos retrogradantes formados por agente destrutivo. Esse mesmo autor reconheceu uma sequência deltaica vertical com feições de *topset*, *foreset* e *bottomset*, apresentando uma gradação *coarsening* e *sandier-upward*, relacionada a estágios de progradação dos ambientes deposicionais terrestres envolvidos.

Durante um longo tempo, o delta do Mississipi foi visto como um modelo desse tipo de ambiente de sedimentação. Com a intensificação dos estudos em vários deltas do recente desde essa época, os estudiosos sentiram a necessidade de uma comparação crítica entre os diferentes deltas que ocorrem na natureza. A partir daí, surgiu a classificação mais aceita até os dias atuais (com algumas ressalvas) apresentada por Galloway (1975), sendo baseada nos processos controladores da morfologia dos deltas, seja por rios, marés ou ondas.

Após o reconhecimento da magnitude dos processos de subsidência e deformação nas áreas de maior acúmulo de sedimentos deltaicos por parte de vários autores, a comunidade científica das áreas afins vem tentando colocar a evolução dos deltas modernos no contexto das **variações eustáticas do nível do mar**; e, paralelamente, a aplicação da teoria da **estratigrafia de sequências** nos ambientes deltaicos do pretérito (Bhattacharya & Walker, 1992; Della Fávera, 1987).

3.3 - PROCESSOS ATUANTES NA FORMAÇÃO DE DELTAS

De uma maneira geral, o tipo de delta e a forma dos seus depósitos

dependem principalmente dos **processos** que estão atuando no local onde os rios se encontram com seus respectivos meios aquosos receptores (fig. 3.1). Pode-se classificar esses processos como originados por 3 tipos de fluxo, ou seja:

- fluxo *hiperpicnal*, quando a densidade do fluxo fluvial é maior que a do mar ou lago de descarga;
- fluxo *homopicnal*, quando esse parâmetro se equivale nos dois meios;
- fluxo *hipopicnal*, quando a densidade do corpo de água receptor é maior que a do rio.

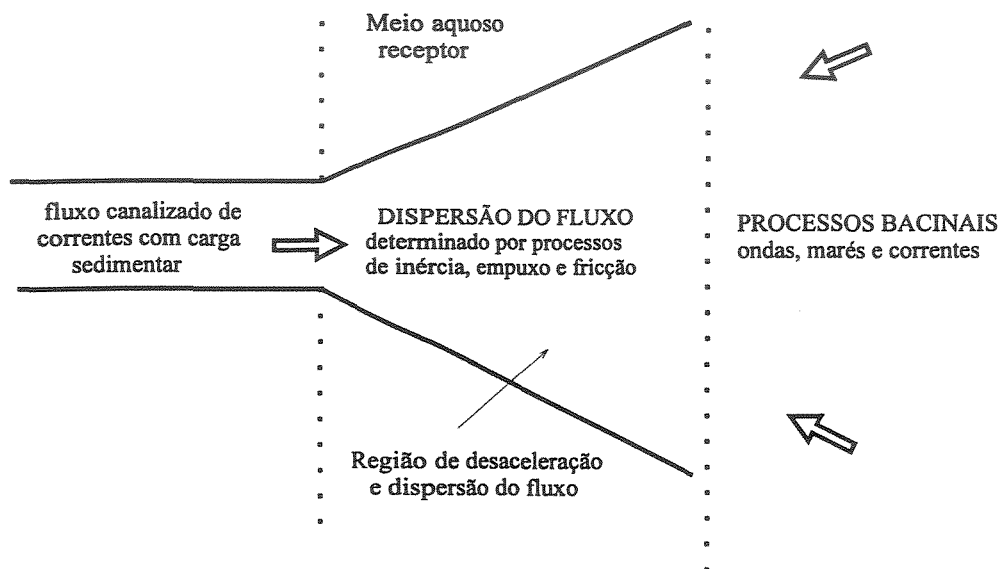


Figura 3.1 - Processos atuantes entre o fluxo do canal distributário e a bacia receptora na frente deltaica (modificada de Elliot, 1986).

Além disso, também devem ser considerados o grau de atuação dos processos de retrabalhamento resultantes da ação de marés, ondas e correntes marinhas, que em alguns casos podem ter uma ampla abrangência areal (Bhattacharya & Walker, 1992; Martinsen, 1990).

No primeiro caso (*hiperpicnal*), o fenômeno físico que controla a deposição dos sedimentos na desembocadura dos canais distributários são os processos de inércia, esperando-se uma granulometria tendendo para mais grossa nesse tipo de depósito. As possantes correntes de densidade tendem a formar acumulações de sedimentos com geometria lobada, de dimensões não muito

grandes e com altas inclinações, estando os lobos amalgamados por toda a frente deltaica, em função das frequentes mudanças no eixo de deposição dos canais distributários (grande aporte sedimentar). A fração mais fina presente no fluxo tende a ser depositada um pouco mais adiante, no sentido da bacia de captação (prodelta). Esse tipo de processo de formação de depósitos deltaicos é muito comum em áreas com frequentes períodos de inundação. Exemplos típicos são encontrados em acumulações provenientes de canais desembocando em lagos de água doce de ambientes glaciais.

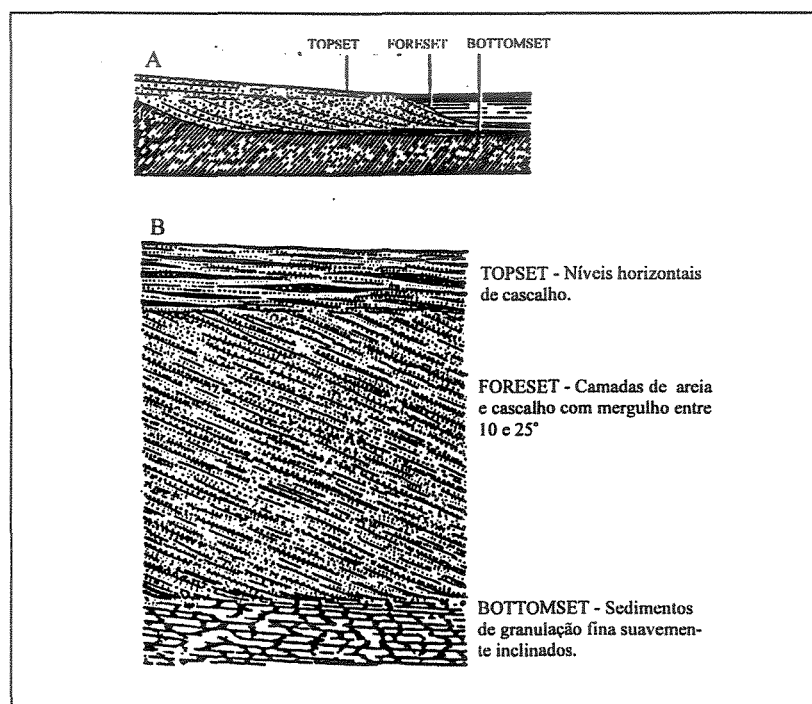


Figura 3.2 - Seção esquemática de um delta tipo Gilbert; (A) - Seção regional; (B) - Sequência vertical de fácies, como produto da progradação deltaica (modificada de Elliot, 1986).

Já nos regimes **homo** e **hipopicnal**, os fenômenos predominantes no processo deposicional são forças de fricção e de empuxo, onde a pequena carga sedimentar tende a ter uma granulomeria menor. No caso **homopicnal**, a carga sedimentar é depositada como barra em forma de leque por fluxo tracional laminar na desembocadura dos canais distributários, promovendo a bifurcação

dos canais. As feições típicas encontradas nesse tipo de depósito são características de corrente de tração ao invés de *ripples* ou estratificações cruzadas, observando-se camadas com alta inclinação no *foreset*, enquanto que no *bottomset* e *topset* elas estão menos inclinadas (figs. 3.2A e 3.2B). Esse tipo de ambiente é comum em deltas de água doce, principalmente quando a carga sedimentar em suspensão é alta, onde os exemplos mais tradicionais são o dos deltas tipo Gilbert.

Nos depósitos originados por processos **hipopicnal**, a granulometria relativamente fina dos sedimentos é transportada em suspensão por algum tempo já na bacia receptora, formando depósitos arenosos de baixa inclinação e ampla distribuição areal.

3.4 - CLASSIFICAÇÃO DE DELTAS

Os estudos de reservatórios deltaicos formados no pretérito, têm se baseado amplamente no conhecimento dos processos atuantes nos ambientes deltaicos atualmente em formação. Os tipos de deltas vêm sendo classificados semi-quantitativamente durante um longo período, segundo um diagrama ternário idealizado por Galloway (1975), acrescido de algumas considerações dos trabalhos mais atuais. Essa classificação leva em conta os processos físicos do ambiente sedimentar dominante e a geometria dos seus produtos, dando um grau de magnitude a esses processos de atuação (rios, ondas ou marés), posicionados cada um nos extremos de um diagrama ternário (fig. 3.3).

De uma maneira geral, sistemas deltaicos dominados por rios são altamente construtivos e produzem corpos com geometria em forma de lobos alongados a irregulares; os deltas dominados por ondas (altamente destrutivos), geram depósitos que registram os processos de retrabalhamento dos sedimentos fluviais pela ação das ondas, originando corpos de geometria lobada a cuspidada; já aqueles dominados por marés, tendem a formar lobos irregulares ou estuários. As pesquisas que se seguiram após a implantação da classificação de Galloway, forneceram maiores subsídios ao conhecimento dos deltas dominados por rios e por ondas, em relação aqueles dominados por marés (Coleman & Prior, 1982). Para exploração de petróleo, os deltas dominados por rios e por ondas tendem a

formar os melhores reservatórios.

De uns anos para cá, os intensos estudos de sistemas deltaicos atuais e do pretérito revelaram que, além dos sedimentos trazidos pelos rios e do retrabalhamento de seus depósitos por outros agentes, algumas considerações complementares devem ser relevadas. Desconsiderando a geometria e tipo de bacia receptora, outros fatores influenciadores da natureza e padrão faciológico do delta podem ser, por exemplo, a posição do delta em relação a bacia como um todo, as características da rede de drenagem, o gradiente da plataforma onde o delta está se formando, a profundidade e a possança da carga sedimentar depositada, e até o tamanho do sedimento e sua composição. Outros agentes significativos são citados a seguir.

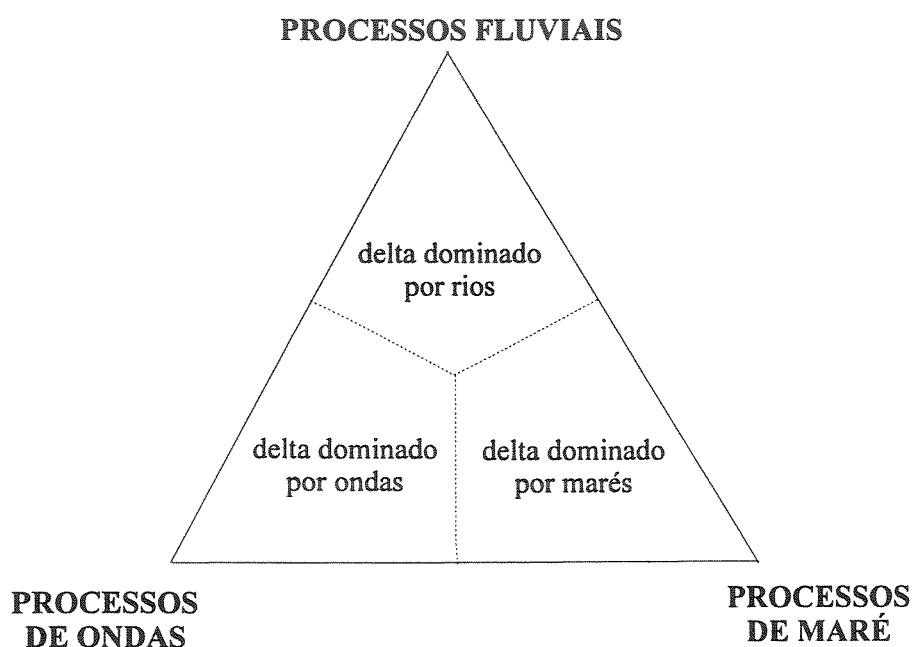


Figura 3.3 - Diagrama ternário dos tipos de deltas, baseado no processo atuante na frente deltaica (Galloway, 1975).

- Clima

A atuação do clima reinante na área de captação dos sedimentos tem um papel bastante importante na formação dos deltas, pois é o grande controlador do regime hidrológico de uma bacia sedimentar. Caso seja propício a frequentes

períodos de tempestades e inundações, como é comum em clima úmido e tropical, o aporte sedimentar transportado pelos rios e canais distributários aumenta significativamente; ao passo que em climas áridos tende a prevalecer o processo de evaporação com longos períodos de estio e ausência de vegetação, reduzindo a carga de sedimentos provenientes do continente. Nesse caso, tem-se exemplos de acúmulo de sedimentos de origem marinha (depósitos salinos) nos leitos dos canais distributários, que em muitos casos são removidos novamente para dentro da bacia na época da inundação seguinte.

- Salinidade

A salinidade do meio aquoso de captação é também um fator importante a ser considerado, no sentido de que bacias receptoras com baixa salinidade tendem a favorecer os processos hiperpicnais de formação dos depósitos. Quando essas bacias salinas são de baixa energia predominam os processos homopícnais, onde os sedimentos de granulação mais fina são transportados por suspensão, depositando-se de forma dispersa numa grande área de abrangência.

- Temperatura

A temperatura também é um fator marcante na implantação de fluxos hiperpicnais, que juntamente com o aporte sedimentar presente perfazem os agentes controladores desses processos em deltas lacustrinos.

- Deformação sin-sedimentar

Na caracterização de um delta, é de grande importância o conhecimento da taxa de acumulação considerada na área de maior acúmulo de sedimentos (frente deltaica), e a extensão dos processos de deformação sin-sedimentares como escorregamentos, falhas de crescimento e diapirismo de folhelhos durante a progradação de um delta, constituindo-se de agentes fortemente controladores da geometria e distribuição dos seus depósitos.

Sobre esses agentes, podemos fazer algumas considerações. Os avanços tecnológicos experimentados nas últimas décadas, em particular na obtenção de imagens do tipo *side-scan sonar*, chamaram atenção para o fato da grande

atuação e incorrência dos processos de subsidência e deformação sin-sedimentar que estão presentes nas partes subaquosas de deltas recentes, sendo reconhecidas feições análogas originadas por processos similares também em deltas antigos (Pulham, 1989; Bhattacharya & Walker, 1992).

Esse problema já havia sido levantado anteriormente, quando as plataformas de exploração de petróleo posicionadas na frente deltaica do Rio Mississippi tiveram problemas de desestabilização (Elliott, 1989). Os estudos desenvolvidos na área detectaram vários indícios de processos de subsidência e deformação, como a presença de diápiros de argila, corpos laminares de escorregamento (*slump sheets*), deslizamentos rotacionados, depressões originadas por colapso, lobos de fluxo de lama, falhas de crescimento, entre outros.

Segundo Pulham (1989), que desenvolveu um estudo em afloramentos de depósitos deltaicos dominados por rio (County Clare, Irlanda Ocidental), os processos sin-deposicionais de deformação atuam amplamente na progradação desse tipo de delta, com as taxas de deformação aumentando a medida que a progradação avança. Outra conclusão do trabalho apontou que as estruturas deformacionais observadas em escala de afloramento sugerem a presença de estruturas bem maiores na escala de preenchimento da bacia.

Em muitos casos ocorre um deslocamento (ou deslizamento) de uma porção desses lobos de frente deltaica que vão se depositar em áreas mais distais, colocando todo esse pacote sobre sedimentos prodeltaicos. Alguns desses depósitos, dependendo do contexto geral do ambiente de sedimentação, são relacionados a leques submarinos.

Esses fenômenos físicos de escorregamento ocorrem pela ação de vários fatores interagindo mutuamente, a começar pelo aumento da pressão água/poro e do metano no sedimento pelo aumento gradativo do acúmulo de carga (Postma, 1984). Além disso, pode-se destacar a atuação de ondas sobre os sedimentos durante tempestades, aumento do gradiente da frente deltaica devido ao aumento da taxa de sedimentação durante as inundações, processos de diapirismo de argilas, entre outros.

Parece óbvio que todos esses processos estão naturalmente ligados, havendo uma interdependência entre eles. Pode-se citar como exemplos o tipo de

sedimento e sua taxa de suprimento, que dependem do clima e do relevo da bacia de drenagem, e outros fatores como a ausência ou não de vegetação no continente, que no primeiro caso tende a proporcionar altas taxas de suprimento sedimentar. O relevo, por sua vez, depende da tectônica reinante na bacia de captação.

Um exemplo bastante ilustrativo, é o caso dos depósitos deltaicos de *Scar House*, Yorkshire, região norte da Inglaterra (Martinsen, 1990). Os cordões de areia (*bar finger sands*) gerados, perfazem uma geometria típica de atuação de processo hipopical; no entanto, o estudo detalhado de todos os processos e produtos do sistema revelou que longos períodos de inundação ocorreram originando esse tipo de depósito, apesar da atuação de processo hiperpical pelo grande aporte sedimentar proveniente dos canais distributários.

3.5 - SUBAMBIENTES DO COMPLEXO DELTAICO

De uma maneira sucinta, podemos dividir um complexo deltaico de sedimentação em três principais ambientes: a **planície deltaica**, onde o processo fluvial (canais distributários) predomina; a **frente deltaica**, afetada tanto por processos fluviais quanto marinhos (ou lacustres); e o **prodelta**, onde atuam basicamente os processos da bacia receptora (marinhos / lacustres). Cada um desses ambientes possui particularidades que definem uma série de subambientes dentro deles (fig. 3.4).

A **planície deltaica** é uma grande área continental formada por uma rede de canais distributários, alguns em franca atividade e outros abandonados. Nas áreas existentes entre os canais, existe uma variada assembléia de micro-ambientes formados por pequenas baías, lagos, pântanos, mangues, áreas de planície de inundação e de maré, sendo todo esse complexo bastante influenciado pelas condições climáticas vigentes. Aí são encontradas as areias de granulação fina, que tendem a ser sedimentadas durante os períodos de inundações, formando depósitos de extravasamento. Assim, como ocorre em ambientes fluviais (Galloway & Hobday, 1983), nesse subambiente do complexo deltaico podem ser encontrados depósitos de rompimento dos diques marginais (ou de *crevasse*), que preenchem as baías interdistributárias, com possibilidade de

constituírem reservatórios potenciais de hidrocarbonetos.

A **frente deltaica** é a porção do sistema onde se agrupam as maiores espessuras de sedimentos. Seus depósitos acumulam-se na desembocadura dos canais distributários, tendendo a formar corpos individualizados (lobos deltaicos) de dimensões reduzidas e granulação mais grossa. A medida que se afasta da boca dos canais em direção ao oceano, existe uma tendência de redução granulométrica dos depósitos. Dependendo da profundidade de deposição e do grau de energia da bacia receptora, a posição dos canais distributários pode permanecer inalterada por longos períodos, gerando depósitos em forma de barras arenosas alongadas, desde que a ação destrutiva das ondas e marés seja pouco atuante. Por outro lado, quando a desembocadura do canal se encontra diante de um substrato raso, os depósitos de frente deltaica tendem a migrar seu eixo deposicional rapidamente, formando grupos de barras menores que se coalescem.

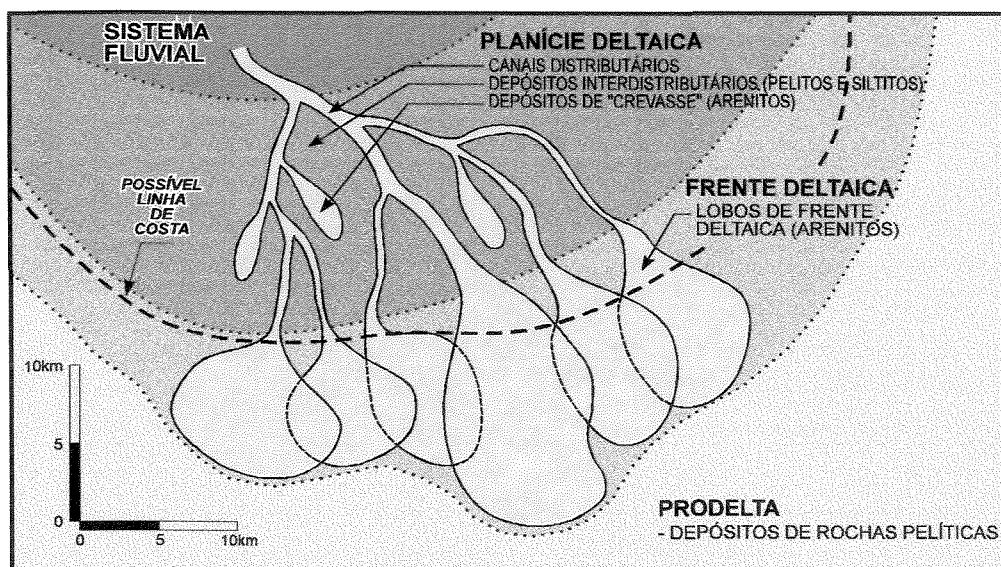


Figura 3.4 - Diagrama simplificado dos principais subambientes do sistema deltaico.

Na área do **prodelta** vão ser depositados os sedimentos de granulação fina que foram transportados por suspensão. A granulometria das rochas presentes nesse subambiente tende a aumentar no sentido do continente e também

verticalmente, em muitos casos gradando para as fácies mais grossas dos depósitos deltaicos transgressivos. No prodelta, ainda podem ser observados sedimentos laminados de origem deltaica, intercalados com pelitos altamente bioturbados depositados nas partes mais profundas da bacia.

3.6 - GEOMETRIA TÍPICA DOS DEPÓSITOS

Os depósitos originados por sistemas deltaicos de sedimentação apresentam-se de forma bastante diversificada, pois como se pode observar os deltas modernos estão se formando em diferentes contextos, seja climáticos, tectônicos, ou outros quaisquer. Além disso, a interação dos ambientes terrestres e marinhos / lacustres, o grande aporte sedimentar envolvido, a existência de processos modificadores da arquitetura original dos depósitos como a subsidência e a ação das ondas, entre outros fatores, proporcionam uma gama muito grande de geometrias para esses corpos (Coleman & Prior, 1982).

Como já mencionado, num sistema deltaico os principais reservatórios são formados por lobos individualizados (em muitos casos não muito espessos) depositados na frente deltaica, que vão se coalescendo vertical e também lateralmente. A medida que o eixo do canal distributário muda de posição, o lobo em formação pode agregar-se ao lobo do canal adjacente formando um espesso pacote integrado e contínuo, constituído por vários lobos deltaicos amalgamados. Dessa maneira, um lobo está sendo gerado a medida que outros já formados se encontram em estágio de subsidência, geralmente em posição perpendicular a linha de costa. Assim sendo, os sedimentos mais grossos tendem a se situar próximo a desembocadura do canal distributário, com uma redução da granulometria no sentido do mar profundo.

A geometria externa esperada para os lobos deltaicos depende de vários fatores. Dentre os principais, podem ser destacados as condições de fluxo do canal, o contraste de densidade entre a água proveniente do canal distributário e a do meio receptor, o gradiente da plataforma onde está ocorrendo a deposição, e ainda a presença ou ausência de agentes modificadores dos depósitos, tais como ondas, correntes e marés. Em estudos de deltas dominados por rio onde não ocorrem esses agentes destrutivos como no presente caso, os canais distributários revelam um padrão geométrico bifurcado ou do tipo *bird foot* (Bristow & Myers,

1989), depositando lobos de frente deltaica que podem atingir uma largura de vários quilômetros; ou ainda uma geometria alongada em situações particulares, como por exemplo num maior gradiente do substrato ou num ambiente de menor aporte sedimentar onde os processos de subsidência são pouco atuantes, tendendo

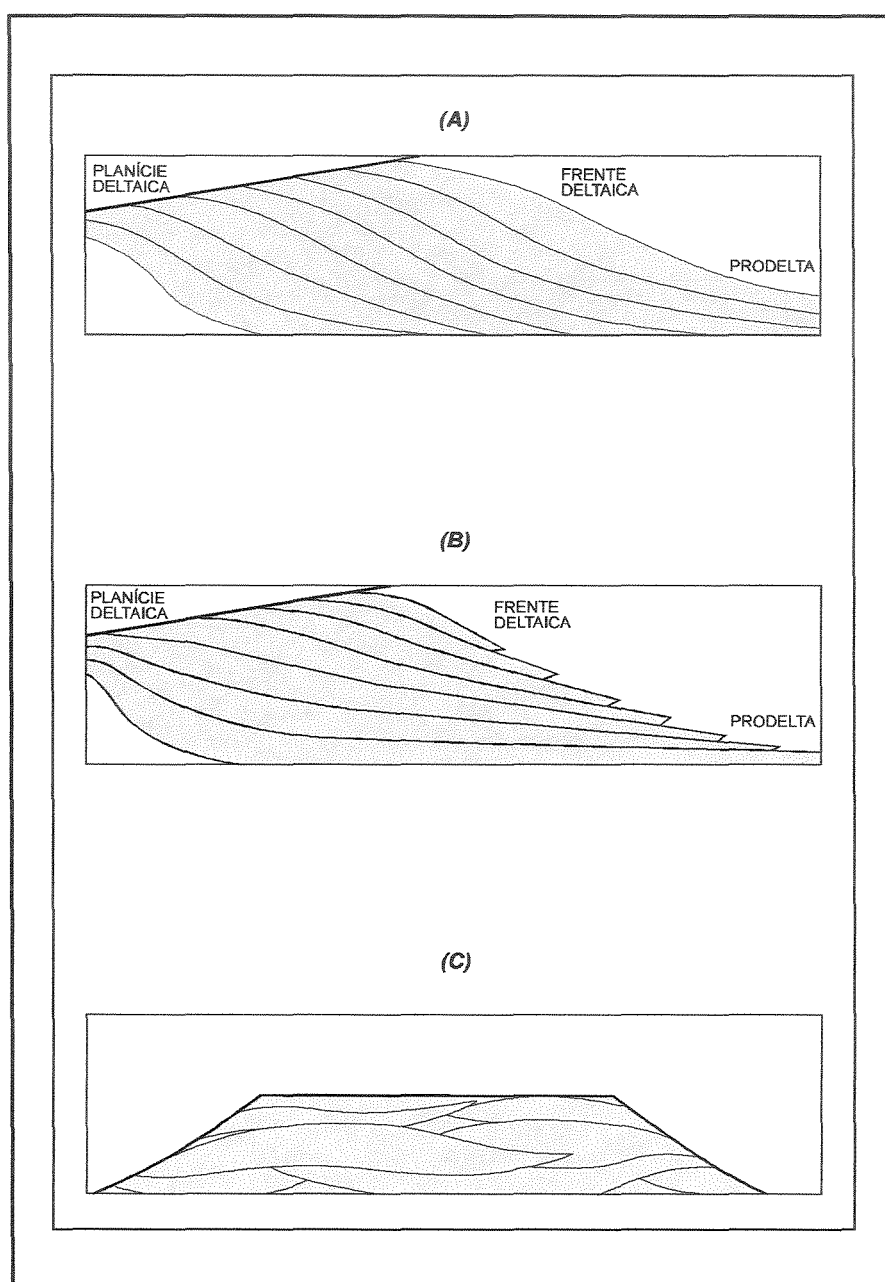


Figura 3.5 - Geometria esperada para os lobos de deltas dominados por rios; (A) Seção *dip* - Progradação deltaica; (B) Seção *dip* - Retrogradação deltaica; (C) Seção *strike* (modificada de Bhattacharya & Walker, 1992).

a apresentar uma granulometria mais grossa no centro e que vai se afinando para as bordas. Tanto num sistema deltaico progradante como retrogradante, uma seção *dip* típica tenderá a mostrar **corpos arenosos sigmoidais** com suas superfícies deposicionais inclinadas (figs. 3.5A e 3.5B), sendo as fácies mais grossas encontradas na frente deltaica e as mais finas no prodelta (Scruton, 1960).

O padrão da geometria de um depósito deltaico esperado numa seção *strike* (fig. 3.5C) já não é tão característico como na seção *dip*, uma vez que as superfícies deposicionais podem mergulhar com inclinações diferentes e direções distintas, o que depende de vários fatores que atuaram na época da sedimentação.

Segundo Coleman & Prior (1982), os depósitos de extravasamento presentes na baía interdistributária (*crevasse*) geralmente variam de 3 a 15m de espessura, levando um período de 100 a 150 anos para a sua total formação. Embora restritos, esses depósitos podem se aglutinar formando espessos pacotes de reservatórios de planície deltaica, a depender da taxa de subsidência e do aporte sedimentar vigentes.

3.7 - SUCESSÕES DE FÁCIES DO SISTEMA DEPOSICIONAL DELTAICO

Paralelamente ao estudo de deltas através da geometria dos seus corpos, foram idealizadas por Coleman & Wright (1975) sucessões verticais de fácies, caracterizadas para cada tipo de delta. Apesar da grande aplicabilidade que vem tendo, principalmente no estudo de afloramentos, é necessário considerar-se os fatores influenciadores na formação do delta em estudo, basicamente no que se refere aos agentes de transporte, deposição e retrabalhamento dos sedimentos.

Quando se está diante de um processo de progradação deltaica, a sucessão vertical de fácies típica revela rochas pelíticas de prodelta na base, tendendo a uma feição *coarsening upward* para o topo, a medida que passam a predominar lobos da frente deltaica no sistema (Coleman & Wright, 1975; Elliot, 1986). Caso o processo de progradação tenha continuidade, os sedimentos da planície de inundação normalmente estariam posicionados acima dos lobos; porém, o que ocorre em muitos exemplos, é uma erosão parcial desses lobos pelos canais distributários superimpostos; ou então, os lobos se encontram truncados por

rochas pelíticas transgressivas devido a mudança do eixo deposicional dos mesmos.

Entre outras características, nos deltas dominados por rios espera-se que as rochas de granulação fina do prodelta sejam maciças e também estratificadas, mostrando aleitamento gradacional, bioturbação variável (dependendo do aporte sedimentar) e ausência de marcas de ondas. Já nos lobos de frente deltaica, espera-se o registro de marcas unidirecionais de corrente (por influência dos canais), arenitos tanto maciços quanto com estratificação cruzada e leitos de matéria orgânica.

Nessa mesma sequência, num delta que seja dominado por ondas, os pelitos do prodelta são bastante bioturbados em geral, e apresentam geometria mais delgada. O intervalo sotoposto é normalmente *coarsening upward*, onde estão presentes areias de cordões de praia originadas na frente deltaica, revelando estruturas tipicamente formadas por ondas, como marcas ondulares e estratificação cruzada tipo *hummocky*. Em deltas dominados por marés, o mesmo padrão *coarsening upward* também pode ser observado, porém alguns indícios da ação das marés são registrados nos arenitos de frente deltaica como ciclicidade, presença de estratificação cruzada tipo *herringbone*, marcas bidirecionais de corrente e superfícies de reativação.

Quando são analisadas as sucessões de fácies geradas na planície deltaica, observa-se um truncamento na base dos canais distributários. Como o preenchimento é efetuado após o abandono do canal, espera-se um padrão *fining upward*, com a presença de fácies de ambiente marinho no topo sobre os depósitos de canal. Nas áreas interdistributárias existe pouca quantidade de areia, formando pequenas sucessões *coarsening* e *fining upward* truncadas. Especificamente em deltas dominados por rios, a monótona sucessão de fácies de granulação fina pode ser quebrada pelos corpos arenosos de *crevasse* ou mesmo pelos depósitos de canal.

3.8 - CONCEITOS DE ESTRATIGRAFIA MODERNA APLICADOS A SISTEMAS DELTAICOS

Além dos princípios básicos de sedimentologia, as pesquisas atuais realizadas em deltas recentes tentam relacionar todo esse sistema com as

variações do nível do mar, que estão geneticamente ligadas a **eustasia** e a **taxa de subsidência**; e de forma análoga, aplicar a teoria da **estratigrafia de sequências** nos estudos de deltas antigos (Bhattacharya & Walker, 1992).

Cada vez mais sentiu-se a necessidade de, através de estudos no campo da sismoestratigrafia, serem estabelecidos elos de ligação entre os sistemas fluvial, deltaico, de plataforma, de talude e turbidítico. Parte daí a definição de **trato de um sistema**, que representa uma associação de ambientes deposicionais contemporâneos (Bhattacharya & Walker, 1992; Della Fávera, 1995).

Nos deltas depositados em épocas de nível de mar alto (tratos de sistemas de mar alto), os lobos da frente deltaica são depositados em águas rasas e, devido as frequentes mudanças do eixo deposicional, apresentam geometria lobada de tamanho reduzido, coalescendo-se entre si. Já nos deltas depositados durante o nível de mar baixo (tratos de sistemas de mar baixo), os lobos de frente deltaica gerados tendem a formar corpos alongados e, dependendo da profundidade da plataforma e do aporte sedimentar, o eixo deposicional permanece na mesma posição por um longo período, acentuando esse padrão de geometria. No caso particular de deltas sedimentados após uma queda relativa do nível do mar, são formados os tratos de sistemas de margem de plataforma (*lowstand systems tracts*), que em geral atingem águas mais profundas, relativamente aos deltas anteriores. Baseado nesse contexto, o desenvolvimento de leques submarinos profundos está geralmente ligado a formação de deltas de plataforma.

Ao analisar-se uma situação de transgressão marinha (tratos de sistemas transgressivos), pode ser observado o aparecimento de estuários, pois na frente deltaica os depósitos gerados tendem a ser formados por processos dominados por ondas e marés, enquanto o material proveniente dos canais são depositados na área da planície de inundação.

Esses conceitos de tratos de sistemas alcançaram uma grande importância nos estudos da estratigrafia moderna, no sentido de que se pode fazer inferências dos vários ambientes de sedimentação contíguos a área de pesquisa, que são contemporâneos e estão geneticamente relacionados entre si.

Os diferentes processos que atuam na geometria dos depósitos deltaicos, também podem ser classificados de **autocíclicos** ou **alocíclicos**. Os processos autocíclicos estão relacionados ao comportamento interno do sistema

deposicional, como por exemplo o amalgamento dos lobos de frente deltaica e o rompimento de diques marginais de canais distributários. Já os processos alocíclicos são externos a bacia, porém atuam indiretamente na deposição dos sedimentos, como a eustasia, a tectônica e o clima.

Levando em conta essas considerações na formação dos depósitos deltaicos, o padrão *coarsening upward* de um lobo geralmente culmina com a presença de uma camada pelítica de incursão marinha, gerada após o abandono desse mesmo lobo. A partir daí, um outro lobo já se encontra em formação quando o primeiro está no estágio de subsidência, caracterizando a atuação dos processos autocíclicos. Por sua vez, o desenvolvimento de um grupo de lobos coalescentes normalmente culmina com a presença de uma superfície de descontinuidade de maior abrangência regional, formada durante uma elevação eustática do nível do mar (processo alocíclico), denominada superfície de inundação marinha, o que caracteriza um trato de sistemas transgressivos.

As **superfícies de inundação marinha** são horizontes que separam os estratos mais jovens dos mais antigos, através da qual existem evidências do aumento abrupto na profundidade da água constituindo-se de marcos estratigráficos extremamente importantes. A **parassequência**, que representa uma unidade básica no estudo da sismoestratigrafia, é definida como uma sucessão concordante de camadas ou conjunto de camadas geneticamente relacionadas, limitada por superfícies de inundação marinhas e suas superfícies correlatas (Van Wagoner *et al.*, 1988).

4) ESTRATIGRAFIA DE ALTA RESOLUÇÃO

4.1 - GENERALIDADES

A área de estudo está localizada na porção central da Bacia do Recôncavo (fig. 2.2). Abrange aproximadamente 25 km², englobando cerca de 70% da área de um importante campo de petróleo. O trabalho envolve um total de 276 poços dispostos irregularmente em malha bastante densa, com espaçamento entre eles variando de 40m a 700m e com média de 215m.

Os estudos estratigráficos de alta resolução são elaborados a nível de detalhe utilizando-se praticamente todas as informações disponíveis na área em questão, como por exemplo perfis dos poços calibrados com as descrições de testemunhos, seções estratigráficas na escala de detalhe e com malha fechada, além de dados de produção, paleontológicos, petrográficos e petrofísicos.

Essa fase foi iniciada com a identificação das fácies, estruturas e alguns elementos da geometria interna presentes no intervalo estratigráfico de estudo, sendo feita a descrição dos testemunhos de 15 poços (total de 540 m). Paralelamente, foi elaborada uma minuciosa correlação rocha x perfil, visando o reconhecimento das respostas dos diversos perfis frente a cada tipo litológico, as estruturas sedimentares presentes, e ainda as mudanças texturais e de litologia reconhecidas macroscopicamente. Nessa fase, foram também usadas descrições petrográficas e dados de análises paleontológicas na interpretação.

A partir daí, foram confeccionadas 19 seções estratigráficas a nível de detalhe (fig. 4.1), com exagero vertical de apenas duas vezes (escalas horizontal de 1:1.000 e vertical de 1:500), tentando-se fazer um recobrimento o mais representativo possível de todos os corpos arenosos presentes na área. Para uma melhor definição da geometria externa desses corpos, procurou-se alinhar as seções nas direções aproximadamente *strike*, *dip* e em posições oblíquas a essas, distribuídas ao longo de toda a área de estudo.

Em análises estratigráficas visando a detecção de barreiras de permeabilidade presentes em uma seção de reservatórios, é oportuno lembrar que a escala vertical das seções pode ser ainda mais detalhada (1:200 ou 1:100) em

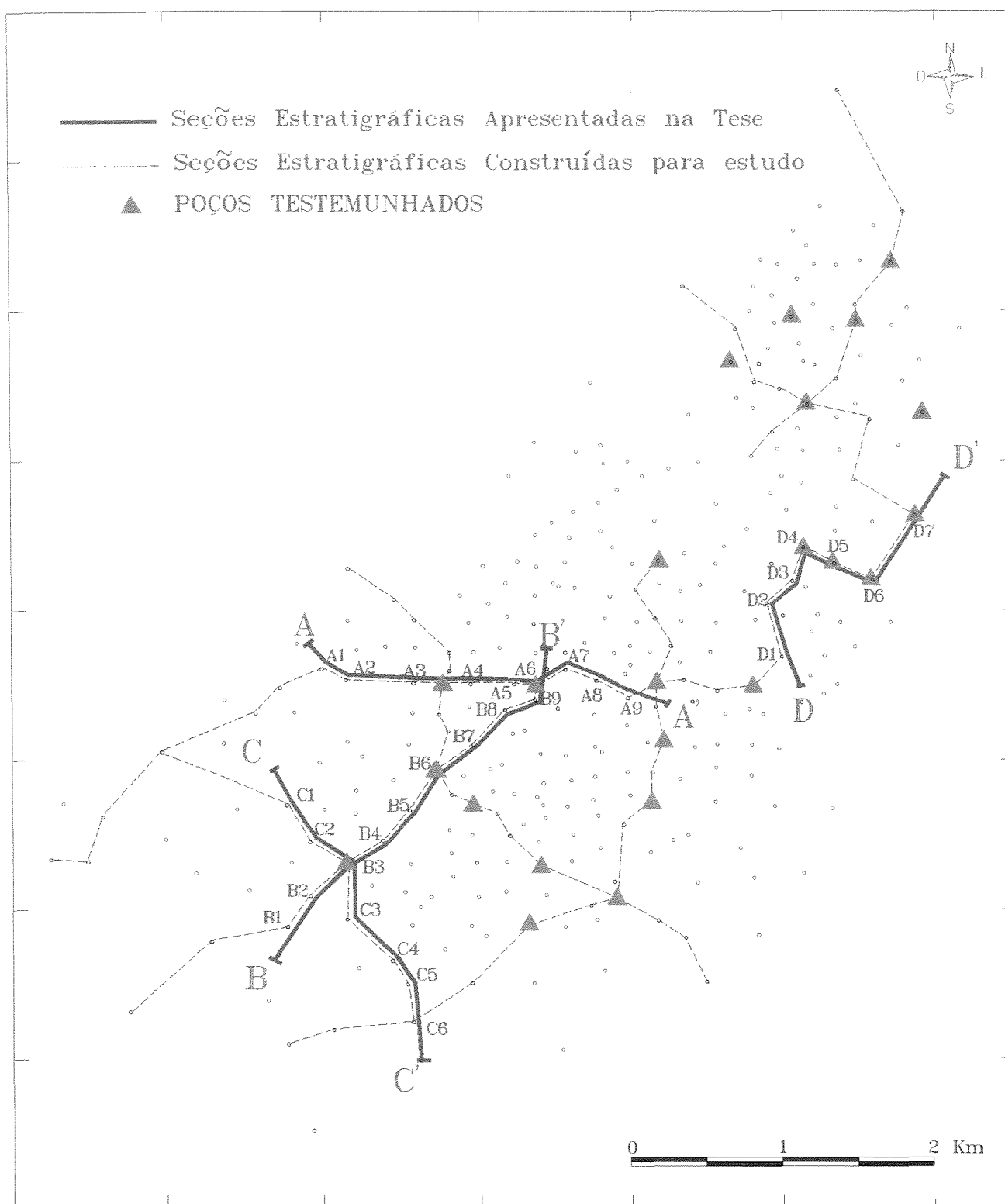


Figura 4.1 - Mapa de localização dos poços e seções estratigráficas.

determinados pontos, para serem identificadas heterogeneidades que não obtiveram resolução na escala adotada.

Após a individualização dos arenitos nas seções e com os resultados da correlação rocha x perfil na definição das frações reservatório / não reservatório, foi elaborado um zoneamento alternativo para o campo com base no reconhecimento dos horizontes estratigráficos mais proeminentes, representados principalmente por superfícies de transgressão lacustre. Em seguida foi feita a identificação das diversas zonas em todos os poços restantes, através da correlação dos seus respectivos perfis com as seções.

Na escolha do intervalo estratigráfico a ser pesquisado, levou-se em consideração o fato de que na época pós-rift (andar Aratu) onde foram depositados os arenitos reservatório em estudo, a bacia atravessava uma fase tectonicamente estável. Num contexto com alta atividade tectônica, a qualidade dos resultados obtidos poderia ser prejudicada pela dificuldade nas correlações, além da atuação de fatores externos ao modelo sedimentar adotado, que serve como sustentação das análises estratigráficas.

É bom lembrar que, devido ao enfoque eminentemente estratigráfico dado a esse trabalho, não foi abordado o comportamento dinâmico do reservatório referente aos fluidos presentes, nem aos problemas do seu comportamento estático devido a falhamentos posteriores. Mesmo assim, existe a possibilidade de ocorrerem valores anômalos em alguns arenitos, causados pelo espessamento sin-sedimentar em bordas de falhas com pequeno rejeito não detectadas. Caso existam, esses pontos são apenas localizados, não prejudicando a modelagem da geometria externa dos corpos arenosos.

Na presente pesquisa foi estudado um grupo de arenitos geneticamente relacionados, que apesar de refletir um alto grau de ciclicidade, distribuem-se arealmente de forma aleatória e representam reservatórios deltaicos bastante importantes no armazenamento de hidrocarbonetos da bacia.

4.2 - TRATAMENTO DOS DADOS

Antes do início da análise estratigráfica, elaborou-se uma triagem dos dados a serem estudados. Foram retirados do mapa base alguns poços

indesejáveis, como por exemplo aqueles que não haviam atingido o horizonte objetivo; os poços gêmeos ou muito próximos uns dos outros; os poços com problemas de qualidade nos perfis; os poços apresentando ausência de algum dos arenitos por falhas posteriores a deposição; e ainda aqueles pertencentes a um determinado bloco estrutural do campo que se encontra separado por uma falha de rejeito oblíquo (com componentes vertical e também horizontal).

Caso o estudo englobasse esse outro bloco, as correlações dos arenitos entre eles estariam prejudicadas devido ao deslocamento horizontal ocorrido, podendo gerar situações de falsa continuidade ou truncamento dos corpos. Com isso, a geometria externa original dos arenitos deltaicos estaria totalmente modificada.

Na elaboração das seções estratigráficas, as 8 fácies definidas na fase inicial foram sintetizadas em 3 grupos de fácies principais (vide no item 4.4), com o intuito de se promover um ajuste da escala de testemunho para a escala de trabalho (figs. 4.2A/B e 4.3A/B).

No zoneamento alternativo adotado para o campo, embora tenham sido reconhecidos de 10 a 12 corpos de arenito, alguns deles foram agrupados em unidades reservatório perfazendo um total de 6 zonas (S1, S2, S3, S4, S5 e S6). O critério principal adotado para tal procedimento, baseou-se na identificação de intervalos pelíticos ou folhelhos determinísticos que pudessem ser rastreados por praticamente toda a área, separando corpos arenosos geneticamente relacionados.

Com o zoneamento definido e identificado em todos os perfis dos poços selecionados para o trabalho, partiu-se para a contagem da espessura de arenito por zona em cada poço, sendo a mesma feita através dos perfis densidade e neutrão (quando existiam), ou então pelos próprios perfis de potencial espontâneo e raios gama.

Numa outra abordagem estratigráfica desse tipo, a depender dos objetivos pretendidos, a quantificação desses dados pode ser mais aprimorada, como a normalização das curvas do perfil de potencial espontâneo, ou mesmo a obtenção das espessuras utilizando programas específicos de tratamento de perfis. No presente trabalho, esse item não foi priorizado devido ao enfoque semiquantitativo proposto inicialmente.

4.3 - ANÁLISE DOS TESTEMUNHOS

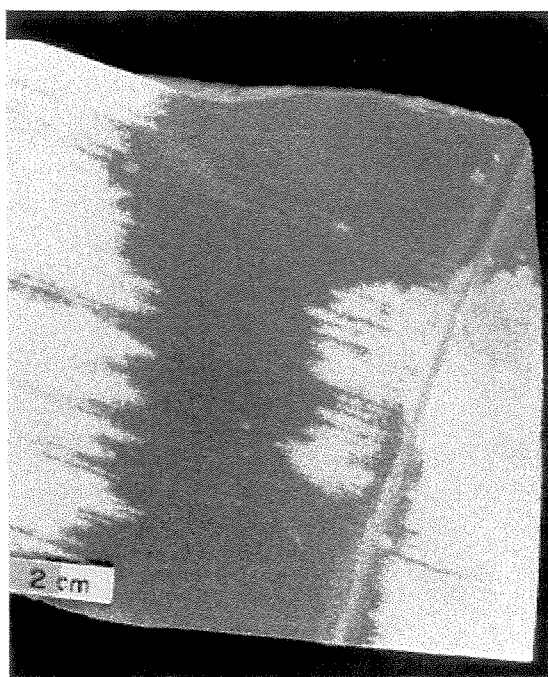
Com a análise dos testemunhos do campo, foram identificadas 8 fácies distintas que estão descritas a seguir:

- **FÁCIES 1** - Arenito fino a muito fino, localmente médio, com laminação plano-paralela (fig. 4.4B) e cruzada de baixo ângulo, localmente maciço, feldspático, micáceo, subanguloso / subarredondado, algo fossilífero (ostracodes), geralmente manchado de óleo. Observa-se a presença de cimento calcífero, ora na base da camada ora em zonas dispersas (fig. 4.4A); e ainda certos níveis de intraclastos e algumas fraturas e micro falhas. Apresenta-se com granulometria homogênea, localmente exibindo estruturas de deformação (*slumps*) e escape de fluidos (fig. 4.4C). Muitas vezes estão presentes delgados leitos arenosos sobrepostos, exibindo ciclos *fining upward* e nível erosional na base do pacote.

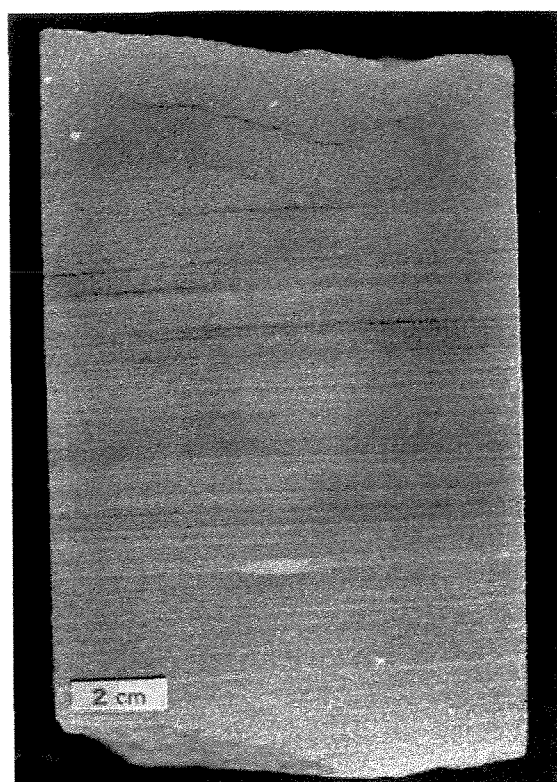
É a principal fácies reservatório, responsável pelas maiores espessuras de arenito na área. Normalmente revela contatos abruptos, por vezes apresentando um horizonte conglomerático na base, onde predominam seixos de folhelho e fragmentos de restos vegetais.

A rápida sedimentação do intervalo estudado, devido ao processo de subsidência bastante ativo na área em associação com o grande aporte sedimentar, está devidamente atestada pela presença marcante de estruturas de deformação nas rochas dessa fácies, bem como pelo aspecto maciço dos arenitos em alguns pontos, adquirido pela destruição das estruturas sedimentares primárias.

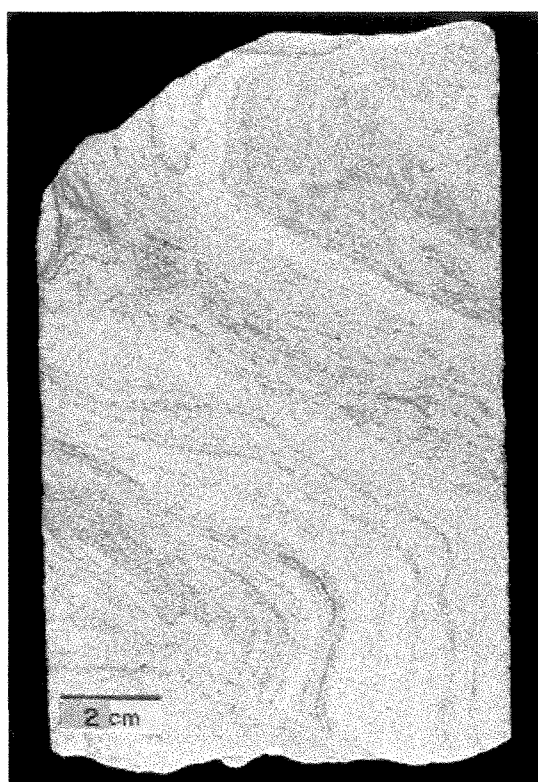
Segundo Coleman & Prior (1982), a boa continuidade dos corpos e também a presença de estratificação plano paralela e cruzada de médio a grande porte nos testemunhos, são indicativos de processos trativos em águas relativamente rasas. Portanto, **os reservatórios da fácies 1 teriam sido depositados num subambiente de frente deltaica, perfazendo lobos deltaicos amalgamados.**



(A)



(B)



(C)

Figura 4.4 - Testemunhos da fácies 1 - (A) Arenito fino com zonas intensamente cimentadas por calcita; (B) Arenito fino com estratificação plano-paralela; (C) Arenito fino com estratificação deformada por escape de fluidos.

FÁCIES 2 - Arenito muito fino a fino, micáceo, localmente feldspático, fossilífero, subanguloso / subarredondado, geralmente manchado de óleo. Apresenta laminação cruzada acanalada de pequeno porte e migração das marcas de corrente (*ripple drift*) definidas por níveis micáceos, de matéria orgânica ou de intraclastos argilosos; localmente com bioturbação, marcas de raízes (fig. 4.5A) e feições de escorregamento (*slump*).

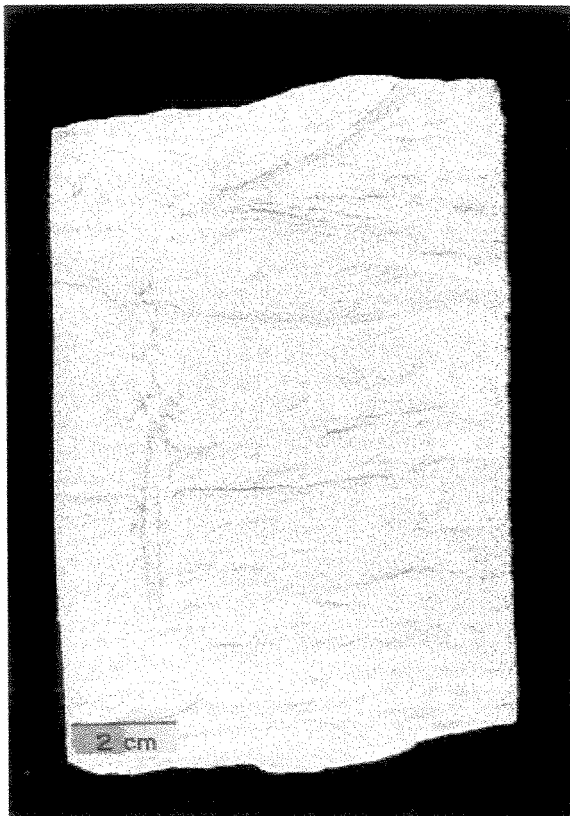
Por indicar um ambiente de energia mais baixa do que os arenitos da fácies 1, esses depósitos são típicos de processos de tração e também de suspensão (Coleman & Prior, 1982; Mato, 1984), com alta taxa de sedimentação, **podendo se constituir tanto de lobos de frente deltaica quanto de depósitos de crevasse ou de rompimento dos diques marginais dos canais distributários por sobre a área interdistributária**, esses últimos quando associados com as fácies 4 e 3.

- **FÁCIES 3** - Arenito muito fino, siltico, intercalado com lamito e / ou silito, algo feldspático, fossilífero (ostracodes), bioturbado. Assim como a fácies 2, apresenta estratificação cruzada acanalada de pequeno porte, migração das marcas de corrente (*ripple drift*), presença de *burrows*, marcas de raízes, restos de matéria orgânica e gretas de contração na base. Foram observadas ainda algumas fraturas (fig. 4.5B) e feições de sobrecarga, como diques de arenito muito fino, bolas e almofadas.

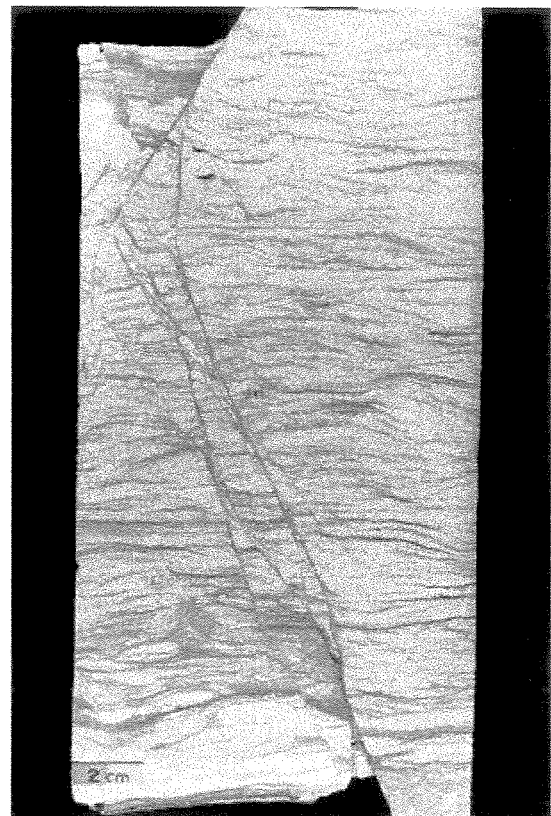
As estruturas encontradas como estratificação cruzada de pequeno porte e migração das marcas de corrente (*ripple drift*) dadas pelos arenitos e siltitos (indicando depósitos de tração e suspensão), associadas a presença de lamitos que são indicativos de depósitos de suspensão (Coleman & Prior, 1982), **sugerem um subambiente de frente deltaica, preferencialmente nas áreas interlobos ou de superposição de limites de lobos.**

Devido a presença de estruturas indicadoras de ambiente *subaéreo* com menor taxa de sedimentação, como **marcas de raízes e bioturbação**, estariam incluídos ainda nessa fácies **depósitos interdistributários.**

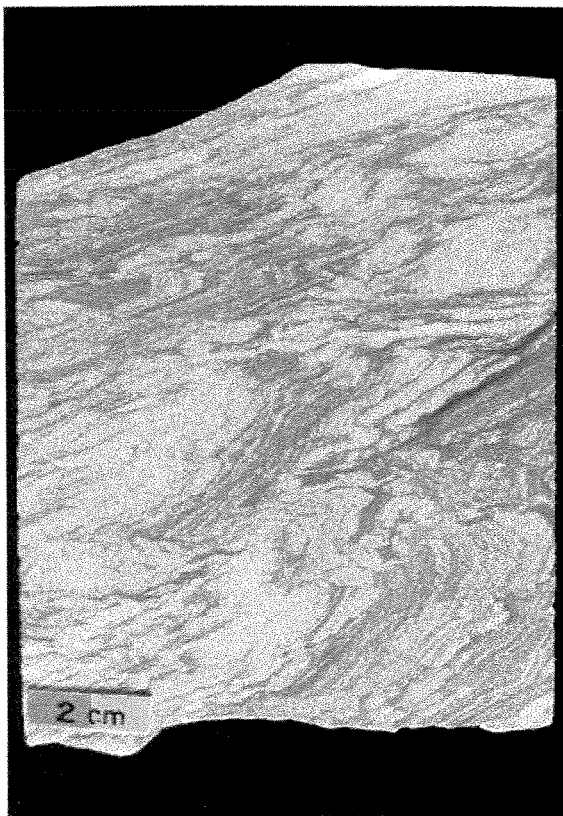
- **FÁCIES 4** - Interlaminado de silito esverdeado, lamito e arenito muito fino, localmente fossilífero / bioturbado (fig. 4.5C). Foram observados *burrows*, marcas de raízes, e algumas estruturas de sobrecarga (bolas e diques de arenito



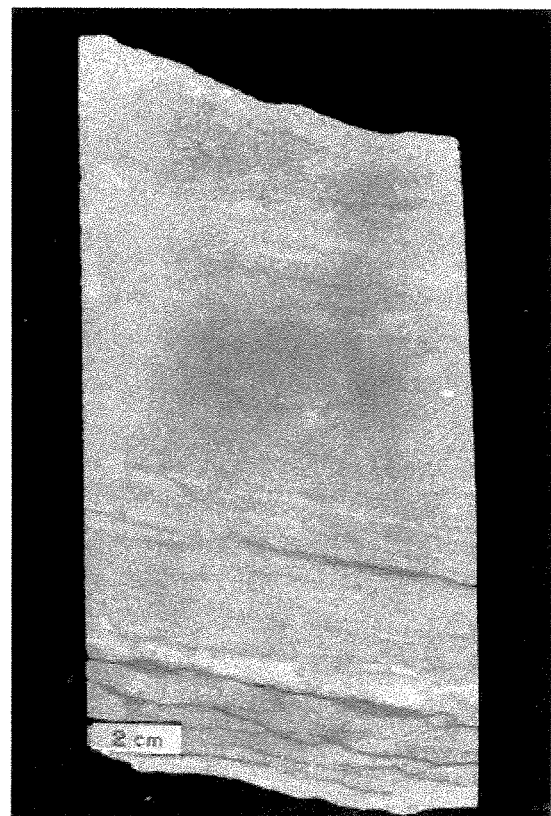
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 4.5 - Testemunhos - (A) Fácies 2 - Arenito muito fino c/ marcas de raízes; (B) Fácies 3 - Intercalações de arenito, lamito e siltito c/ fraturas; (C) Fácies 4 - Intercalações de siltito, lamito e arenito c/ bioturbação; (D) Fácies 5 - Siltito.

muito fino); os arenitos geralmente apresentam estratificação cruzada de pequeno porte e migração das marcas de corrente (*ripple drift*).

Devido a similaridade com a fácies 3, sendo predominante a fração mais fina nessa fácies 4, as estruturas sedimentares semelhantes encontradas apontam para **depósitos de área interdistributária**, e também para **depósitos entre lobos ou de superposição de limites de lobos**.

- **FÁCIES 5** - Siltito cinza esverdeado, algo argiloso (fig. 4.5D), geralmente bioturbado. Apresenta laminação paralela, *burrows* e estruturas de sobrecarga (bolas e diques de arenito muito fino).

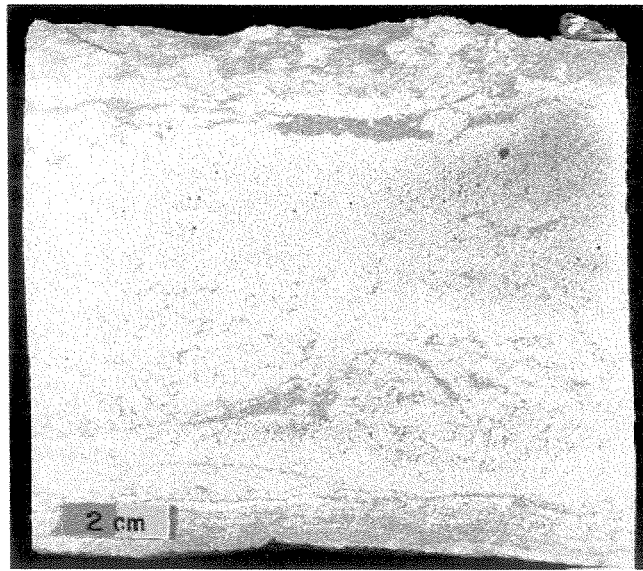
As evidências de ambiente calmo e de baixa taxa de sedimentação dadas pela granulometria fina e pela presença de bioturbação, são indicadoras de **depósitos de áreas interdistributárias**.

- **FÁCIES 6** - Calcissiltito ostracoidal cinza esverdeado (fig. 4.6A), podendo vir acompanhado de pequenos níveis de arenito muito fino, síltico. Essa litofácies de caráter bastante particular se encontra sotoposta aos folhelhos da fácies 7, perfazendo os **sedimentos que antecedem a transgressão do lago sobre o sistema deltaico**.

- **FÁCIES 7** - Folhelho cinza escuro / esverdeado (fig. 4.6C - litologia predominante), fossilífero (ostracodes), algo calcífero, finamente laminado, algumas concreções de calcita e raras de pirita; localmente apresentando restos de matéria orgânica e *slickensides*. Foram observadas algumas intercalações de calcarenito.

A granulometria síltico-argilosa dessa litofácies é típica de ambientes de baixa energia, onde predominam os processos de deposição por gravidade. Consequentemente, essas rochas pelíticas determinísticas estariam relacionadas a **superfícies de afogamento do delta pelo lago do Recôncavo**.

- **FÁCIES 8** - Conglomerado intraformacional composto de intraclastos e matriz lamosa (fig. 4.6B). Essa fácies tem um caráter bastante particular, estando relacionada a seção basal de grande parte dos corpos arenosos, tanto das fácies de

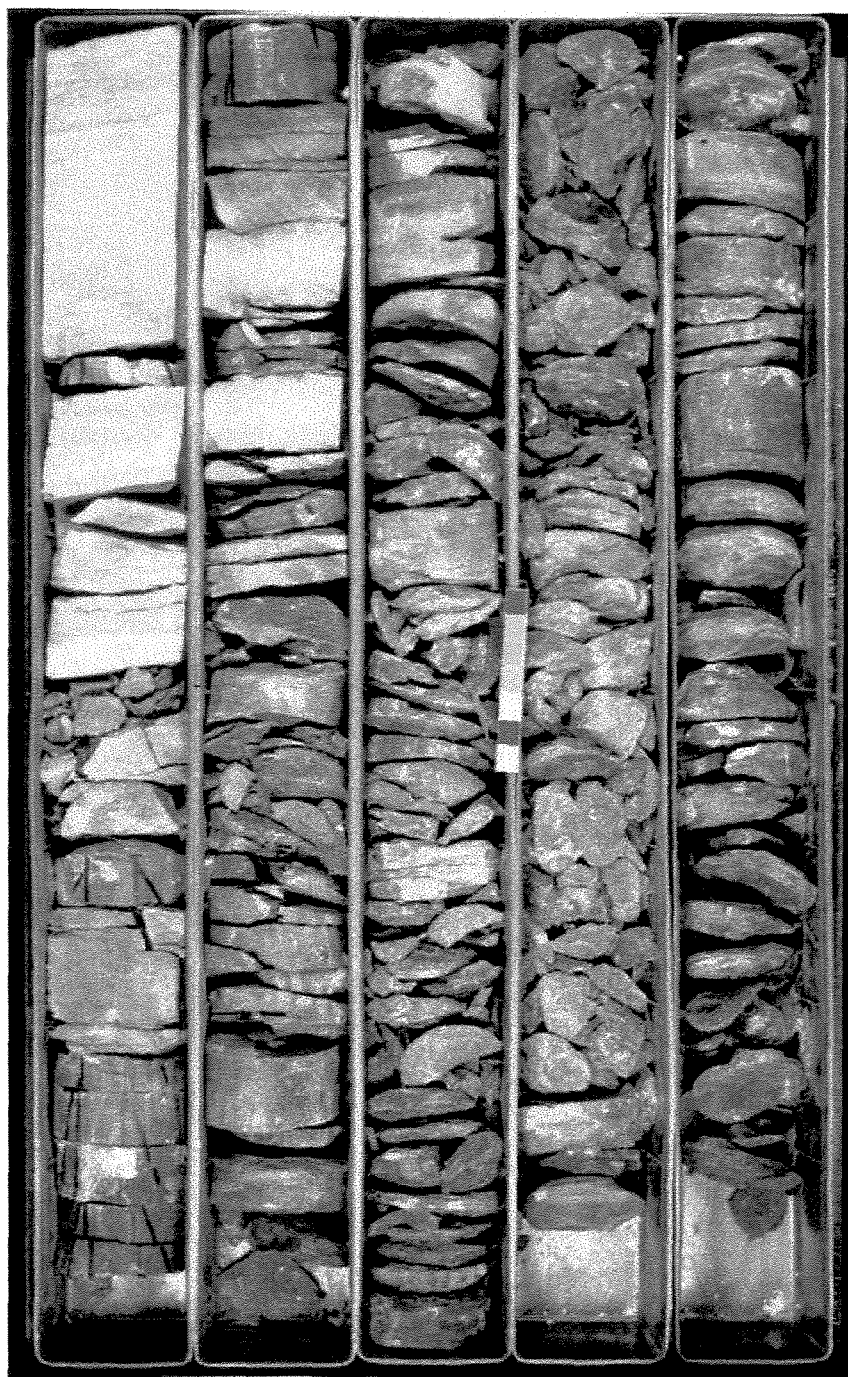


(A)



(B)

Figura 4.6 - Testemunhos - (A) Fácies 6 - Calcissiltito ostracoidal; (B) Fácies 8 - Conglomerado intraformacional c/ intraclastos e matriz lamosa.



(C)

Figura 4.6 - Testemunho - (C) Fácies 7 - Folhelho cinza esverdeado (litologia predominante).

maior quanto de menor energia desse sistema.

Na correlação rocha x perfil, constatou-se a sensibilidade e a boa resposta do perfil de potencial espontâneo na distinção entre as rochas reservatório e não reservatório. Apesar dos valores registrados nesse perfil dependerem do tipo de fluido de perfuração que está interagindo com a rocha (entre outros fatores), e portanto gerando diferentes escalas nos diversos poços, as variações relativas entre os valores máximo e mínimo do potencial espontâneo em cada poço nos fornece uma boa resolução. Na ausência deste, o perfil de raios gama também obteve uma resposta muito boa nesse tipo de definição.

Nos caso de dúvida, o perfil de resistividade prestou um grande auxílio na identificação dos arenitos, devido a se tratar de uma poderosa ferramenta de correlação.

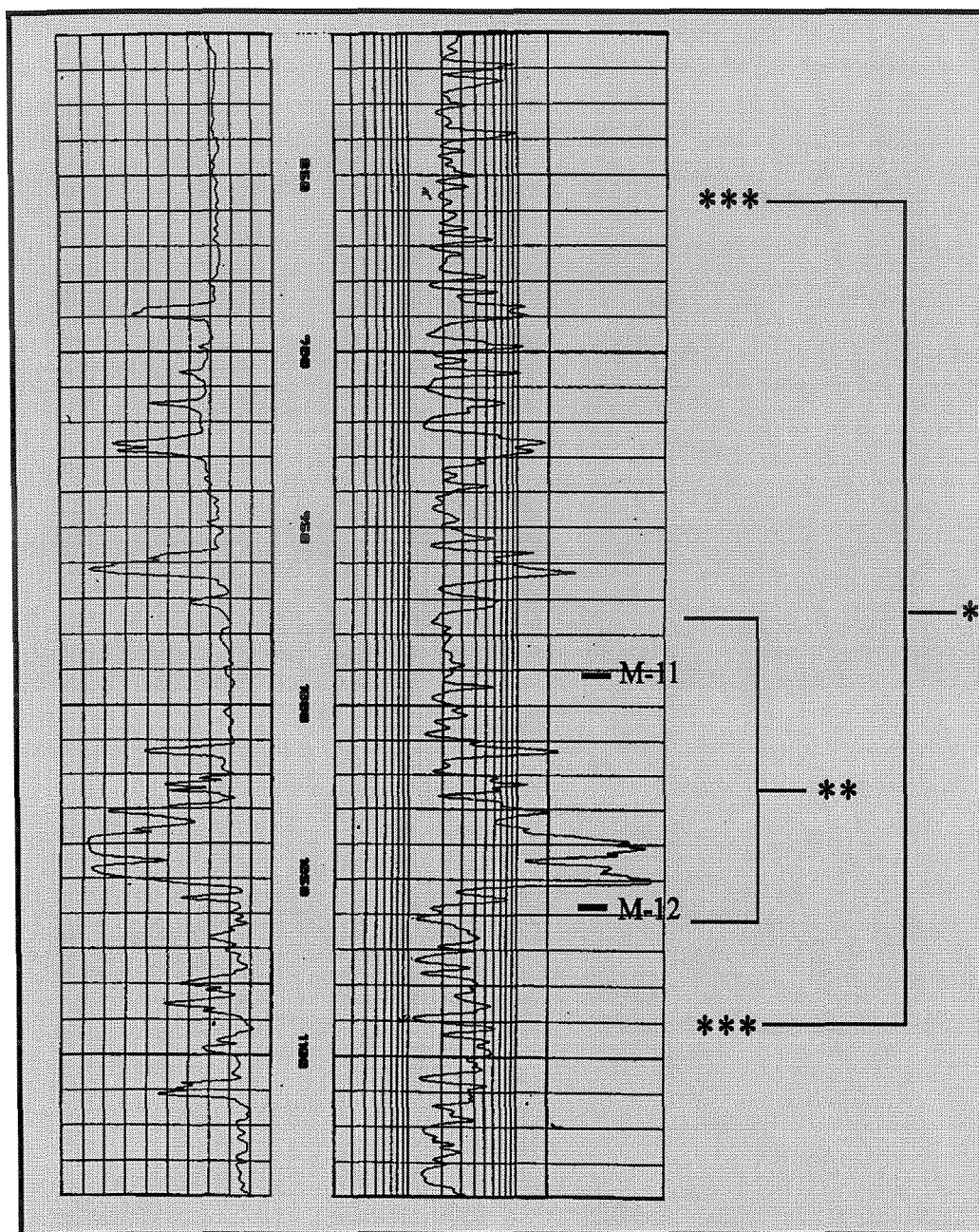
O marco 11, que está no limite superior do intervalo de pesquisa, é uma feição grafoelétrica bem típica, tanto na área de trabalho quanto em quase toda a extensão da bacia (Della Fávera, 1987). Não foi possível a caracterização desse marco através de testemunho, mas sua origem parece ter uma certa similaridade com a do marco 15, feição que se encontra em posição estratigráfica inferior e foi descrita por Mato *et al.* (1992) como composta por biocalcarenitos ostracoidais.

4.4 - SEÇÕES ESTRATIGRÁFICAS

Seguindo os objetivos do trabalho, a análise geológica / estratigráfica da área foi totalmente fundamentada nas seções estratigráficas confeccionadas. Os aspectos tectônicos e os processos dinâmicos dos reservatórios quanto aos fluidos presentes, que poderiam ser revelados através de seções estruturais, não foram abordados.

O datum escolhido para todas as seções foi o marco 11, um importante nível estratigráfico da Bacia do Recôncavo que se encontra logo acima dos arenitos pesquisados. Na base do intervalo de trabalho está presente o marco 12 que, assim como o marco 11, tem boa definição em praticamente toda a área.

Para que se possa ter uma idéia do significado estratigráfico e do contexto em que os arenitos deltaicos em evidência se encontram, pode-se observar (fig.4.7) que o intervalo de pesquisa engloba um subciclo (pulso) que faz parte de



- * - CICLO ESTRATIGRÁFICO
- ** - SUB-CICLO (INTV. ESTUDADO)
- *** - SUPERFÍCIE MÁXIMA DE INUNDAÇÃO DO LAGO

Figura 4.7 - Intervalo de estudo (sub-ciclo) inserido num ciclo estratigráfico completo de transgressão do lago.

um ciclo maior com tendência geral a uma granodecrescência ascendente, limitado por dois horizontes que correspondem a **superfícies máximas de inundação do lago** do Recôncavo. Esses níveis estratigráficos têm uma grande importância nos estudos de estratigrafia de seqüências.

Além das superfícies máximas de inundação do lago e dos marcos 11 e 12, existem alguns horizontes pelíticos contínuos que são relevantes no intervalo de estudo, relacionados a **níveis de afogamento do sistema deltaico pelo meio aquoso permanente** (lago). Essas incursões lacustres são muito frequentes e constituem marcos estratigráficos efetivos na correlação dos corpos arenosos estudados, podendo ser observados nas seções A-A', D-D', B-B' e C-C' com coloração cinza (figs. 4.2A/B e 4.3A/B).

Como já visto, as escalas originais para execução do trabalho foram a nível de detalhe, com exagero vertical de apenas duas vezes (escala horizontal 1:1.000 e vertical 1:500). O espaçamento médio entre as seções ficou em torno de 1 km. Na confecção do texto final desse trabalho, as seções mais representativas da seqüência deltaica foram integradas e digitalizadas em escala reduzida, de acordo com o formato padrão de apresentação. As 4 seções integradas encontram-se posicionadas no mapa da figura 4.1.

Informações como tipos faciológicos reconhecidos nos testemunhos, e intervalos definidos como fração reservatório (fácies 1 e 2) e não reservatório (fácies 3, 4, 5, 6, 7 e 8), foram transportados para as seções que recobriram toda a área. A elaboração dessas seções estratigráficas de alta resolução foi efetuada, inicialmente por correlação dos poços vizinhos com aqueles testemunhados, e em seguida com os demais posicionados no alinhamento das seções.

Objetivando fazer uma mudança da escala macroscópica (testemunho) para a escala semi-regional (campo de petróleo), as 8 fácies reconhecidas em laboratório foram sintetizadas nas seções em apenas 3 grupos distintos de fácies, ou seja:

1^ª) ROCHAS RESERVATÓRIO

Arenitos das fácies 1 e 2, bem como os níveis conglomeráticos da fácies 8 reconhecidos nos testemunhos; representados nas seções (figs. 4.2 e 4.3) com a

simbologia convencional de arenito e pelas seguintes cores: rosa (arenito errático), azul médio (zona S1), marron (zona S2), vermelho (zona S3), laranja (zona S4), amarelo (zona S5) e verde escuro (zona S6).

2º) ROCHAS NÃO RESERVATÓRIO

Intercalações de arenito muito fino, siltito e lamito, das fácies 3 e 4; e também siltitos, e calcissiltitos das fácies 5 e 6; representados nas seções (figs. 4.2 e 4.3) pela cor verde claro;

3º) ROCHAS NÃO RESERVATÓRIO (marcos estratigráficos)

Folhelhos da fácies 7, representados nas seções (figs. 4.2 e 4.3) pela cor cinza.

A pouca atividade tectônica atuante na época, propiciou a deposição das areias deltaicas num ambiente de baixa energia, garantindo uma boa continuidade lateral aos arenitos, com uma tendência geral dos espessamentos e afinamentos a se apresentarem de forma gradativa, além da fraca atuação de processos erosionais.

As superfícies de afogamento das areias deltaicas pela transgressão do lago (seções pelíticas de coloração cinza), têm boa continuidade lateral por quase toda a área, sendo importantes marcos estratigráficos na correlação dos corpos de areia como mencionado anteriormente, podendo estar erodidas em alguns pontos localizados.

Analisando as seções *dip* da área (inclui-se a seção C-C' - fig. 4.3B), pode ser observado que, sempre no sentido SE, os arenitos da zona S5 tendem a um espessamento; a zona S4 permanece com espessura aproximadamente constante; já a zona S2 sofre um afinamento e termina desaparecendo no final da seção. Como já era esperado, pode-se concluir que em seções *dip* o caráter transgressivo do lago fica evidente, promovido pelos folhelhos lacustres de afogamento do delta intercalados aos arenitos, que por sua vez estão com seus limites laterais migrando para NW.

A sedimentação do intervalo estudado foi iniciada com a deposição dos arenitos da zona S6, que não têm muita expressão areal e estão localizados apenas nos baixos propiciados pelas condições de paleorelevo vigente na época (vide poços B5 e B7 da seção B-B' - fig. 4.3A). Logo acima, foram depositados os corpos arenosos da zona S5, representando o reservatório mais expressivo de todo o pacote. A medida que a sedimentação deltaica foi seguindo o seu curso, alguns arenitos foram sendo depositados segundo **arranjos de compensação**, apresentando valores de espessura não muito discrepantes entre si, com exceção da zona S3 que é a mais delgada e da zona S1 que ocorre apenas localmente.

Perpendicularmente ao eixo longitudinal de sedimentação dos depósitos deltaicos (seção *strike* B-B' na direção SW-NE), pode-se identificar alguns elementos de arquitetura da geometria dos conjuntos de lobos. Para as areias de menor espessura, o poço B6 funciona como um divisor desses conjuntos, pois pode-se observar os limites laterais dos arenitos das zonas S2 e S3, que começam a surgir quando se caminha nos dois sentidos opostos (SW e NE) da seção, estando ausentes no referido poço. A análise dos testemunhos mostra rochas não reservatório da fácies 4 (siltitos, lamitos e arenitos muito finos intercalados) nesse trecho do poço B6, gradando lateralmente para os arenitos reservatório das fácies 1 e 2 nos poços vizinhos, ao longo da seção em referência. No caso da zona S5, as areias não deixaram de ocorrer nesse poço B6, porém sofreram uma redução na sua espessura total. Esse tipo de situação ilustra bem a impossibilidade de definição dos limites externos da zona S5 na área de estudo.

Em seções oblíquas ao eixo longitudinal dos depósitos deltaicos (seção A-A' - fig. 4.2A), também são detectados alguns elementos da geometria dos conjuntos de lobos, como os limites e até algumas envoltórias dos corpos arenosos, a depender da presença ou não de determinada zona no corte da seção. É evidente que, **para se ter uma idéia quantitativa da dimensão de um lobo** (arenitos localizados) **ou de um conjunto de lobos** (corpos arenosos de maior continuidade nas seções), **é preciso certificar-se de que a posição de observação seja aproximadamente perpendicular ao eixo principal de deposição dos lobos** (válido para o presente caso, pois na própria direção do eixo principal os limites dos corpos não são detectados). Como esse eixo não assume uma direção fixa ao longo de toda a área, **ferramentas como a variografia**

podem ser usadas para modelar fenômenos geológicos como estes, **fornecendo informações como a direção média do eixo longitudinal de sedimentação dos depósitos e também a largura média dos conjuntos de lobos**, como será abordado mais adiante.

4.5 - SISTEMA DEPOSICIONAL

Em alguns trabalhos antigos sobre deltas, onde não eram considerados os conceitos modernos de estratigrafia nem a importância dos processos de subsidência nesse tipo de ambiente, os arenitos que exibissem contato basal gradativo eram atribuídos a barras de desembocadura de canais distributários; enquanto aqueles com base erosiva estariam relacionados a depósitos de canais distributários, como é o caso de Horschutz (1971). O mesmo trabalho também sugere que, os arenitos que se revelam mais desenvolvidos nas seções do topo e da base, com os respectivos contatos gradacionais, e ainda apresentem um padrão serrilhado de perfis na seção intermediária, estariam relacionados a depósitos de área interdistributária.

O conceito de depósito de canal (válido tanto para sistemas deltaicos quanto para outro ambiente sedimentar qualquer), vem sendo amplamente debatido pela comunidade científica na modelagem de reservatórios, gerando várias correntes de interpretação e também o questionamento de algumas idéias.

É aceito hoje em dia que um **canal** contendo um fluxo aquoso dinâmico, mesmo transportando certa carga sedimentar, constitui-se preferencialmente de uma **zona de passagem** de sedimentos. Apesar disso, existem exemplos de depósitos típicos de canais que conseguiram ser preservados; enquanto outros que poderiam ter existido, sofreram um processo de erosão promovido pelo próprio canal. Aliás, o caráter erosivo de um canal é amplamente atestado pela particularidade primária de seus depósitos que revelam truncamento na base, indicando a necessidade de **criação de espaço** para que a deposição seja implantada (Bruhn, 1995). Entre outras características, espera-se ainda para esses depósitos arenitos com granulação grosseira e pouca extensão lateral. Não foi o caso do intervalo abrangido pelo presente estudo, pois além da granulometria fina a muito fina e da boa continuidade, as bases erosionais dos corpos arenosos,

embora presentes com uma certa frequência, foram consideradas como de ocorrência localizada.

No trabalho de Rodrigues (1985) sobre o Arenito Araçás (também pertencente a Formação Pojuca) da Bacia do Recôncavo, os principais reservatórios foram interpretados como lobos amalgamados depositados na planície deltaica (área interdistributária) por avulsão dos canais, e ainda depósitos de *crevasse*, barras e depósitos de diques marginais (*levees*). Além disso, foi levantada a possibilidade da origem de alguns dos reservatórios ter sido por correntes de turbidez.

É conveniente mencionar que houve uma época na história da interpretação geológica da bacia, onde os reservatórios em questão eram tidos como leques subaquosos. Alguns artigos foram publicados baseados nessa hipótese, como é o caso de Netto *et al.* (1984) e Souza & Paz (1984). Contudo, contínuos estudos realizados *a posteriori* em diversas áreas da bacia, mostraram evidências de uma sedimentação subaérea para os arenitos desse horizonte estratigráfico, basicamente pela presença de **marcas de raízes** (fig. 4.5A), e ainda pela abundância de **estruturas de tração** que ocorrem nos reservatórios arenosos.

A classificação de Galloway (1975), onde um diagrama ternário exhibe os tipos de deltas dominados por rios, ondas ou marés em cada um dos vértices (fig. 3.3), é utilizada pela comunidade científica até os dias de hoje, porém com algumas restrições. Nos estudos atuais, tem-se a consciência de que alguns aspectos adicionais devem ser considerados na caracterização do ambiente de pesquisa, em particular com relação aos **processos** que podem afetar direta ou indiretamente a formação dos **produtos** (depósitos) gerados. Sabe-se de antemão que, nos vários subambientes que constituem os complexos deltaicos, a combinação de alguns desses processos resulta numa enorme variedade de depósitos. Dentre eles, podem ser citados os processos *autocíclicos* (internos a bacia), como por exemplo o amalgamento de lobos na frente deltaica e o retrabalhamento dos depósitos por ondas ou marés; e os processos *alocíclicos* (externos a bacia), como o clima, a temperatura, o tectonismo e as oscilações do nível do mar/lago, sendo importante uma análise global de todos os ambientes sedimentares contíguos que compõem o contexto geológico em questão.

O sistema deltaico de sedimentação é caracterizado por um fluxo aquoso

dinâmico carregando sedimentos continentais, que sofre uma **desaceleração** ao encontrar um meio aquoso permanente, formando assim os seus depósitos. Nesse ambiente, o fluxo de água mais a carga sedimentar chegam através de canais distributários que, na maioria dos casos, representam áreas de passagem e consideram a bacia de deposição um obstáculo para prosseguir o seu curso. Como essas áreas de interação entre os dois meios são geralmente amplas, os sedimentos **deltaicos** encontram aí as melhores condições para formar os seus depósitos, ou seja, na **frente deltaica**. No caso de deltas dominados por rios, ocorre a **amalgamação** e o **espraçamento** de espessos conjuntos de corpos lobados nessa área.

As frentes deltaicas e também os demais subambientes do sistema deltaico têm sido amplamente estudados nas últimas décadas, devido a similaridade dos modelos de sedimentação do recente com aqueles formados no passado. Há alguns anos atrás, pesquisas mostraram o alto grau de ocorrência de processos de **subsidência** e **deformação** que sofrem as rochas formadas na frente deltaica. Foi observada ainda a importância de se conhecer os processos atuantes no encontro do fluxo dinâmico dos canais distributários com o meio aquoso receptor, onde o contraste das condições de densidade nos dois meios tende a formar diferentes tipos de depósitos.

Pelos dados apresentados até o momento, pode-se considerar que o sistema deltaico estudado foi depositado num período de pouca atividade tectônica, num ambiente de baixa energia, atestada pela granulometria fina a muito fina e pela abundância de estratificação cruzada de pequeno porte presente nos arenitos. Pode-se afirmar também que o processo de deposição da carga sedimentar trazida pelos canais distributários estava favorecido, pois o meio aquoso receptor era na época o lago do Recôncavo, o que dava ao delta um caráter de dominância do rio para a deposição dos lobos deltaicos. Essa hipótese é atestada pelas **estruturas unidirecionais de corrente** (*ripple drift*) encontradas, descartando-se a possibilidade de erosão desses depósitos por retrabalhamento de ondas ou marés.

A atuação dos processos de subsidência e retrabalhamento por erosão localizada é evidenciada pelas inúmeras estruturas sedimentares reveladas, como feições de sobrecarga (bolas, almofadas, pseudo-nódulos e diques de arenito), e *slumps*, que associadas a presença marcante dos processos de escape de fluidos

revelados pelos arenitos da fácies 1, evidenciam o grande aporte sedimentar proveniente dos canais distributários e o rápido soterramento desse material.

A partir das análises de testemunhos elaboradas no presente trabalho, além de levar em conta os estudos geológicos realizados na área, pode-se definir a grande maioria dos reservatórios em foco como sendo **conjuntos ou agrupamentos de corpos lobados formados pela amalgamação das barras de desembocadura de canais distributários na frente deltaica e, secundariamente, de acumulações provenientes do rompimento dos diques marginais dos canais distributários (*crevasse*)**. Segundo Mato (1984), a associação faciológica presente e suas relações apontam para um modelo sedimentológico análogo ao sistema de lobos deltaicos da porção norte do Lago de Turkana, região dos *rift-valleys* africanos (Friedman & Sanders, 1978).

Devido aos depósitos de *crevasse* se apresentarem agrupados com os arenitos de lobos deltaicos, e também como camadas delgadas de arenito intercaladas com rochas pelíticas dos depósitos interdistributários, não foi possível isolar os dois tipos de reservatórios na escala utilizada nesse trabalho.

A análise dos testemunhos revelou que as rochas reservatório do intervalo em questão são facilmente diferenciadas macroscopicamente, e que estão representadas por arenitos finos com laminação plano paralela e cruzada de baixo ângulo da fácies 1, e arenitos muito finos com laminação cruzada acanalada de pequeno porte e migração de marcas de corrente (*ripple drift*) da fácies 2. A partir daí, a correlação dos poços testemunhados com os vizinhos alinhados nas seções estratigráficas é boa, uma vez que a correlação rocha x perfil elaborada no início do trabalho atestou a boa resolução dos perfis na identificação das rochas reservatório e não reservatório.

As rochas não reservatório / pelíticas correspondentes aos arenitos muito finos intercalados com lamitos e/ou siltitos da fácies 3, interlaminação de silito, lamito e arenito muito fino da fácies 4, siltitos da fácies 5, calcissiltitos da fácies 6 e conglomerados da fácies 8, estão representadas nas seções pela coloração verde clara (figs. 4.2 e 4.3). Têm abrangência restrita e são interpretadas como **rochas depositadas nas áreas interdistributárias**.

Ainda no grupo das rochas não reservatório, os folhelhos cinza escuros da fácies 7, identificados pela coloração cinza nas seções (figs. 4.2 e 4.3),

representam os depósitos distais e são atribuídos a períodos de afogamento do sistema deltaico pelo lago do Recôncavo.

Essas superfícies de inundação do lago são importantes para o presente estudo, pois além da ampla abrangência, representam linhas de tempo e constituem bons pontos de amarração na correlação dos corpos arenosos e na definição do zoneamento. Como já mencionado, na aplicação de algoritmos de geoestatística para modelagem da geometria externa de reservatórios, é de real importância que se esteja dentro de um intervalo geneticamente bem definido, pois além da maior confiabilidade dos resultados evita-se fazer inferências sobre a variabilidade de corpos distintos, gerados por diferentes processos.

4.6 - GEOMETRIA E HETEROGENEIDADES DE RESERVATÓRIO

Um dos maiores problemas enfrentados pelos profissionais da geoengenharia, é a identificação das heterogeneidades internas dos reservatórios, que são responsáveis pelas restrições tanto horizontais quanto verticais ao fluxo de fluidos presentes. Segundo Weber (1990), existem 3 tipos de heterogeneidades nos reservatórios: **sin-deposicionais**, **diagenéticas** e **estruturais**.

Com base nos resultados de vários trabalhos realizados em reservatórios deltaicos da bacia, sabe-se de antemão que os mesmos foram afetados de forma branda por processos diagenéticos. Dessa maneira, partiu-se do pressuposto que as **heterogeneidades diagenéticas** presentes nos reservatórios estudados assumem um papel secundário no que se refere a barragem do fluxo de fluidos.

Baseando-se no trabalho de Mato (1984), que fez um estudo petrográfico nos arenitos deltaicos dessa sequência, a evolução diagenética reconstituída para esses reservatórios arenosos seria composta de 5 fases, ou seja: compactação mecânica; crescimento secundário de quartzo e feldspato; corrosão, substituição de alguns grãos e cimentação do espaço intergranular por calcita espática; criação de porosidade secundária pela dissolução parcial a total do cimento calcífero; preenchimento parcial dos poros por caulinita e, secundariamente, envolvimento

dos grãos por filmes de clorita e illita / esmectita.

Segundo Mato (1984), das fases diagenéticas mencionadas a que melhor se preservou nos arenitos deltaicos do Recôncavo foi a geração de porosidade secundária, que é responsável pelos baixos teores de cimento total e, conseqüentemente, pelos altos valores de porosidade presentes nos reservatórios.

A nível macroscópico, também pode-se constatar o grau secundário da atuação das heterogeneidades internas diagenéticas nos reservatórios através da análise dos testemunhos, e também com auxílio das correlações feitas pelas seções. Foram observadas algumas zonas cimentadas dispersas dentro dos arenitos (fig. 4.4A), bem como níveis horizontais de arenito contínuos lateralmente, cimentados por calcita e com espessura bastante reduzida. Esses níveis de cimentação horizontal estão preferencialmente localizados na base de alguns corpos.

Existem poucas referências sobre as **heterogeneidades estruturais** de reservatórios, provavelmente por um problema de escala, pois os métodos convencionais de identificação dos elementos estruturais atuantes numa determinada área de estudo têm boa resolução nas escalas regional e semi-regional. Na escala microscópica, é possível se obter algumas informações dos elementos estruturais existentes nos reservatórios, como a presença de fraturas ou micro-falhas no seu arcabouço rochoso, por exemplo. Na escala de reservatório, embora os geólogos e engenheiros tenham plena consciência do importante papel que as heterogeneidades estruturais desempenham na barragem ou até na facilitação do fluxo de fluidos, a identificação desses elementos é uma tarefa bastante difícil. No caso de estudo, as heterogeneidades estruturais que podem estar presentes são basicamente falhas de crescimento com rejeito de pequeno a médio, decorrentes da frequente atuação dos processos de subsidência a que a frente deltaica está submetida. Foram reconhecidos nos testemunhos alguns desses elementos estruturais como falhas de pequeno rejeito, e também várias estruturas de escorregamento.

Sem dúvida alguma, as **heterogeneidades sin-deposicionais** foram as que mais afetaram os reservatórios deltaicos da área. Durante a etapa de caracterização estratigráfica do intervalo em foco, identificou-se algumas delas. Outras possíveis heterogeneidades também foram observadas.

As superfícies de inundação do lago mencionadas em parágrafo anterior, por delimitarem rochas pelíticas determinísticas, podem ser consideradas como barreiras verticais ao fluxo de fluidos, salvo em locais onde estejam erodidas. As demais rochas pelíticas, que fazem parte da seção não reservatório e se encontram intercaladas aos arenitos, podem funcionar como barreiras verticais apenas localizadamente, devido ao caráter pouco contínuo com que se apresentam.

Uma heterogeneidade do reservatório de especial importância são as superfícies erosionais encontradas na base de alguns dos corpos arenosos. Por vezes, esses truncamentos estão acompanhados de conglomerados intraformacionais compostos por intraclastos e matriz lamosa. Esse tipo de heterogeneidade foi também observada em arenitos de menor energia, formando delgados leitos centimétricos amalgamados, cada qual apresentando uma base com truncamento erosional e granodecrescência ascendente, o que retrata um caráter cíclico do pacote. Outros arenitos revelaram um contato basal gradacional, refletindo uma mudança suave de rochas pelíticas de subambiente interdistributário ou prodelta para arenitos de frente deltaica, o que atesta a atuação do caráter erosivo apenas localmente, como é esperado para depósitos formados por lobos deltaicos. Portanto, apesar de não serem contínuas ao longo de toda a ocorrência de determinado corpo de arenito, essas superfícies erosionais basais devem ser consideradas como restrições ao fluxo vertical de fluidos no reservatório.

As variações texturais também constituem heterogeneidades internas. Verticalmente, reduções da granulometria, tanto ascendentes quanto descendentes, limitam a fração reservatório do arenito a um determinado corte de porosidade (o valor de 11% vem sendo o mais aceito para a área). Pelo mesmo motivo, é conveniente manter o controle sobre a variação lateral das fácies reservatório (fig. 4.3A - seção B-B'), pois os lobos de frente deltaica geralmente possuem uma granulometria mais grossa no centro do corpo e uma tendência de afinamento para as bordas. Esse limite lateral da fração reservatório nem sempre coincide com a passagem do lobo para a área interlobos.

Na busca de caminhos de melhor escoamento de fluidos através dos reservatórios, pode-se associar esses elementos geométricos descritos com direções subparalelas ao eixo longitudinal de deposição dos conjuntos de lobos,

onde geralmente existe uma maior constância textural dos arenitos e, conseqüentemente, uma tendência de condições permoporosas mais promissoras.

Eventuais variações no arranjo e na textura dos reservatórios causadas pela imposição das estruturas sedimentares, como escape de fluidos, bioturbação, estratificação cruzada ou diques de arenito, podem prejudicar o fluxo de fluidos. No entanto, de uma maneira geral, não têm uma continuidade lateral suficiente para formar barreiras efetivas.

Alguma atenção também deve ser dada aos níveis fossilíferos ou de restos vegetais e leitos de carvão, que por vezes estão posicionados na base dos estratos arenosos em associação aos níveis conglomeráticos, podendo vir a constituir pequenas restrições ao fluxo, embora com tendência a ocorrer apenas localmente.

A geometria interna de corpos rochosos está relacionada aos elementos do arcabouço do reservatório, onde as heterogeneidades ou barreiras ao fluxo de fluidos são em muitos casos detectados através de análises petrográficas. Devido a se encontrar numa outra escala de trabalho, a geometria interna dos reservatórios deltaicos foi abordada apenas em alguns aspectos.

No desenvolvimento de um trabalho de caracterização estratigráfica e modelagem da geometria externa de reservatórios, em qualquer ambiente sedimentar de deposição, é necessário ter-se em mente alguns conceitos básicos. Segundo Galloway & Hobday (1983), **“a arquitetura de um depósito compreende as relações espaciais tridimensionais das fácies e superfícies dos estratos, num intervalo estratigráfico genético”**. Pode-se destacar como elementos de arquitetura da geometria externa de corpos rochosos os limites físicos de topo/base e laterais, tipos desses limites, formas, dimensões, direções de maior e menor continuidade das espessuras, e relações com os elementos de corpos vizinhos (geneticamente relacionados ou não).

Numa seção paralela ao eixo de deposição (*dip*), a geometria esperada para os reservatórios como um todo seria a de corpos sigmoidais de grande porte, envolvendo os depósitos da planície deltaica, frente deltaica e prodelta (fig. 4.3B - seção C-C'). Analisando-se a referida seção estratigráfica, que se encontra aproximadamente nessa posição, não foi possível identificar-se a geometria de uma sigmóide do sistema deltaico. Em outras palavras, não se dispõe de uma “envoltória” completa representada na área, incluindo todos os

subambientes do delta, na presente escala de trabalho. Por sua vez, o exagero da escala vertical das seções de apenas duas vezes e também o próprio baixo ângulo do gradiente em que os reservatórios se encontram, tornam as variações de espessura muito suavizadas, dificultando a visualização de sigmóides.

Já numa seção perpendicular ao eixo principal de deposição (*strike*), não existe um padrão típico esperado para a geometria dos depósitos deltaicos (fig. 4.3A - seção B-B'), como nas seções *dip*. Nessa direção de menor continuidade do corpo rochoso, a geometria externa vai depender de vários fatores, como taxas de sedimentação e subsidência, condições de paleorelevo, existência ou não de espaço para deposição, processos de interação entre o fluxo do canal e o meio receptor; que por sua vez irão influenciar na granulometria, volume e formato do depósito. Em geral, espera-se para a “envoltória” de todo esse agrupamento de lobos amalgamados, um corpo de forma aproximadamente lenticular, mais espesso no centro e com afinamento para as bordas. Observa-se que a disposição dos corpos arenosos presentes na seção estratigráfica em referência, sugere uma tendência para esse tipo de geometria externa.

Alguns desses limites das amalgamações de lobos estão representados nos mapas de proporção de espessura de arenito das zonas S2, S3 e S4 (figs. 4.9, 4.10 e 4.11). Pode-se perceber que na direção *dip*, ou de maior continuidade do fenômeno geológico (aproximadamente NW-SE), geralmente é difícil se estabelecer os limites, tanto dos conjuntos de lobos quanto das áreas interlobos. Esses limites podem existir fora da área de pesquisa ou, no caso de erosão dos depósitos, podem não existir na realidade. A geometria externa de forma alongada para os conjuntos de lobos amalgamados, orientados segundo seus respectivos eixos principais, encontra-se dentro do que se espera para depósitos originados por um complexo deltaico dominado por rio. Já na direção *strike* ou de menor continuidade (aproximadamente SW-NE), os elementos da geometria desses corpos (no caso os limites) podem ser visualizados tanto nas seções quanto nos mapas, para a escala adotada nesse trabalho. Observa-se nos mapas que as áreas interlobos, na verdade constituem áreas de recobrimento entre duas áreas de conjunto de lobos deltaicos.

Em relação aos conjuntos de lobos amalgamados de maior espessura, que é

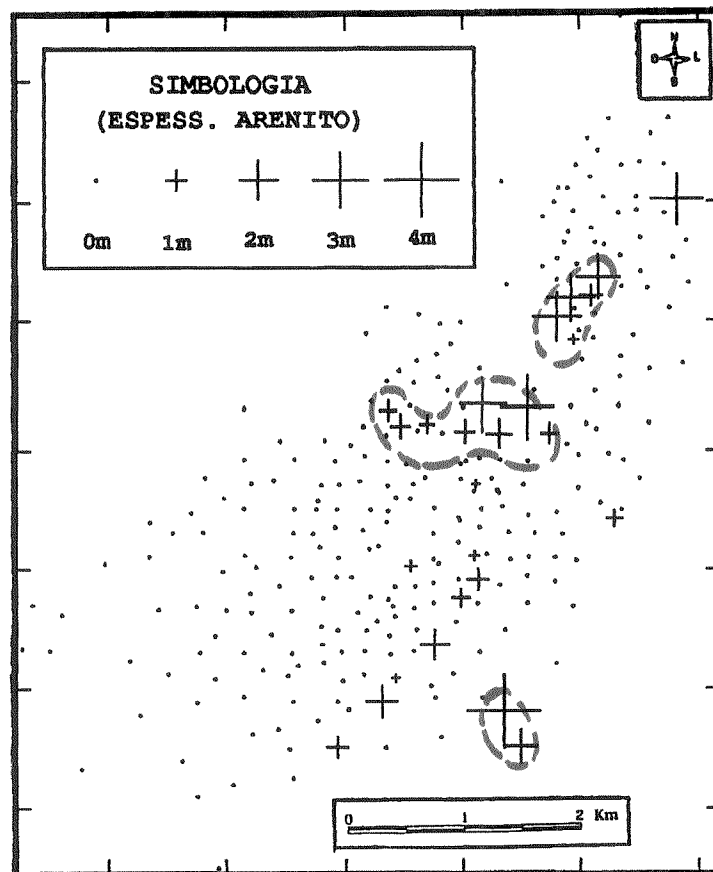


Figura 4.8 - (S1) Mapa base com valores proporcionais de espessura.

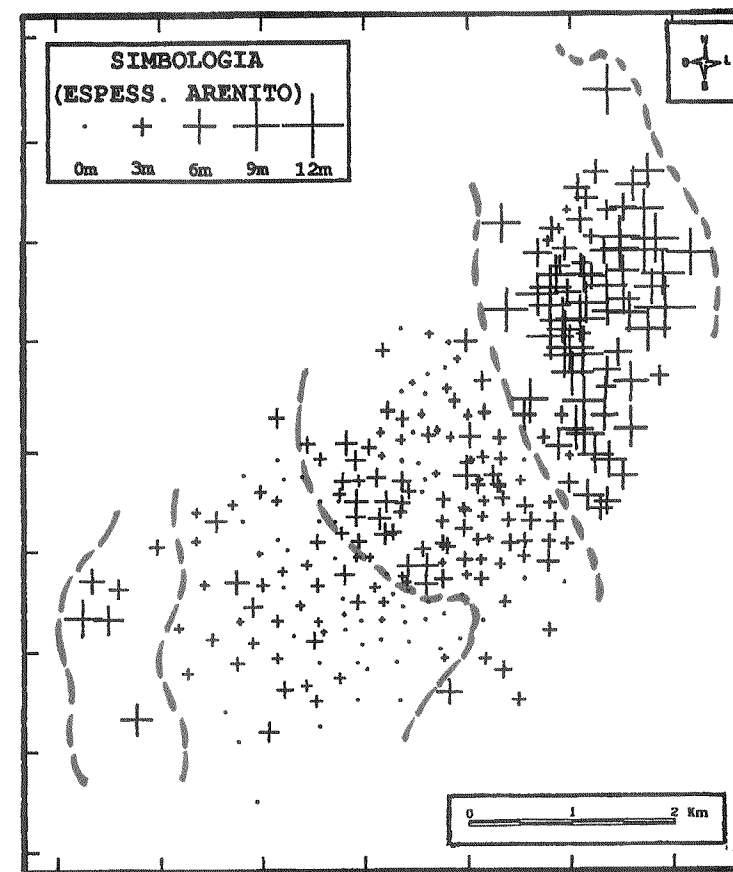


Figura 4.9 - (S2) Mapa base com valores proporcionais de espessura.

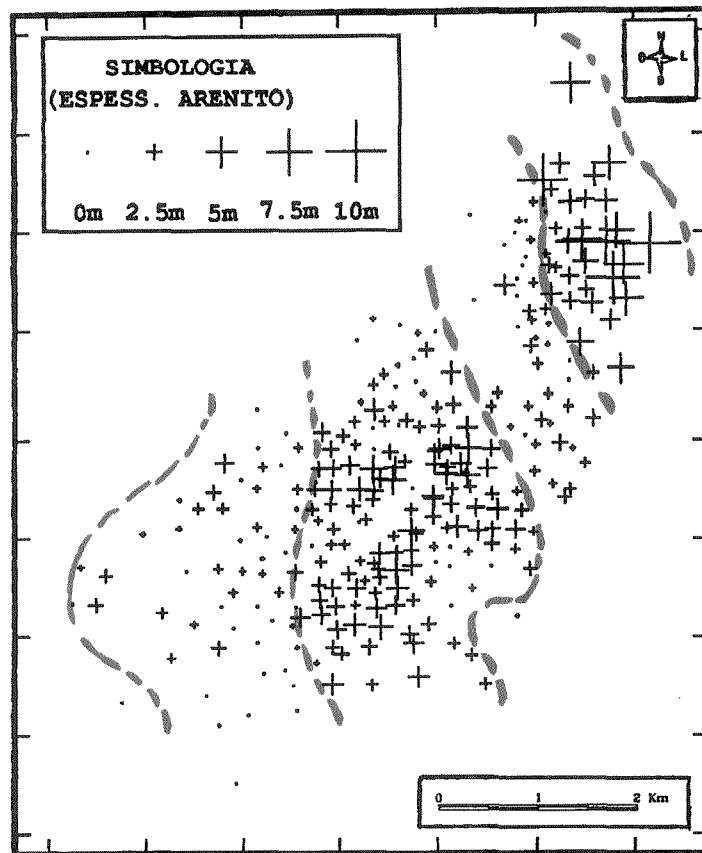


Figura 4.10 - (S3) Mapa base com valores proporcionais de espessura.

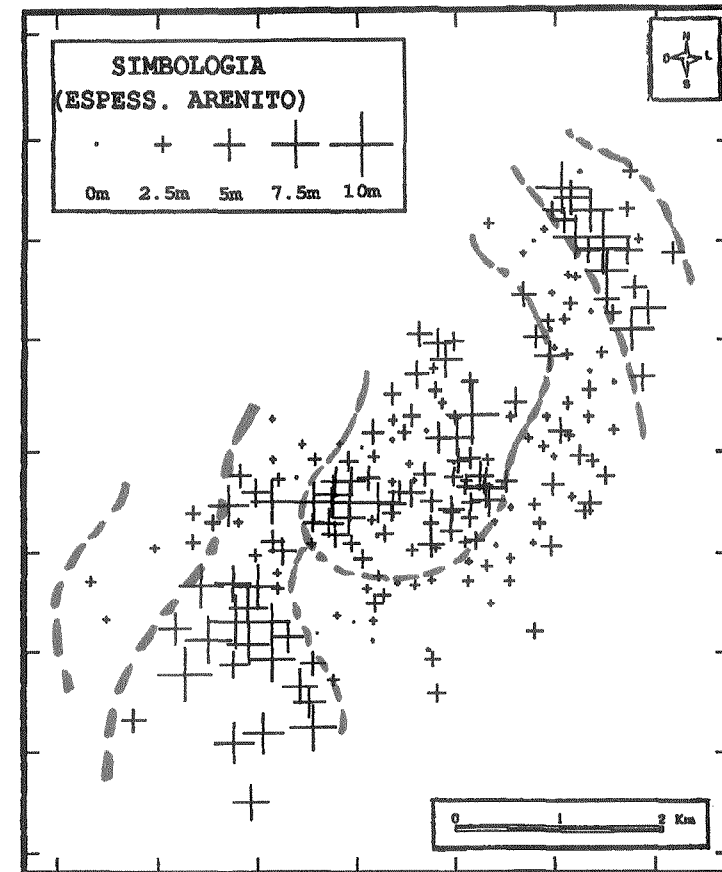


Figura 4.11 - (S4) Mapa base com valores proporcionais de espessura.

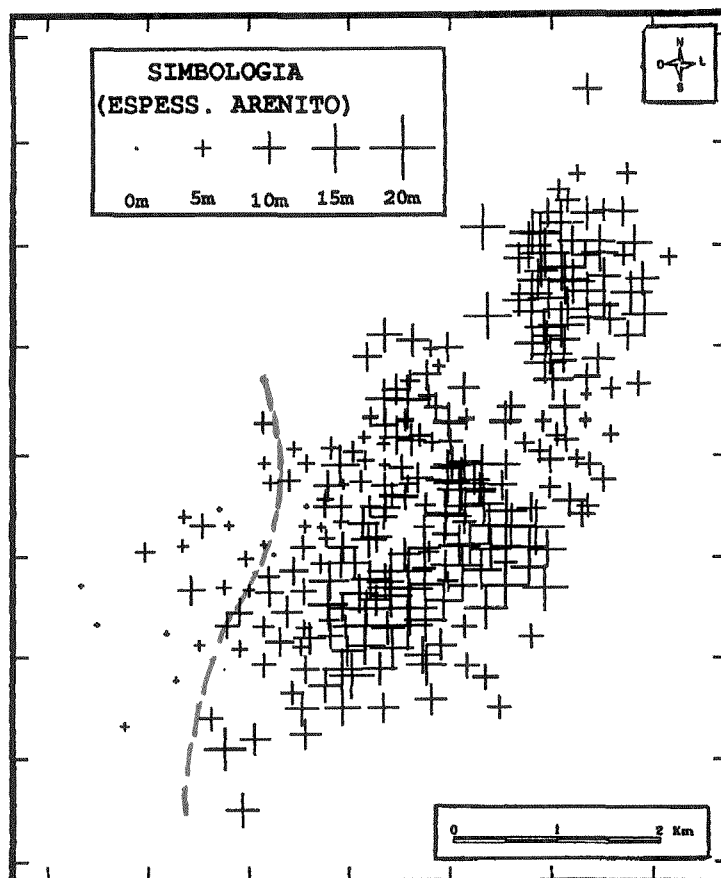


Figura 4.12 - (S5) Mapa base com valores proporcionais de espessura.

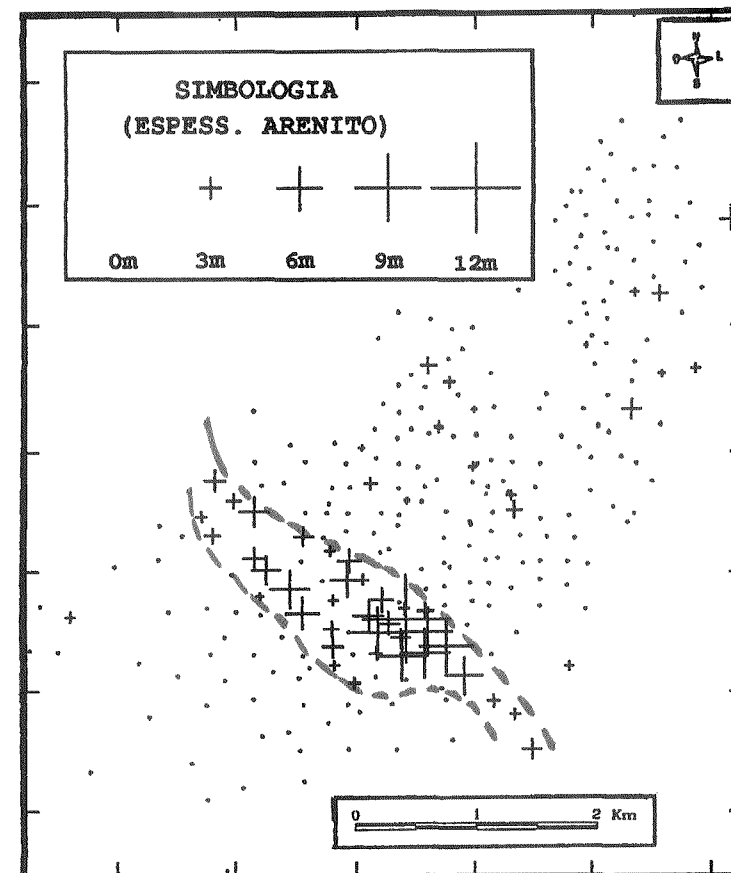


Figura 4.13 - (S6) Mapa base com valores proporcionais de espessura.

o caso da zona S5 (fig. 4.12), nota-se que os altos valores dos pontos amostrais resultam num mapa proporcional de espessura com praticamente um único lobo. Isso pode significar, entre outras coisas, que o grande aporte sedimentar foi o responsável pelo desenvolvimento desse lobo com maiores dimensões, que ocupou toda a área de trabalho e promoveu uma mudança de escala na espessura dos lobos.

Como definido através da análise dos testemunhos, os depósitos de *crevasse* também fazem parte da fração reservatório na área de trabalho, ocorrendo secundariamente em relação aos conjuntos de lobos amalgamados de frente deltaica. Geralmente associados aos depósitos de área interdistributária das fácies 4 e 3 e de difícil discriminação, espera-se para esses arenitos uma granulação mais fina, além de uma geometria de forma alongada e dimensões relativamente reduzidas.

Os depósitos interdistributários originados na planície deltaica, ocorrem como seções pelíticas apresentando delgadas intercalações de arenitos muito finos a silticos, sem interesse para reservatórios. A geometria desses depósitos é bastante irregular e descontínua ao longo da área, sendo englobados pela fácies de coloração verde clara das seções estratigráficas.

Os depósitos do prodelta são formados por sedimentos de baixa energia, representados no intervalo estratigráfico de pesquisa pelos níveis pelíticos da fácies 7 (vide cap. 4.3). **Esses folhelhos prodeltaicos são bastante contínuos por toda a área de estudo e por grande parte da bacia. Exibem uma geometria tabular, estando associados aos níveis de afogamento do delta pela transgressão do lago.**

A sedimentação do intervalo estudado teve início com a deposição dos arenitos descontínuos da zona S6, seguindo-se a sedimentação da zona mais espessa do sistema (S5). A partir daí, foram depositados alguns sedimentos de área interdistributária, intercalados com arenitos deltaicos de menor espessura (zonas S4, S3, S2 e S1), e também com folhelhos gerados nos períodos de afogamento do delta, perfazendo um típico padrão *fining upward*. Esse caráter regressivo do delta, com os limites das areias superiores caminhando para NW, pode ser observado com a superposição dos mapas proporcionais de isólitais de arenito (figs. 4.8 a 4.13). É notório ainda nessa análise comparativa, os efeitos

dos arranjos de compensação e amalgamação dos lobos deltaicos.

Na tentativa de se definir a geometria externa de reservatórios em seções estratigráficas, é de suma importância o reconhecimento de marcos cronoestratigráficos, para que não sejam correlacionadas rochas de diferentes idades, formadas sob diferentes condições. Além da separação dos arenitos e zonas através de marcos elétricos ou de intervalos pelíticos que representem linhas de tempo, é relevante o posicionamento da seção no contexto estratigráfico mais amplo a que a mesma se insere, para que se tenha uma idéia da tendência geral de todo o pacote sedimentar, bem como da escala de trabalho.

A parte de qualquer pesquisa de caracterização estratigráfica e independentemente da escala adotada, é sempre uma tarefa difícil se estabelecer modelos deposicionais e padrões sedimentológicos para um dado campo ou área, sem que haja um amplo conhecimento da geologia regional na qual o mesmo se insere. Nos estudos de deltas atuais, a estratigrafia moderna procura integrá-los às respectivas áreas de interação com os ambientes contíguos, tanto no sentido do continente quanto da bacia, baseando-se nas **variações eustáticas do nível do mar** ou lago (Bhattacharya & Walker, 1992). Da mesma forma, nos estudos de deltas antigos deve-se tentar encaixar o intervalo de pesquisa entre duas superfícies máximas de inundação do meio aquoso receptor. Esse procedimento vale, mesmo que para tal seja necessária uma mudança temporária de escala com o objetivo de se obter alguns elementos estratigráficos básicos, confirmando a contemporaneidade dos reservatórios. Como mostrado na figura 4.7, o intervalo selecionado para o trabalho encontra-se num sub-ciclo deltaico entre os marcos 11 e 12, que está inserido num grande ciclo limitado por duas superfícies de inundação máxima do lago. Fazem parte desse ciclo, vários desses sub-ciclos (pulsos) de sedimentação deltaica que estão sofrendo um processo gradativo de transgressão do lago, atestado pelo padrão *fining upward* de toda a sessão.

5) ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

5.1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os estudos estatísticos têm sido amplamente aplicados, não somente nos ramos da ciência mas também em várias outras frentes de trabalho.

A geoestatística está sofrendo um processo de transformação bastante rápido, a partir da condição de ferramenta auxiliar na caracterização de um determinado reservatório, até fazer parte dos trabalhos de rotina dos geólogos e engenheiros. Entre outras atribuições, faz parte efetiva de projetos de otimização de recuperação de hidrocarbonetos devido a sua grande aplicabilidade, não só na exploração de petróleo mas também de qualquer outra jazida mineral.

5.2 - OBJETIVOS

De um modo geral, este trabalho visa fazer um confronto entre o produto gerado por processos geológicos e as técnicas geoestatísticas de quantificação e caracterização.

Na verdade, não houve a preocupação de se testar alguma nova metodologia. O objetivo pretendido foi apresentar certos procedimentos para que o profissional de geoengenharia tenha condições de utilizar uma ferramenta rápida e útil, para obter informações sobre as dimensões e as tendências de ocorrência do reservatório que está sendo descrito.

Entre outras coisas, **esse estudo pretende pesquisar a macrogeometria dos reservatórios deltaicos em termos do resultado das suas formas, direções de anisotropia e padrões de distribuição, correlação com os subambientes, além de tentar obter e quantificar alguns elementos geométricos dos depósitos, basicamente através da análise variográfica e com o auxílio da krigagem.**

Após as fases de tratamento inicial dos dados e da confecção dos variogramas experimentais, decidiu-se aplicar a krigagem nas zonas principais

(S2, S3, S4 e S5). Das outras técnicas geoestatísticas disponíveis, a krigagem foi considerada a mais adequada aos objetivos do presente trabalho, pois os mapas krigados da variável espessura de arenito comporiam uma ferramenta auxiliar importante que, juntamente com os variogramas experimentais, seriam usados para se identificar os elementos de arquitetura da geometria externa dos reservatórios.

Para as zonas S1 (superior) e S6 (inferior), a krigagem foi descartada principalmente porque as mesmas são compostas por arenitos bastante descontínuos e, conseqüentemente, apresentam insuficiência de dados, tanto para elaboração dos variogramas quanto para aplicação da própria krigagem. Na caracterização geométrica de corpos rochosos desse tipo, outras técnicas geoestatísticas devem ser abordadas. Por esse motivo, apesar de estarem relacionadas geneticamente, somente as zonas principais (S2, S3, S4 e S5) receberam tratamento geoestatístico.

5.3 - ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS

Após o procedimento de correlação estratigráfica detalhada dos arenitos, foi elaborada uma tabela de dados contendo a identificação dos poços, suas coordenadas UTM e a isótila de arenito para cada uma das seis zonas consideradas. A partir da tabela, foi digitado um arquivo em ambiente UNIX e formatado nos padrões do ISATIS (Isatis, 1994), programa usado para o desenvolvimento da análise geoestatística. Por se tratar do mesmo atributo para todas as zonas, optou-se primeiramente por um arquivo único, sendo individualizado por zona em algumas das etapas dessa pesquisa.

Foram analisados um total de 276 poços (fig. 4.1), distribuídos de maneira relativamente uniforme após a seleção inicial das amostras. Desse montante, apenas 271 foram tratados geoestatisticamente, pois 5 poços localizados estrategicamente ao longo da área foram retirados do arquivo para posterior validação dos mapas krigados.

A tabela 5.1, apresenta os principais resultados da estatística básica feita preliminarmente, lembrando que dos 276 pontos amostrais foram excluídos para essa etapa os valores nulos em cada uma das zonas. Na análise estatística desse

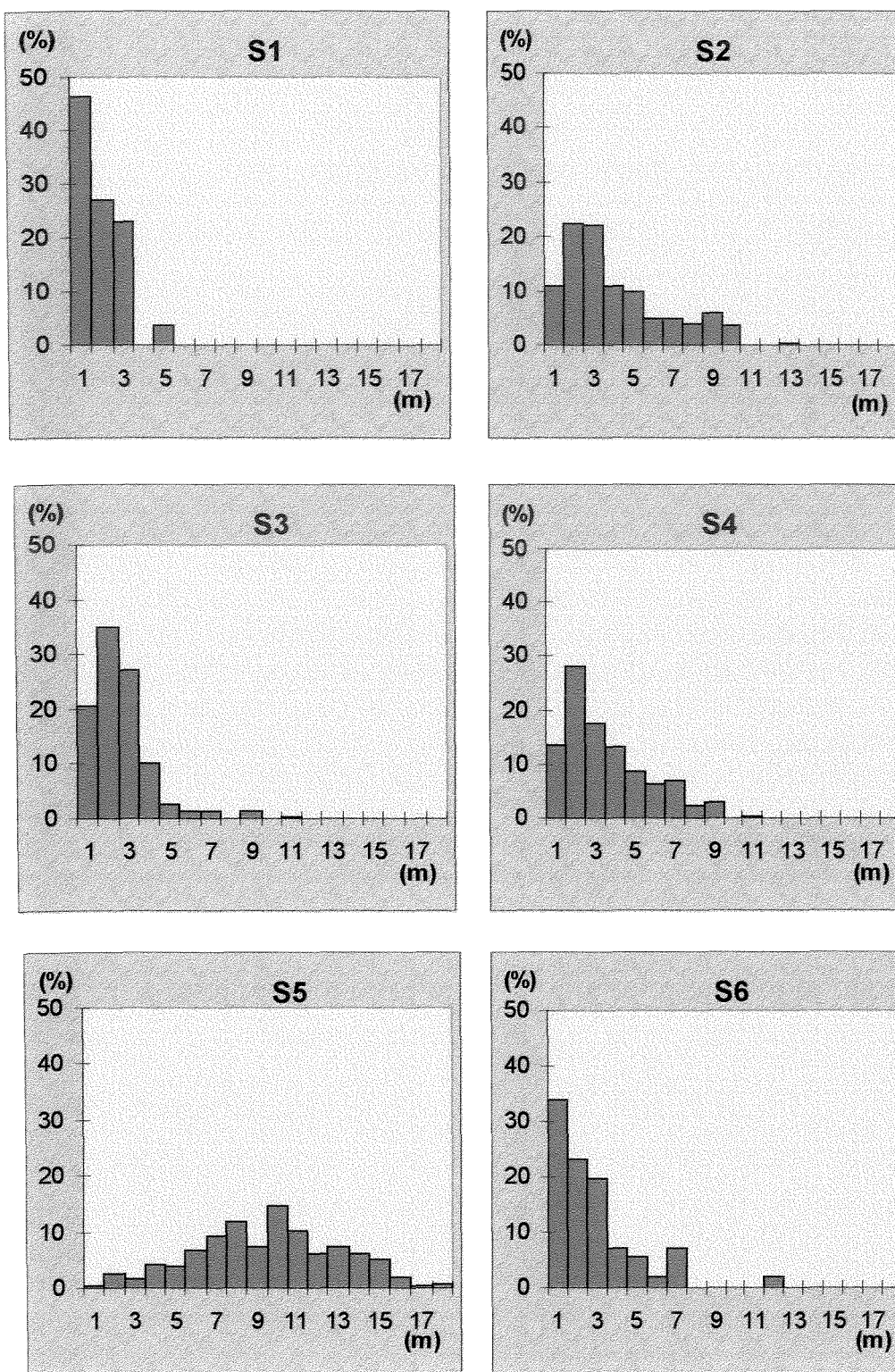
tipo de variável, seria inadequado considerar-se amostras onde o reservatório está ausente, principalmente nas zonas S1 e S6 onde o mesmo ocorre em apenas 10 a 20% do total dos pontos amostrais.

Tabela 5.1 - Estatística básica das amostras.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Nº amostras c/ valores nulos	250	54	56	64	1	220
Nº amostras s/ valores nulos	26	222	220	212	275	56
Valor mínimo (m)	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
Valor máximo (m)	4,1	12,8	10,3	10,5	17,7	11,4
Média aritmética (m)	1,4	3,7	2,2	3,0	9,0	2,4
Média geométrica (m)	1,1	2,8	1,8	2,4	8,1	1,7
Média harmônica (m)	1,9	0,5	0,3	0,5	1,3	1,2
Mediana (m)	1,1	2,7	2,0	2,5	9,2	1,7
Variância (m ²)	0,96	6,55	2,22	4,29	12,06	4,40
Desvio padrão (m)	0,98	2,56	1,49	2,05	3,47	2,10

-ZONA S1

Essa é a zona superior, e ocorre apenas localmente em alguns pontos da área de estudo (fig. 4.8). É composta de pequenos corpos arenosos desconectados entre si, sendo que os mais expressivos se localizam na porção central, nordeste e sudeste da área. Apesar de atingir um valor máximo de espessura de 4,1m, sua média é de apenas 1,4m. Além do reservatório estar presente em somente 9% das amostras (em número de 26), quase 50% delas situam-se na classe de 0,3 a 1m. Através do seu histograma de frequência (fig. 5.1), observa-se que os 50% restantes das amostras estão também concentrados nas classes com valores baixos de espessura, aferindo uma pequena importância dessa zona como reservatórios potenciais para hidrocarbonetos.



Obs. Valores nulos excluídos

Figura 5.1 - Histogramas de frequência da variável espessura para as diferentes zonas mapeadas.

-ZONA S2

A zona S2 desenvolveu-se mais na parte nordeste e um pouco também na parte sudoeste da área, com uma grande quantidade de amostras com menores valores na região central, formando 4 setores distintos (fig. 4.9). Comporta-se de maneira geral como um corpo contínuo, ou seja, os lobos de frente deltaica encontram-se amalgamados, sendo que poucos pontos revelam ausência do reservatório. Seu histograma de frequência (fig. 5.1) apresenta uma distribuição tendendo a log-normal, com assimetria positiva, unimodal e média dos valores de 3,7m. Com essas características, associadas à presença do reservatório em 80% do total das amostras, fica atestada a sua boa potencialidade para hidrocarbonetos. O valor alto observado na cauda do histograma pode sugerir a ocorrência de um corpo arenoso mais possante, porém localizado.

-ZONA S3

A distribuição dessa zona tem presença marcante na porção nordeste da área (fig. 4.10), que apesar de mais restrita, segue a mesma tendência do arenito imediatamente sobreposto (zona S2). Os maiores valores ocorrem nessa região e, secundariamente, também na porção central. O histograma de frequência (fig.5.1) revela uma distribuição tendendo a log-normal, com assimetria positiva, unimodal, onde se observa a ocorrência de alguns poucos valores altos de espessura. Esse fato proporciona uma cauda bastante alongada, o que sugere a ocorrência de espessamento dos lobos deltaicos em pontos localizados. A ausência de amostras em algumas das classes indica provavelmente um problema de representatividade da amostragem. Mesmo estando presente em 80% do montante das amostras, a espessura média de 2,2m confere aos reservatórios da zona S3 uma importância secundária em relação as demais.

-ZONA S4

A zona S4 poderia ter sido tratada em conjunto com a sotoposta (zona S5), por estarem seus arenitos amalgamadas em vários pontos da área. Apresenta-se

mais expressiva na região sudoeste (fig. 4.11), com boas incursões também nas regiões central e nordeste. O histograma de frequência (fig. 5.1), revela uma distribuição tendendo a log-normal, unimodal, com assimetria positiva e cauda bastante alongada devido aos valores altos de espessura, também atribuídos a espessamentos localizados dos corpos arenosos. O fato do reservatório ocorrer em 77% do total das amostras, aliado a uma espessura média de 3,0m, são indicadores de uma boa potencialidade para os arenitos dessa zona.

-ZONA S5

É a principal zona, onde encontram-se os valores de espessura mais expressivos. Está bem desenvolvida ao longo de quase toda a área de estudo, com uma distribuição areal bastante homogênea (fig. 4.12), excetuando-se na região sudoeste onde, provavelmente devido ao efeito de compensação, foram justamente depositadas as maiores espessuras da zona sobreposta (S4). O histograma de frequência (fig. 5.1) revela uma distribuição normal, unimodal, com um alto valor de espessura média (9,0m) e bastante próximo da mediana (9,2m). Do total de 276 amostras, o reservatório está ausente em apenas 1 (uma) delas. Todas essas características, com ênfase no caráter simétrico da curva de distribuição, que mostra um comportamento completamente diferenciado dessa zona, podem ser indicadoras da mudança de escala relativa que ocorreu com a deposição desses arenitos em relação aos demais, devido a sua maior massa.

-ZONA S6

Assim como ocorre na zona S1, trata-se de um arenito bastante descontínuo. Teve o seu maior desenvolvimento em pequena área da porção central, um pouco deslocada para sudoeste (fig. 4.13), posicionando-se basicamente nos baixos moldados pelo paleorelevo. Convém ressaltar o reduzido número de amostras onde o reservatório está presente (56 ou 20% do total). É representado por pontos isolados ao longo de toda a área, sendo que as maiores ocorrências estão com valores de espessura abaixo de 2m. O histograma de frequência (fig. 5.1) revela um *outlier* com um alto valor, sendo atribuído a

algum espessamento localizado do arenito. A ausência de amostras nas classes de valores mais altos indica provavelmente um problema de representatividade das mesmas. Devido aos baixos valores de espessura presentes, além do seu caráter errático e consequente ocorrência restrita, a zona S6 revela uma pequena importância para reservatórios potenciais.

5.4 - ANÁLISE ESTRUTURAL

5.4.1) VARIOGRAFIA

A análise estrutural constitui-se de um passo fundamental num estudo geoestatístico, onde são definidas as estruturas da distribuição espacial da variável (ou variáveis) em evidência (Journel, 1978). A técnica mais comum de análise estrutural é a variografia, cuja ferramenta básica é o variograma.

“ O *variograma* é um gráfico construído para caracterizar a estrutura espacial da variável regionalizada em estudo. Ele tenta representar a imagem de variabilidade dos dados ao longo da área, além de ser uma medida de correlação existente entre os valores de dois pontos” (Guerra, 1988).

O variograma obtido a partir dos pontos amostrais, é conhecido como variograma experimental ou observado. Existe também o variograma teórico, que é um modelo definido por uma função matemática.

As informações fornecidas pelo variograma, bem como a tentativa de se obter um modelo teórico a partir do variograma experimental, perfazem os objetivos da análise estrutural.

O variograma experimental pode ser definido matematicamente através da seguinte expressão:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \text{ onde}$$

$Z(x_i)$ = valor no ponto x_i ;

$Z(x_i + h)$ = valor no ponto deslocado da distância h ;

$N(h)$ = numero de pares de distância h .

Nos fenômenos de transição, uma variável regionalizada revela uma correlação cada vez menor de um ponto com o seu vizinho, a medida que os dois se afastam até atingir um estágio em que não possuem mais qualquer vínculo. A partir daí, pode-se definir alguns dos elementos mais importantes extraídos dos variogramas que são o alcance e o patamar.

O **alcance** (*range*) é a distância a partir da qual não existe mais correlação entre os pontos; enquanto o **patamar** (*sill*) é o valor máximo de variabilidade atingido por duas amostras correlacionáveis. Outro termo também muito comum nos estudos geoestatísticos é o **efeito pepita** (*nugget effect*), definido por uma ausência total de correlação entre os pontos, sendo representado por uma linha horizontal no variograma (Guerra, 1988).

Portanto, essa etapa de análise estrutural consiste na procura de um modelo teórico que melhor se ajuste ao variograma experimental. O modelo teórico ajustado é aquele que irá representar o modelo real nos estudos geoestatísticos.

Existem vários modelos de variogramas teóricos, desenvolvidos a partir da observação dos diferentes tipos de regionalizações que as variáveis apresentam na natureza (Journel, 1978). Basicamente podem ser divididos em dois grupos:

1) Modelos que atingem um patamar

a) *Comportamento linear na origem*

- MODELO ESFÉRICO

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3}; & \text{se } h < a \\ 1 & ; \text{se } h \geq a \end{cases}$$

É o modelo mais usado. Apresenta comportamento linear até a distância equivalente a 1/3 do alcance (fig. 5.2A). A tangente que passa pela origem atinge o patamar a uma distância de 2/3 do alcance.

- MODELO EXPONENCIAL

$$\gamma(h) = 1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right)$$

Atinge o patamar assintoticamente; porém, dados experimentais revelaram que pode-se considerar um alcance prático na distância equivalente a 95% do patamar (fig. 5.2B). A tangente que passa pela origem atinge o patamar a uma distância de 1/3 do alcance prático.

É utilizado para descrever fenômenos mais contínuos do que aqueles descritos pelo modelo esférico.

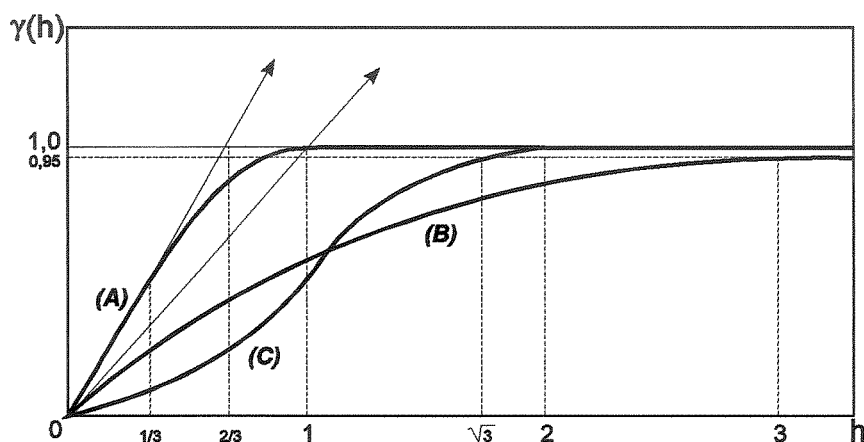


Figura 5.2 - Modelos teóricos mais adotados de variograma;
(A) Modelo esférico; (B) Modelo exponencial; (C) Modelo gaussiano.

b) *Comportamento parabólico na origem*

- MODELO GAUSSIANO

$$\gamma(h) = 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right)$$

Assim como no modelo exponencial, atinge o patamar assintoticamente, com alcance prático na distância equivalente a 95% do patamar (fig. 5.2C).

É utilizado para descrever fenômenos contínuos nas proximidades da origem.

- MODELO SENOIDAL

$$\gamma(h) = 1 - \frac{\sin h}{h}$$

Esse é um tipo de modelo que apresenta uma feição bastante importante na quantificação da geometria de corpos rochosos. Essa feição, informalmente denominada de efeito “buraco” (*hole effect*), reflete um caráter de ciclicidade no comportamento da variável em estudo (fig. 5.3) (Journel, 1978; Guerra, 1988).

É usado para descrever esses fenômenos periódicos (inclusive verticais), podendo ocorrer em modelos com ou sem patamar.

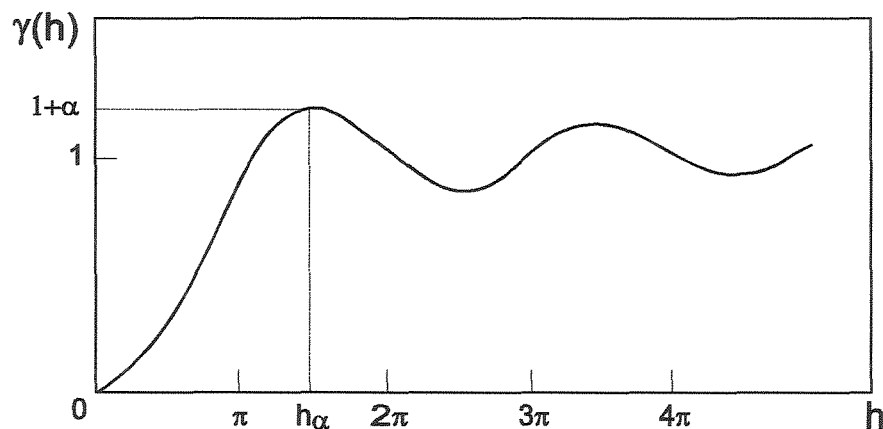


Figura 5.3 - Modelo teórico de variograma senoidal.

2) Modelos que não atingem um patamar

São modelos utilizados para descrever fenômenos com alta capacidade de dispersão espacial. Dentre os principais podemos citar:

- MODELO DE POTÊNCIA

$$\gamma(h) = h^\theta, \quad \theta \in]0, 2[$$

É o mais comum, apresentando-se de maneira bastante variada próximo a origem, a depender do valor assumido por θ .

- MODELO LOGARÍTMICO

$$\gamma(h) = \log h$$

Esse modelo está geralmente associado a **estruturas imbricadas** que, como será visto mais adiante, são representadas por superposições de duas ou mais estruturas nos variogramas experimentais.

Durante o processo de análise estrutural, a identificação dos fenômenos de **anisotropia** é uma etapa bastante importante. Um meio é tido como *isotrópico* quando a continuidade do fenômeno geológico é a mesma em todas as direções da área estudada. Nesse caso, o variograma **omnidirecional**, como é conhecido após a sua modelagem, irá representar a variabilidade do fenômeno ao longo de toda a área, em qualquer direção.

Por outro lado, quando o padrão de continuidade é diferente em direções distintas, tem-se um caso de anisotropia.

A **anisotropia geométrica** é aquela onde variogramas obtidos em diferentes direções exibem a mesma variabilidade (patamar) e diferentes alcances. O variograma com maior valor de alcance indica a direção de maior continuidade, convencionando-se que a direção de menor continuidade se mantém a 90° da primeira. Na modelagem, esses dois variogramas são conjugados em um modelo único que irá descrever a variabilidade do fenômeno em todas as direções.

A **anisotropia zonal** é aquela onde variogramas obtidos em diferentes direções exibem valores distintos de variabilidade (patamar), para valores similares de alcance.

É importante salientar que a direção de maior continuidade do fenômeno geológico (espessura de arenito) mencionada durante todo o trabalho, corresponde a direção que coincide com o eixo deposicional (longitudinal) de 1 (um) lobo deltaico individualizado, estando a direção de menor continuidade a

90° da primeira, no eixo transversal ou perpendicular do lobo. Nos casos onde o variograma experimental dessa direção de menor continuidade revelar um valor maior de alcance em relação aquele obtido na direção do eixo longitudinal, na verdade ele está aferindo um caráter de continuidade lateral para 1 (um) conjunto de lobos deltaicos. A amalgamação dos lobos, que muitas vezes está representada por imbricamentos nos variogramas, proporciona esse maior valor de alcance, caracterizando uma outra escala de variabilidade para essa direção.

Antes de ser iniciada a aplicação do método geoestatístico escolhido, é necessária a realização de um tratamento preliminar das amostras, no sentido de se obter uma melhor representatividade dos padrões de continuidade da variável em estudo. Dentre os principais procedimentos adotados, encontram-se as observações do tipo e densidade da malha, da presença de agrupamentos e da necessidade ou não de se estabelecer um programa de subamostragem. Além disso, é importante também o reconhecimento da escala e dimensões da área de trabalho, tipo de variável que será submetida a tratamento, quais os processos geológicos que estão envolvidos na geração da mesma, quais as tendências de comportamento dela ao longo da área, qual o significado de cada um dos valores discrepantes, além da representatividade ou não de uma determinada amostra em relação a população de dados.

Como ilustração, pode-se citar um variograma que apresenta um efeito pepita puro que não ocorre na realidade, estando sua origem relacionada simplesmente a uma amostragem inadequada.

5.4.2) ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS

Antecedendo a fase de estudo da variografia experimental, foi feita uma análise detalhada da sensibilidade dos parâmetros normalmente utilizados na elaboração dos variogramas. Dessa maneira, cada um deles foi escolhido após várias tentativas feitas com diferentes valores, até que se atingisse um valor razoável para representar o fenômeno geológico da maneira mais fiel possível. Além disso, teve-se a preocupação de, na medida do possível, manter os mesmos parâmetros utilizados na confecção dos variogramas das diversas zonas, objetivando evitar distorções ou representar tendências individualizadas no estudo comparativo das mesmas.

Foi selecionada a zona S3 para o estudo de sensibilidade, por ser aquela onde se obteve a melhor definição da geometria externa dos conjuntos de corpos lobados, dentre as zonas principais. Decidiu-se fazer essa pesquisa de sensibilidade em direções sub-paralelas as direções regionais de maior e menor continuidade do fenômeno geológico (espessura de arenito) ou seja, Az 320° e Az 50°.

De acordo com Bettini & Almeida (1994), os principais parâmetros necessários para a elaboração dos variogramas experimentais (fig. 5.4), podem ser descritos como:

a) Passo - é a distância de pesquisa da variabilidade entre os pares de pontos, que sofre um incremento do mesmo valor após o término da pesquisa nesse primeiro intervalo, passando o intervalo seguinte a ser o novo campo de pesquisa, e assim sucessivamente.

Em áreas com malha regular, normalmente procura-se usar para o passo a distância que separa duas amostras, para que praticamente todas as amostras tenham chance de ser aproveitadas. No presente caso, apesar da alta densidade de poços, a malha é bastante irregular com distância entre os poços variando de 40m a 700m. Em casos como esse, não se deve fugir muito do valor médio entre os pontos amostrais, que se encontra em torno de 215m.

Na direção de Az 320°, um passo de 210m tinha melhor resolução para o primeiro par e um passo de 225m já estava muito grande, pois perdia-se alguns pares importantes. Como na direção de Az 50° um passo de 200m resultou numa melhor definição da geometria dos conjuntos de lobos, decidiu-se então que a distância ideal para o passo seria de 200m.

b) Número de passos - é a quantidade de vezes que o passo sofrerá incremento, até ser completada toda a pesquisa.

O número de passos utilizados depende do dimensionamento do espaço amostral. A metodologia normalmente adotada, é que o número de passos multiplicado pela medida do passo resulte aproximadamente em 50% do valor da distância total da área, na direção em referência. Esse procedimento é feito devido a pesquisa ser nos dois sentidos. Todo cuidado deve ser tomado na

escolha desse parâmetro, pois caso a área não esteja toda recoberta pela pesquisa variográfica, informações importantes podem ser descartadas nos pontos finais do variograma; por outro lado, valores que ultrapassem a distância do espaço amostral podem causar distorções nos pontos resultantes. Em áreas circulares ou quadradas, o número de passos é igual em todas as direções; já em áreas retangulares como a estudada, esse número varia.

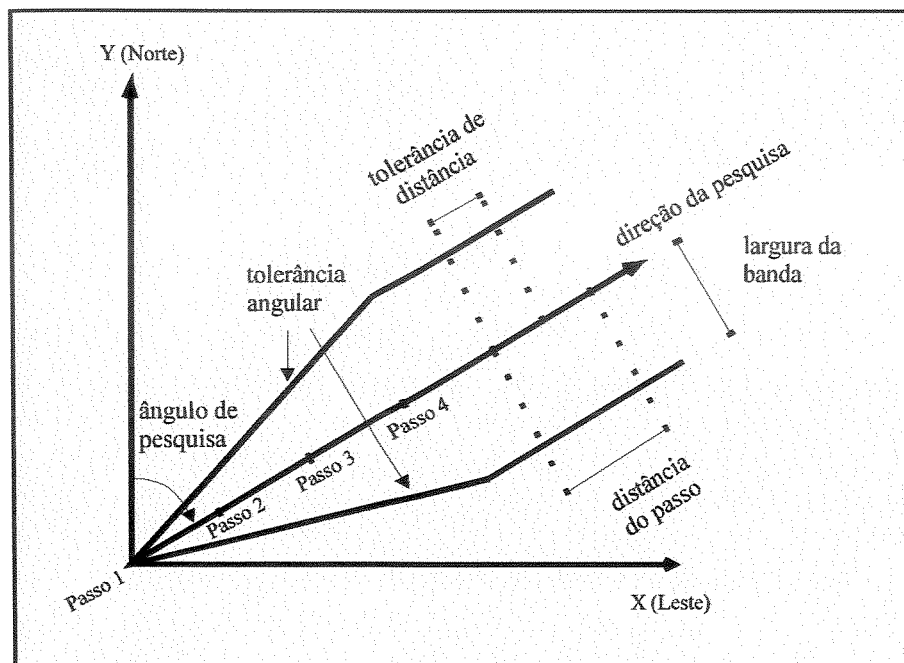


Figura 5.4 - Principais parâmetros utilizados numa pesquisa variográfica (Bettini & Almeida, 1994).

Para esse parâmetro não foi necessária a análise de sensibilidade, pois na confecção dos variogramas experimentais de cada zona o número de passos será sempre o mesmo numa determinada direção. No Az 320° foi usado um número de 10 passos, e no Az 50° um número de 18 passos.

c) Tolerância de distância - é a distância medida em percentagem, em que o intervalo de pesquisa é limitado dentro de cada passo. Caso seja escolhido um valor de 0,5 (50%), obtém-se um recobrimento de 100% no intervalo do respectivo passo (50% em cada sentido). Considerando-se um valor menor, alguns pares podem ser perdidos e, por outro lado, um valor maior do que 0,5 pode

implicar numa superposição de pares pesquisados.

No caso de estudo um recobrimento de pares não teria interesse, devido a densa malha de amostragem. Foi feita uma tentativa com um valor menor não se obtendo um bom resultado, pois com 0,25 (25%) na direção do Az 50° ocorreram ruídos indesejáveis, e na direção do Az 320° tanto com 0,25 (25%) quanto com 0,40 (40%), foi compilada uma quantidade de pontos muito pequena.

Concluindo, apesar do passo pequeno utilizado e uma alta densidade de pontos, onde caberia um valor abaixo de 0,5 para esse parâmetro, foi escolhida para a tolerância de distância um valor de 0,5 (50%) para todas as direções, devido a malha irregular presente na área.

d) Tolerância angular - é o ângulo que limita a largura da área de pesquisa, tanto para a direita quanto para a esquerda da direção seguida (que funciona como uma bissetriz), ao longo dos passos iniciais.

Para um melhor controle na interpretação dos dados, geralmente são usados valores cujo dobro da tolerância angular (pois o ângulo abrange também o outro lado da direção) sejam ângulos padronizados como 30° ou 45° por exemplo.

Para a área estudada, foram feitas tentativas com os valores de 12,5°, 15° e 22,5°. Na direção de menor continuidade (Az 50°) não foi notada nenhuma diferença entre eles; já na de Az 320°, a única diferença notada ficou por conta do primeiro ponto calculado nos variogramas, que apresentou-se com melhor resolução (maior número de pares envolvidos) com o valor de 22,5°.

Uma vez que a etapa seguinte (variografia experimental) seria executada de forma detalhada, onde as direções teriam ângulos bem próximos, decidiu-se usar uma tolerância angular de 15°. Foi adotado esse critério para que não surgissem áreas de recobrimento, correndo-se o risco de uma suavização dos resultados e com isso os efeitos anisotrópicos do fenômeno poderiam ficar mascarados.

e) Largura da banda - é a distância medida para um dos lados da reta que representa a direção da pesquisa, cujo dobro desse valor vai limitar a largura da área dentro de cada passo.

Para os valores de 80m, 100m, 120m e 150m, tanto na direção de Az 50° quanto na de Az 320°, os que revelaram melhores resultados nos variogramas

foram os de 120m e 100m.

Com o objetivo de se evitar um possível efeito de suavização, mesma justificativa utilizada na escolha da tolerância angular, foi adotado um valor de 100m para a largura da banda.

5.4.3) *VARIOGRAFIA EXPERIMENTAL*

Após a análise de sensibilidade, foi iniciada uma das fases mais importantes do presente trabalho, ou seja, a análise das tendências de atuação da variável geológica (espessura de arenito) através do seu comportamento variográfico segundo várias direções, para cada zona individualmente. Para tanto, decidiu-se fazer a pesquisa com ângulos bem pequenos, objetivando a detecção precisa dos elementos de arquitetura da geometria externa dos conjuntos de lobos, além de uma identificação mais apurada e posterior quantificação das direções de anisotropia do fenômeno geológico. Foram elaborados variogramas experimentais a cada 10° , num total de 18 para cada zona (S2, S3, S4 e S5), perfazendo-se um recobrimento de 360° em torno da área. As zonas S1 (superior) e S6 (inferior) não foram tratadas devido a ocorrência restrita desses reservatórios.

Alguns resultados comparativos entre as zonas encontram-se descritos nos parágrafos finais desse item. A seguir estão comentadas certas relações geométricas reveladas pelos variogramas experimentais de cada zona separadamente:

-ZONA S2

Analisando os variogramas experimentais (fig. 5.5), observa-se que a feição informalmente conhecida como efeito “buraco” (*hole effect*) não ocorreu em nenhuma direção, o que não acontece com as zonas S3 e S4, como será visto adiante. Esse fato bastante significativo, pode estar relacionado com a disposição areal dos conjuntos de lobos, que é diferente em cada uma das zonas. Com o auxílio do mapa base contendo os valores proporcionais de espessura dessa zona (fig. 4.9), nota-se grosseiramente que a área pode ser dividida em 4 setores: o primeiro, em posição extrema a NE, compreende o conjunto de lobos mais

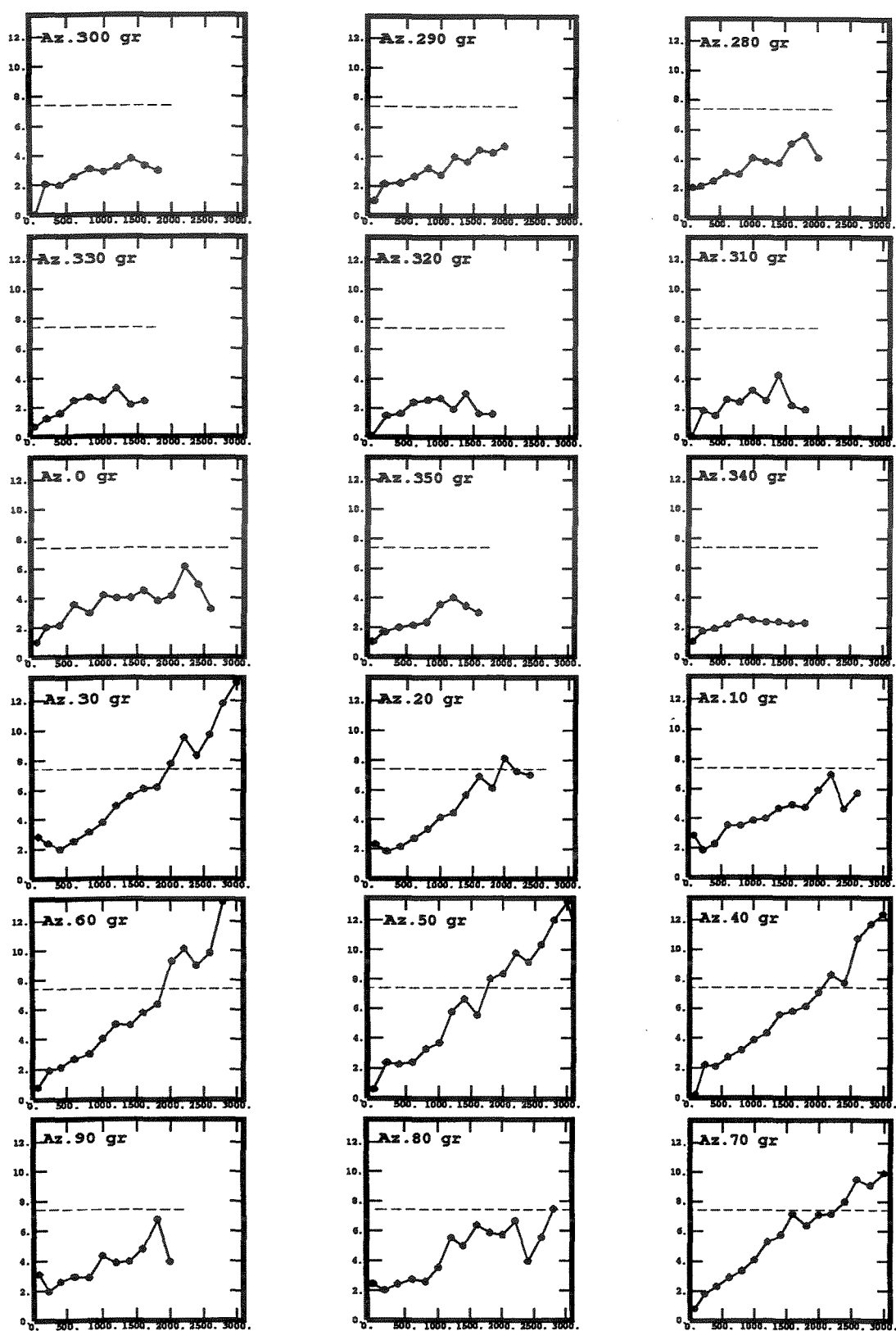


Figura 5.5 - Variogramas experimentais da zona S2.

possante; caminhando-se no sentido SW, ocorre um segundo conjunto de menor expressão na região central; ao lado desse, encontra-se uma área de menor energia com pequenos lobos individualizados pertencentes a uma área interlobos; e, no extremo SW, já aparecem indícios de um novo conjunto possante de lobos que não está totalmente presente porque possui dimensões reduzidas ou porque seus limites estão fora da área.

Nas direções Az 350°, Az 340° e Az 330° (subparalelas a direção de maior continuidade, como será demonstrado adiante), observam-se valores pequenos de $\gamma(h)$; ou seja, ocorre uma baixa variabilidade do fenômeno, pois se está caminhando ao longo do eixo longitudinal dos conjuntos de lobos ou ainda dentro de uma área interlobos, sem haver uma mudança de setores. O mesmo não ocorre com as direções ortogonais a essas (Az 80°, Az 70° e Az 60°), pois os valores de alta variabilidade revelados nos variogramas e também as estruturas imbricadas presentes, onde ocorre a superposição de duas ou mais estruturas (Guerra, 1988), demonstram que se está atravessando todos esses setores.

Embora se esperasse a presença do efeito “buraco” nessas direções de menor continuidade, a sua ausência é atribuída ao aumento (ou redução porque a pesquisa variográfica é feita nos dois sentidos) gradacional da espessura dos conjuntos de lobos de um extremo a outro da área, uma particularidade dessa zona. Esse aumento suave faz com que não ocorra o padrão cíclico de valores contrastantes e semelhantes entre os pares pesquisados, para que seja caracterizada a referida feição.

-ZONA S3

Essa zona, apesar de ser a mais delgada das quatro, foi a única que apresentou uma distribuição típica dos conjuntos de lobos para que fosse realizada uma análise geométrica mais fundamentada (fig. 4.10).

Observa-se de forma nítida que, assim como na zona anterior, a área também pode ser dividida em 4 setores: um deles, posicionado no extremo NE, perfaz o conjunto de lobos mais possante, estando truncado pelo limite da área; um segundo setor é constituído por um grande conjunto de lobos na área central; e ainda duas áreas interlobos formam os dois outros setores, estando uma delas

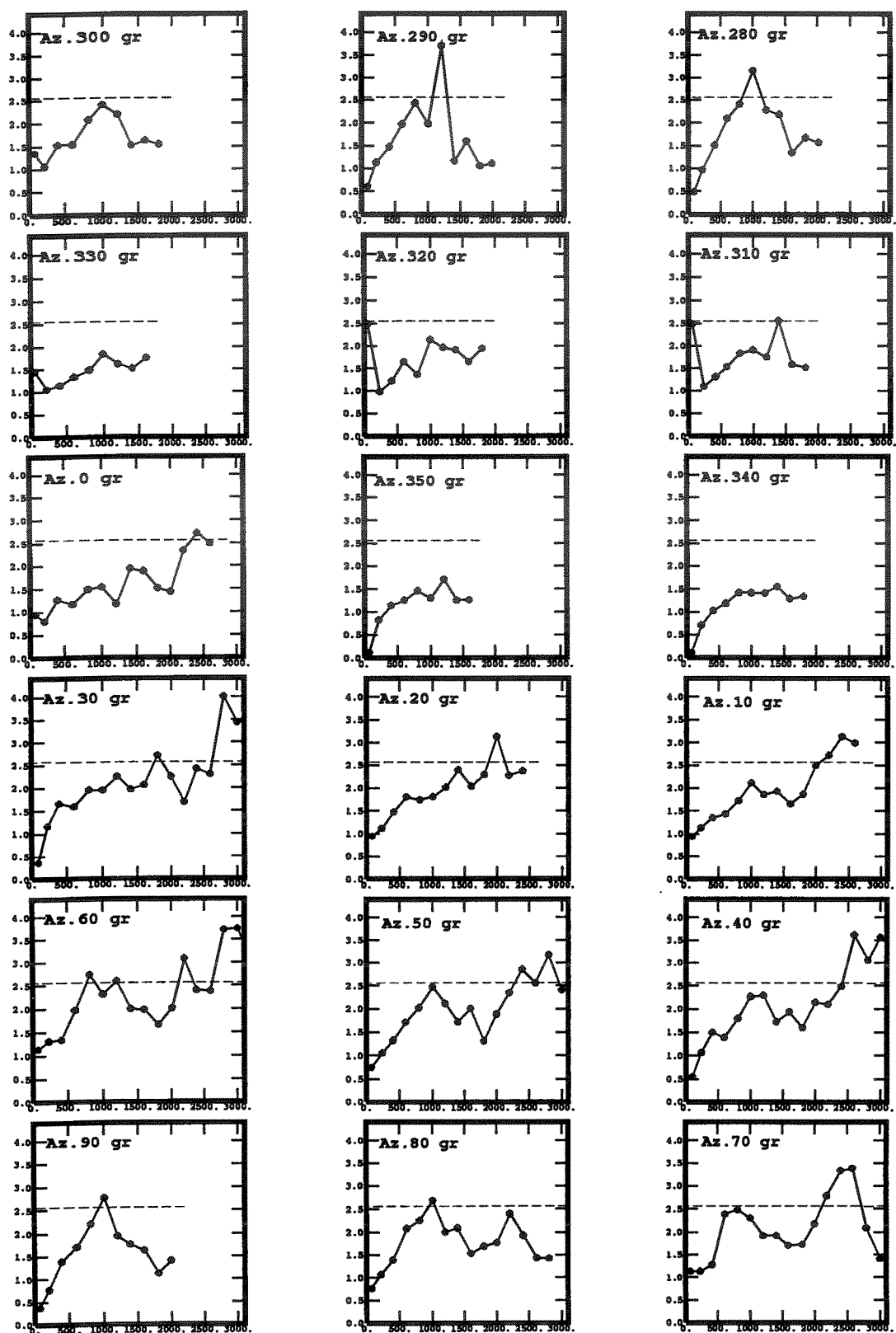


Figura 5.6 - Variogramas experimentais da zona S3.

entre os 2 conjuntos principais de lobos e a outra no extremo SW.

Pelos variogramas experimentais (fig. 5.6), nota-se de imediato o aparecimento do efeito “buraco” em vários deles, principalmente quando se caminha com a pesquisa ortogonalmente ao eixo de maior continuidade (Az 80°, Az 70° e Az 60°). Como esperado, conclui-se que o efeito “buraco” está ligado a uma alternância na ocorrência de áreas (setores) de conjuntos de lobos e interlobos.

No variograma de Az 300° foi também observada uma feição peculiar de caráter cíclico. O mapa proporcional de espessura (fig. 4.10) revela que nessa direção oblíqua às de maior e menor continuidade existem apenas 3 setores ao longo da área, em contraste com os 4 setores atravessados pela direção de menor continuidade (Az 70°). Nesse caso, essa alternância cíclica da variância revelada sugere que a referida feição seja um trecho incompleto do efeito “buraco” observado nesse último variograma. Por conseguinte, a medida do comprimento de onda (1650m) obtido no primeiro variograma seria apenas uma largura média aparente do conjunto de lobos.

As estruturas imbricadas presentes em vários variogramas foram atribuídas a mudanças de setores, de áreas interlobos para áreas de conjuntos de lobos ou vice-versa, no decorrer da análise variográfica.

-ZONA S4

Utilizando-se o mesmo critério, a zona S4 pode ser compartimentada em 5 setores (fig. 4.11): um conjunto de lobos na porção NE; seguindo-se para SW ocorre lateralmente uma área interlobos que se estende de NE para o centro-sul; um conjunto de lobos na área central; outro conjunto de lobos mais possante no extremo SW; e ainda um quinto setor composto por uma área de menor espessura na posição WSW, podendo ser considerada como área interlobos.

A análise dos variogramas experimentais (fig. 5.7), mostrou o efeito “buraco” típico somente na direção Az 10° que, apesar de não ser ortogonal a direção de maior continuidade, foi a que registrou o menor alcance. O valor aproximado de 1700m extraído dessa feição para a largura média dos conjuntos de lobos deltaicos na zona S4 não foi considerado por ser um valor aparente, pois

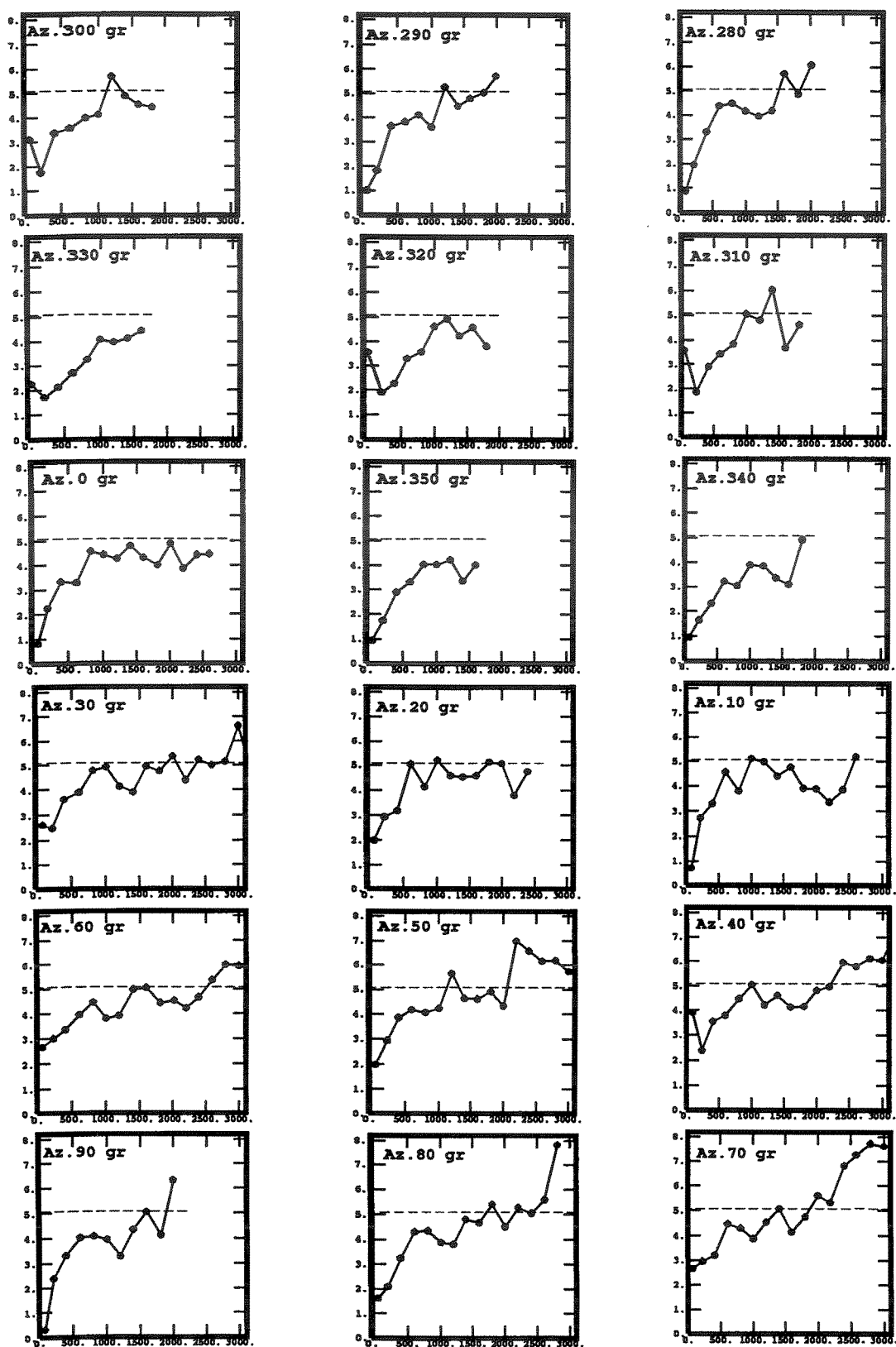


Figura 5.7 - Variogramas experimentais da zona S4.

o valor real que seria obtido na direção de menor continuidade está mascarado devido a um problema de superposição de estruturas, como será visto adiante.

A ausência do efeito “buraco” padrão nessa zona pode ser explicada pelo truncamento do conjunto de lobos central, sugerindo ser este o seu limite longitudinal (figura 4.11). Com isso, a compartimentação em setores dispostos lateralmente visualizada nas demais zonas não ocorreu, gerando variogramas com estruturas mal definidas.

Algumas estruturas de imbricamento se fazem presentes, atribuindo-se a mudanças de setores, como na zona anterior. Destaque especial pode ser dado ao variograma de Az 70° (direção de menor continuidade), onde o imbricamento pronunciado presente nos pontos mais distantes pode refletir a presença de conjuntos de lobos nas bordas da área, como será visto adiante nos mapas krigados de espessura.

Observou-se um forte efeito pepita em alguns variogramas subparalelos a direção de menor continuidade (NE/SW), coincidentes com o alinhamento de *outliers* registrados na etapa de validação cruzada (como será visto adiante). Algumas áreas de ausência do reservatório, próximas a pontos com valores altos de espessura também tendem a se alinhar nessas direções.

-ZONA S5

Nessa zona, o comportamento geológico (físico) dos lobos deltaicos é bem distinto em relação as demais e, conseqüentemente, os padrões de variabilidade também se apresentam de maneira diferenciada. Os arenitos da zona S5 posicionam-se na seção basal e constituem os reservatórios mais possantes do ciclo deltaico completo. A maior energia do sistema que depositou as areias dessa zona, fez com que a escala de ocorrência dos reservatórios tenha sido alterada. Pelo mapa com valores proporcionais de espessura (fig. 4.12), observa-se que a área apresenta praticamente um único setor, havendo uma tendência a existir uma extensa porção composta por somente 1 (um) lobo individualizado; e ainda uma pequena parte situada a WSW com valores menores de espessura que seria uma área de interseção de lobos, uma vez que não seria conveniente denominá-la de área interlobos. É também notória a dificuldade de se ter uma visão geral das

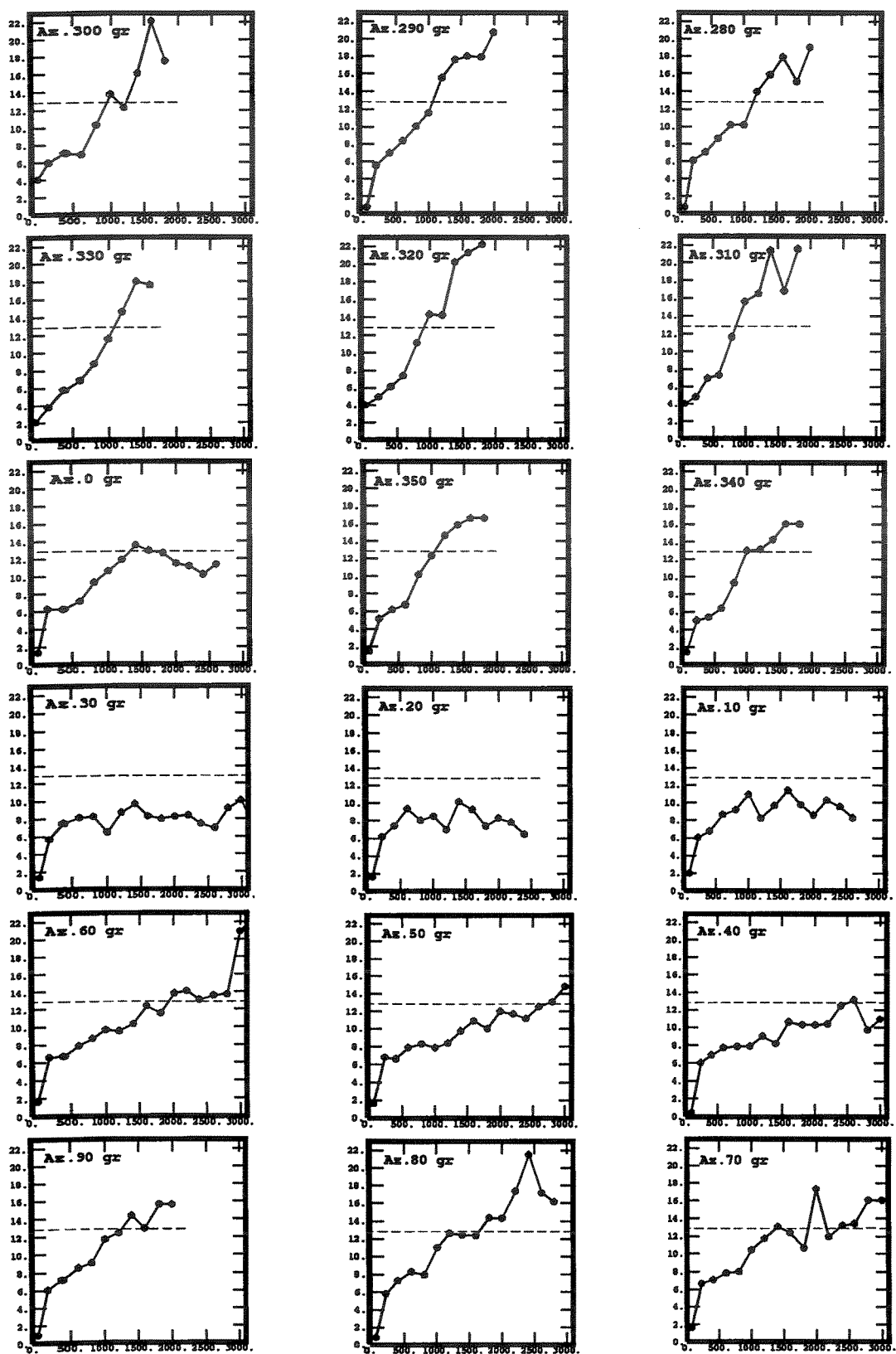


Figura 5.8 - Variogramas experimentais da zona S5.

direções de maior e menor continuidade da variável nessa zona, devido ao seu caráter isotrópico.

Além desses, existem outros efeitos nos variogramas experimentais (fig. 5.8), que também apresentam características peculiares. A começar pela variância dos dados, sempre representada pela reta horizontal tracejada que corta o variograma, que encontra-se bem mais alta em relação as outras zonas, uma vez que o banco de dados para essa zona possui valores mais elevados. Como esperado, não foi observado o efeito “buraco” devido a homogeneidade das amostras. Alguns dos imbricamentos revelados poderiam estar relacionados a mudanças de um lobo para outro, a cada estrutura sobreposta, porém dentro de um único conjunto de lobos. Da mesma forma, a homogeneidade das amostras na zona S5 dificulta a definição e quantificação desses elementos geométricos.

Após a análise preliminar dos variogramas experimentais, foi feita uma pesquisa para se obter as direções de anisotropia (maior e menor continuidade do fenômeno geológico) nas 4 zonas principais, visando com isso a detecção das direções preferenciais de deposição dos lobos deltaicos (Soares, 1988; Soares & Baggio, 1994), e também obter alguns elementos da geometria desses corpos.

O procedimento adotado foi plotar um valor fixo de variabilidade ($\gamma(h)$), valor esse diferente para cada zona, nos 18 variogramas experimentais de cada uma e identificar os valores máximos de distância registrados (alcances). O maior valor de alcance revelado estaria refletindo a direção de maior continuidade da variável espessura de arenito (ou direção do eixo longitudinal dos lobos deltaicos); o de menor alcance, seria a direção de menor continuidade (ou do eixo transversal), convencionada a perfazer 90° com a primeira (Srivastava & Isaaks, 1989).

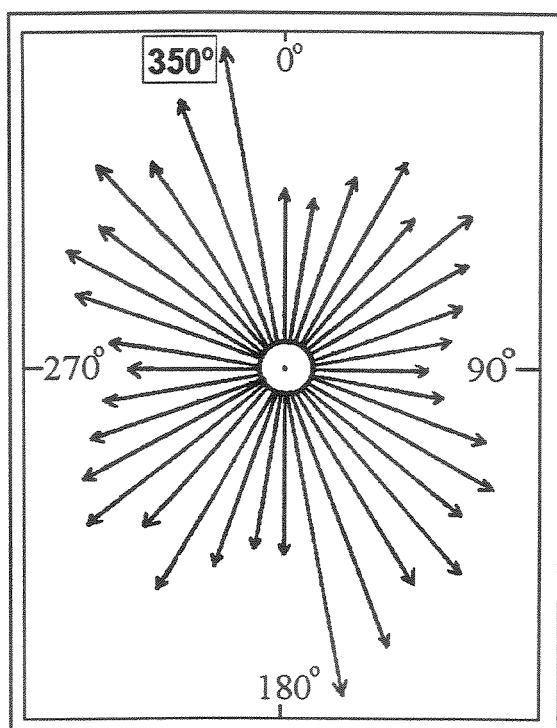
A tabela 5.2 mostra os alcances obtidos para os valores de $\gamma(h)$ arbitrados em cada uma das zonas. É bom lembrar que esses valores de variabilidade não têm relação alguma entre eles, uma vez que os mesmos são calculados a partir das variações de espessura entre pontos de cada zona, que por terem espessuras médias bem diversas irão resultar em valores discrepantes entre si. O mesmo acontece com os valores numéricos dos alcances, que só poderão ser confrontados dentro de uma mesma zona.

Tabela 5.2 - Valores dos alcances obtidos pelos variogramas experimentais (segundo valores fixos de variabilidade arbitrados individualmente para cada zona).

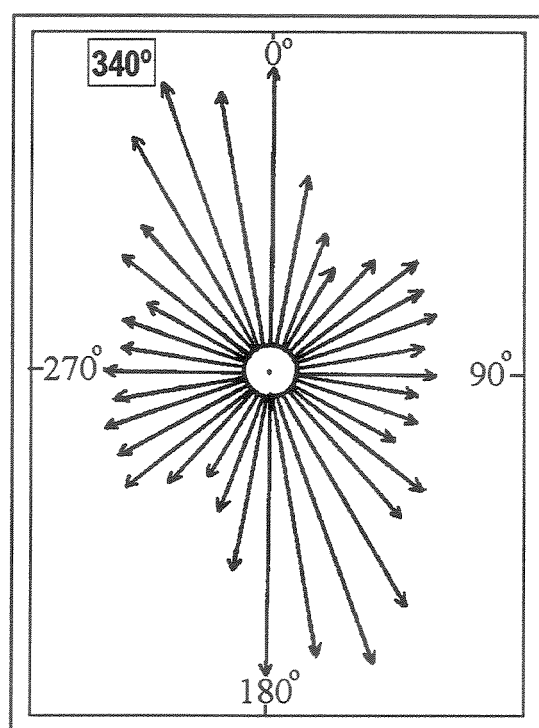
DIREÇÃO	S2 (m)	S3 (m)	S4 (m)	S5 (m)
Az 0°	450	750	370	620
Az 10°	440	500	400	480
Az 20°	510	370	420	410
Az 30°	610	300	330	390
Az 40°	500	380	360	540
Az 50°	600	450	300	530
Az 60°	530	430	370	530
Az 70°	470	430	410	500
Az 80°	420	390	390	420
Az 90°	360	400	390	430
Az 280°	400	370	400	450
Az 290°	520	380	370	470
Az 300°	580	350	400	630
Az 310°	560	470	520	590
Az 320°	660	480	580	590
Az 330°	610	670	790	660
Az 340°	720	770	860	680
Az 350°	810	710	560	630

Com o objetivo de se obter uma visualização gráfica e semiquantitativa das relações entre os alcances nas diversas direções, e depois de se fazer um confronto desses dados entre as zonas, foram confeccionados 4 **diagramas em rosa** plotando os valores dos alcances atingidos nas direções pesquisadas para cada zona (fig. 5.9) (Srivastava & Isaaks, 1989). Através desses diagramas foram observadas as direções preferenciais descritas na tabela 5.3.

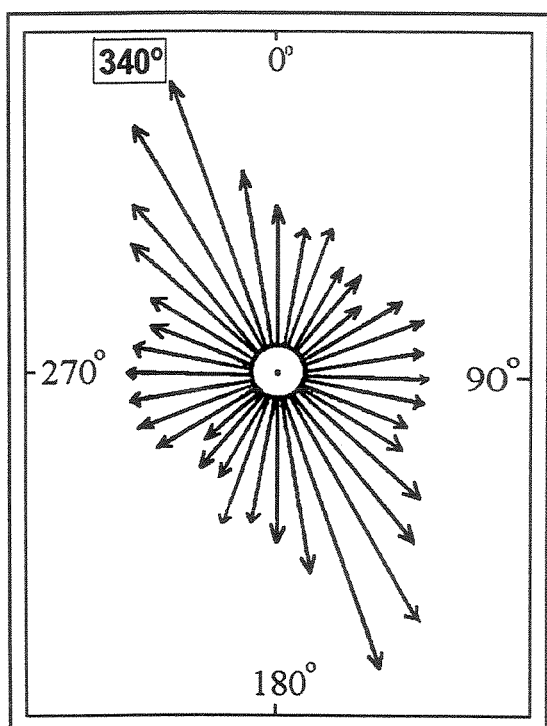
A análise preliminar dos diagramas indicou uma tendência geral de deposição do sistema deltaico na direção NNW / SSE, o que era esperado a



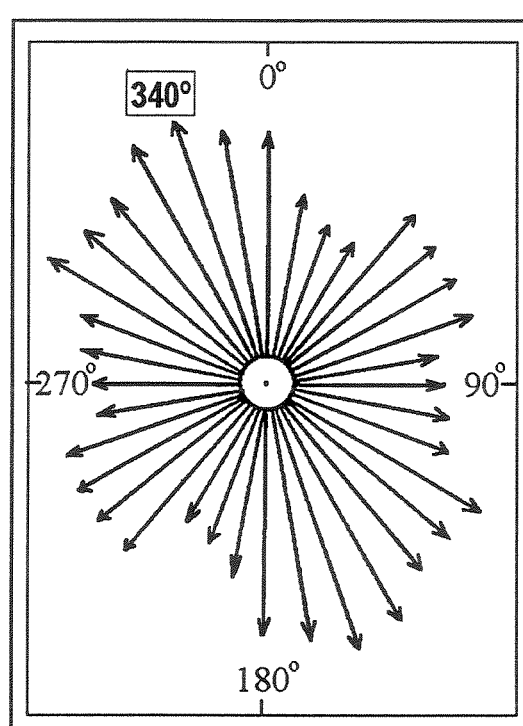
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 5.9 - Diagramas em rosa dos alcances obtidos na pesquisa variográfica
(A) Zona S2; (B) Zona S3; (C) Zona S4; (D) Zona S5.

partir dos trabalhos regionais já realizados na bacia. Quanto aos menores alcances, que refletiriam a direção dos eixos transversais dos conjuntos de lobos, não ocorreram a ângulos ortogonais. O que se observa nos diagramas em rosa de todas as zonas, é a presença de uma curva elíptica principal que descreve semi-quantitativamente as direções preferenciais do fenômeno, e sofre interferência de pelo menos mais uma elipse secundária, mascarando os valores reais dos alcances nas direções perpendiculares.

Tabela 5.3 - Direções preferenciais do fenômeno geológico em estudo (espessura de arenito).

	Zona S2	Zona S3	Zona S4	Zona S5
Maior Continuidade	Az 350°	Az 340°	Az 340°	Az 340°
Menor Continuidade	Az 80°	Az 70°	Az 70°	Az 70°

Essa superposição de duas ou mais estruturas com diferentes direções de anisotropia entre elas, impondo padrões distintos de variabilidade dentro de cada uma das zonas, foi atribuída principalmente a **amalgamação lateral dos lobos** e, conseqüentemente, a superposição de “setores”. Com isso, fica explicado o maior alcance final “curiosamente” registrado nos variogramas experimentais, segundo as direções de **menor** continuidade do fenômeno. **Na verdade, deve-se atentar para que durante a interpretação dos dados não ocorra uma mudança de escala entre duas direções ortogonais de observação.**

Pode-se confirmar através do diagrama em rosa a forte tendência da zona S5 ao isotropismo. Pela maior possança dos lobos dessa zona, a espessura adquire um caráter homogêneo ao assumir valores mais elevados em toda a área, fazendo com que os alcances atinjam valores bem próximos entre si e, conseqüentemente, os padrões de variabilidade sejam baixos e semelhantes em todas as direções.

Uma tarefa realizada a parte no presente trabalho, constituiu-se de um outro estudo variográfico realizado somente na zona S3, feito individualmente

dentro de cada um dos 4 setores descritos anteriormente. O objetivo principal era analisar o comportamento da variabilidade dentro de cada setor; no caso estaríamos confrontando padrões de variabilidade internamente nas áreas de conjuntos de lobos e também nas áreas interlobos. Infelizmente, os resultados preliminares não foram muito satisfatórios devido a insuficiência de amostras em quase todos os setores, gerando variogramas com baixo grau de confiabilidade (com excessão daqueles referentes a área do conjunto principal de lobos). Mesmo assim, devido a dificuldade na definição e quantificação de elementos geométricos dentro de espaços amostrais homogêneos (com pouca variabilidade do fenômeno em evidência), decidiu-se pela não continuidade da pesquisa.

5.4.4) *MODELAGEM DOS VARIOGRAMAS*

Após a definição das direções de maior e menor continuidade do fenômeno geológico em cada uma das zonas (S2, S3, S4 e S5), partiu-se para a modelagem dos variogramas nessas duas direções de anisotropia.

O modelo ajustado do variograma deve retratar, da maneira mais representativa possível, a variabilidade espacial do fenômeno geológico daquela determinada zona, dentro da área de trabalho, e em direção específica (Journel & Huijbregts, 1978; Guerra, 1988; e Srivastava & Isaaks, 1989). Na prática, o modelo ajustado deve representar as estruturas existentes até uma distância tal que, no caso da krigagem, sejam cobertas pelo raio de busca. Os modelos dessas duas direções serão conjugados, sendo criados pelo programa ISATIS (ISATIS, 1994) componentes nas direções intermediárias a essas, para simularem os variogramas reais e serem usados na elaboração dos mapas de estimativa (krigados) da espessura. Os modelos ajustados de variogramas são elementos utilizados em diversos outros algoritmos, que não serão abordados nesse estudo.

Para a modelagem das 4 zonas, foram identificados alguns casos de anisotropia geométrica e zonal nos variogramas experimentais, onde procurou-se levar em conta os aspectos geológicos mais relevantes na escolha dos modelos.

O problema das mudanças de escala de variabilidade dentro da área estudada, reveladas pelos variogramas experimentais quando duas direções ortogonais de pesquisa são confrontadas, foi analisado com cautela. O caso mais relevante é o das anisotropias geométricas observadas, que em alguns casos se

fazem presentes devido a essas mudanças da escala de lobo (revelando um certo alcance na sua direção longitudinal) para a de conjunto de lobos (exibindo um alcance bem maior na sua direção transversal). Na verdade estão sendo comparados o alcance ao longo do comprimento de 1 (um) único lobo, com o alcance ao longo da largura de vários lobos amalgamados. Já as anisotropias zonais existentes, embora tenham se originado através de pontos suavizados, estão relativamente caracterizadas pelas estruturas imbricadas.

Valendo para todas as zonas, pode-se adiantar que em praticamente todos os variogramas não se obteve uma boa resolução do primeiro ponto. Devido a pequena quantidade de pares computados, foram gerados alguns valores distorcidos e com um efeito pepita maior do que o esperado para esse tipo de variável.

Com relação as estruturas adotadas na modelagem das zonas S2, S3 e S4, embora apresentem um certo grau de complexidade, foram os melhores ajustes obtidos para aferição dos pontos mais confiáveis (principalmente na direção de maior continuidade), onde procurou-se descrever a variabilidade dos dados da maneira mais realística possível.

-ZONA S2

O modelo teórico adotado é composto pelas estruturas presentes na tabela 5.4.

A expressão matemática fica então representada por:

$$\gamma(h) = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$$

$$\gamma(h) = C \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right] \quad - \text{ Modelo Exponencial}$$

$$\gamma(h) = C \cdot \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad - \text{ Modelo Esférico}$$

$$\gamma_1 = Exp = 0,83 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a_1}\right) \right] \quad ; \text{ (para um alcance prático de } a_1=3a),$$

$$\gamma_2 = Esf = 2,41 \cdot \left[1,5 \left(\frac{h}{a_2} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a_2} \right)^3 \right] + 1,28 \cdot \left[1,5 \left(\frac{h_x}{a_2} \right) - 0,5 \left(\frac{h_x}{a_2} \right)^3 \right]$$

$$\gamma_3 = Esf = 1,05 \cdot \left[1,5 \left(\frac{h_x}{a_3} \right) - 0,5 \left(\frac{h_x}{a_3} \right)^3 \right]$$

Tabela 5.4 - Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S2.

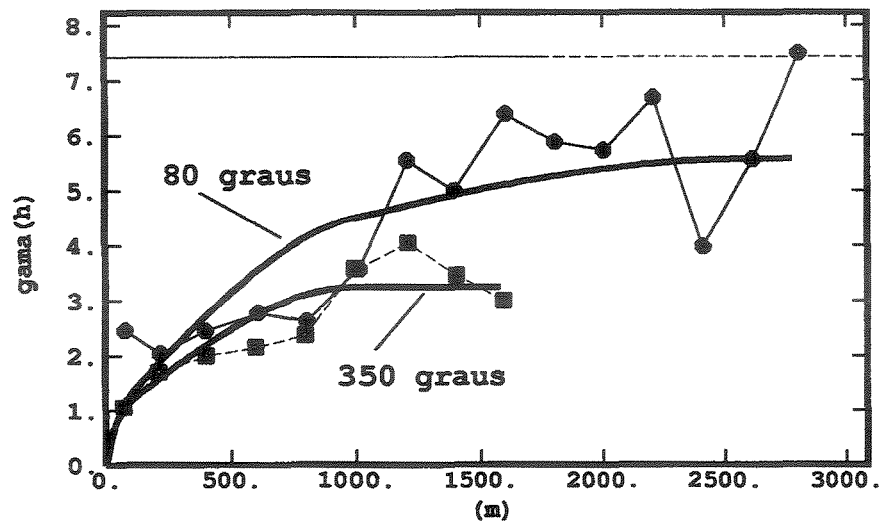
ESTRUT./MODELO	PATAMAR	ALCANCE	Ax / Ay
γ_1 (Exponencial)	$C_1=0,83$	$a_1=27m$	Isotropia $A_x=A_y$
γ_2 (Esférico)	$C_2=2,41$	$a_2=997m$	Isotropia $A_x=A_y$
	$C_2'=1,28$	$a_2=997m$	Anisotr. Zonal $A_x=1; A_y=0$
γ_3 (Esférico)	$C_3=1,05$	$a_3=2609m$	Anisotr. Zonal $A_x=1; A_y=0$

A figura 5.10 exibe os variogramas experimentais nas direções de maior e menor continuidade da zona S2, com seus respectivos modelos teóricos adotados.

Observou-se pelo modelo ajustado que, apesar da falta de resolução do variograma em distâncias muito próximas, a variabilidade dos pontos seguintes (portanto com maior grau de confiança) também se mostrava relativamente alta. Por esse motivo optou-se por um modelo exponencial para a primeira estrutura.

Para completar a modelagem, tentando-se levar em conta a anisotropia zonal presente e os imbricamentos observados tanto no variograma de direção Az 350° quanto no de Az 80°, foi necessária a soma de mais duas estruturas

esféricas. Embora não sendo crucial a modelagem de todas as estruturas imbricadas, principalmente daquelas existentes nas distâncias maiores, sabe-se que essas feições estão ocorrendo na escala de um campo de petróleo, com uma densa malha de poços, sendo esses pontos experimentais importantes na caracterização geológica dos reservatórios.



Az 350° - maior continuidade

Az 80° - menor continuidade

Figura 5.10 - Modelo variográfico da zona S2.

-ZONA S3

A tabela 5.5 reporta os parâmetros estruturais adotados no modelo teórico.

Com base nesses dados, temos as seguintes equações matemáticas:

$$\gamma(h) = \gamma_1 + \gamma_2$$

$$\gamma(h) = C \cdot \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad - \text{ Modelo Esférico}$$

$$\gamma_1 = Esf = 1,42 \cdot \left[1,5 \left(\frac{h}{a_1} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a_1} \right)^3 \right]$$

$$\gamma_2 = Esf = 0,79 \cdot \left[1,5 \left(\frac{h_x}{a_2} \right) - 0,5 \left(\frac{h_x}{a_2} \right)^3 \right]$$

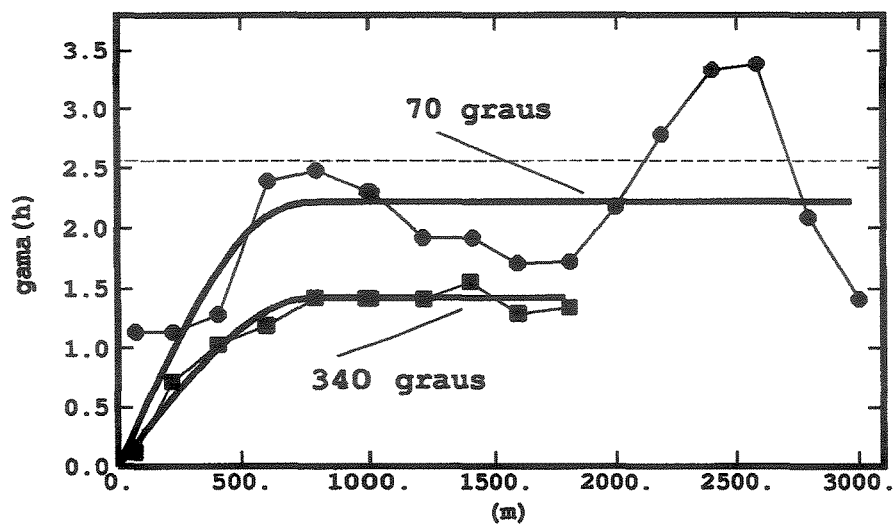
Tabela 5.5 - Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S3.

ESTRUT./MODELO	PATAMAR	ALCANCE	Ax / Ay
γ_1 (Esférico)	$C_1=1,42$	$a_1=792m$	Isotropia $A_x=A_y$
γ_2 (Esférico)	$C_2=0,79$	$a_2=648m$	Anisotr. Zonal $A_x=1; A_y=0$

Pode-se observar na figura 5.11, os variogramas experimentais e os modelos ajustados, segundo as direções de maior e menor continuidade da variável (Az 340° e Az 70°, respectivamente).

Uma melhor resolução do primeiro ponto na direção Az 340° em relação à zona S2, permitiu o ajuste de uma primeira estrutura esférica. A segunda estrutura esférica adotada procurou considerar a anisotropia zonal presente, bem como os pontos iniciais da feição do efeito “buraco” (direção Az 70°). Apesar da boa continuidade dos dados a curtas distâncias revelada pelo variograma de Az 340°, os valores mais altos de variabilidade no variograma de Az 70° descartaram a escolha de um modelo gaussiano. O modelo exponencial também não se mostrou adequado, pelo aumento gradativo da variabilidade.

Para efeito de modelo, tentou-se um ajuste o mais representativo possível, mesmo que o ciclo completo do comprimento de onda descrito pelo efeito “buraco” não tenha sido representado inteiramente. Como será abordado com mais detalhe em capítulo adiante, esse tipo de feição experimental fornece dados valiosos na interpretação geológica e na quantificação da geometria dos corpos deltaicos.



Az 340° - maior continuidade

Az 70° - menor continuidade

Figura 5.11 - Modelo variográfico da zona S3.

-ZONA S4

Pode-se descrever o modelo teórico ajustado como mostrado na tabela 5.6:

As equações matemáticas dessa modelagem se resumem em:

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2$$

$$\gamma(h) = C \cdot \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad - \text{ Modelo Esférico}$$

$$\gamma_0 = C_0 = 0,71$$

$$\gamma_1 = Esf = 2,78 \cdot \left[1,5 \left(\frac{h}{a_1} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a_1} \right)^3 \right]$$

$$\text{para } \gamma = 1; \quad h = \sqrt{(0,51)^2 \cdot (h_y)^2 + (h_x)^2}$$

$$\gamma_2 = Esf = 1,21 \cdot \left[1,5 \left(\frac{h_x}{a_2} \right) - 0,5 \left(\frac{h_x}{a_2} \right)^3 \right]$$

Tabela 5.6 - Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S4.

ESTRUT./MODELO	PATAMAR	ALCANCE	Ax / Ay
γ_0 (Efeito pepita)	$C_0=0,71$		
γ_1 (Esférico)	$C_1=2,78$	Az340° - $a_1=867m$ Az70° - $a_1=445m$	Anisotropia Geométrica Ax=0,51 Ay
γ_2 (Esférico)	$C_2=1,21$	$a_2=815m$	Anisotr. Zonal Ax=1; Ay=0

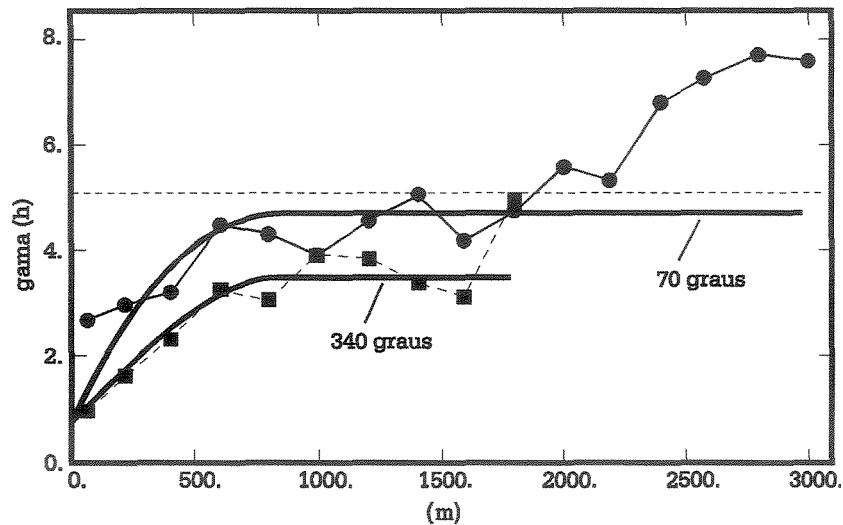
A figura 5.12 mostra os variogramas experimentais nas direções de maior (Az 340°) e menor continuidade (Az 70°) do fenômeno, e os modelos ajustados para eles.

Embora seja esperada uma boa continuidade para a variável espessura em regiões próximas a cada amostra, os pontos iniciais no variograma de Az 70° revelaram valores altos de variabilidade, descartando-se a escolha de um modelo gaussiano. Já um modelo exponencial também não representaria de forma adequada os referidos pontos. Consequentemente decidiu-se adotar na modelagem um efeito pepita para a primeira estrutura, correspondendo a 13% da variabilidade total do fenômeno.

As causas desse efeito pepita podem ser várias, podendo ter um componente inserido na própria estrutura, outro pode ser devido a erros de medida, e um terceiro componente poderia estar relacionado a fraca representatividade dos dados em curtas distâncias (Journel & Huijbregts, 1978; Guerra, 1988).

Em seguida foram somadas duas estruturas esféricas, considerando as anisotropias geométrica e zonal observadas. O imbricamento pronunciado presente nos últimos pontos do variograma experimental de Az 70°, apesar de

sugerir a presença de algum conjunto de lobos significativo nas regiões de borda, não foi modelado devido a sua grande distância.



Az 340° - maior continuidade

Az 70° - menor continuidade

Figura 5.12 - Modelo variográfico da zona S4.

-ZONA S5

Na tabela 5.7 encontra-se o modelo teórico ajustado com seus respectivos parâmetros estruturais.

Para a expressão matemática tem-se:

$$\gamma(h) = \gamma$$

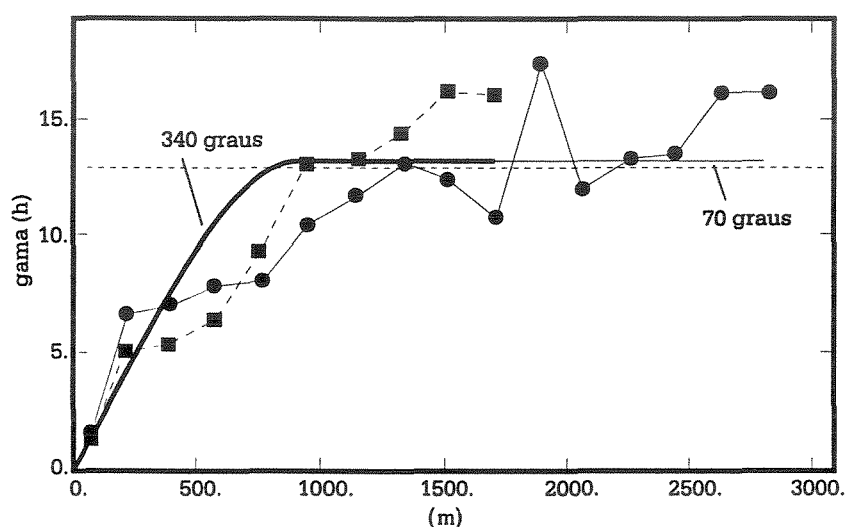
$$\gamma(h) = C \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad - \text{ Modelo Esférico}$$

$$\gamma = Esf = 13,1 \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$$

Tabela 5.7 - Modelo teórico de variograma ajustado para a zona S5.

ESTRUT./MODELO	PATAMAR	ALCANCE	A_x / A_y
γ (Esférico)	$C=13,1$	$a=1100m$	Isotropia $A_x=A_y$

Os variogramas experimentais nas direções de maior e menor continuidade (Az 340° e Az 70°, respectivamente), e seus modelos ajustados podem ser observados na figura 5.13.



Az 340° - maior continuidade

Az 70° - menor continuidade

Figura 5.13 - Modelo variográfico da zona S5.

Devido ao comportamento físico diferenciado dos corpos arenosos, foi dado um enfoque particular na modelagem dos variogramas da zona S5. Por representar o reservatório mais espesso do intervalo estudado, o aumento da espessura de arenito provocou uma mudança na escala de trabalho, relativamente as demais zonas. A partir daí, os variogramas experimentais nas direções de maior e menor continuidade revelaram valores muito próximos, tanto para o

alcance quanto para o patamar, proporcionando um caráter isotrópico da variável nessa zona.

Os modelos gaussiano e exponencial foram descartados, devido aos valores altos de variabilidade observados nos primeiros pontos do variograma (no caso do gaussiano), e também pelo aumento brando da variabilidade nesses pontos, o que inviabilizou a modelagem através do modelo exponencial.

O modelo que obteve o melhor ajuste foi o esférico isotrópico, sendo desnecessária a soma de uma segunda estrutura qualquer. Na modelagem procurou-se honrar os pontos iniciais da pesquisa variográfica, bem como os imbricamentos presentes, principalmente aqueles posicionados mais próximos a origem.

5.5 - PESQUISA DE VIZINHANÇA

Após a modelagem dos variogramas de cada zona, foi realizada uma pesquisa de vizinhança na área de estudo. Trata-se de um procedimento fundamental num estudo geoestatístico fornecendo dados para a etapa de krigagem, que gera os mapas de isovalores da variável.

Essa pesquisa estabelece parâmetros diferenciados que serão usados no algoritmo escolhido para a krigagem, segundo os diferentes padrões de variabilidade espacial que ocorrem nas direções de maior e menor continuidade do fenômeno geológico em estudo. Além disso, como as duas direções perfazem um ângulo de 90° entre elas, para qualquer par de pontos posicionados numa direção intermediária, já está incorporado ao programa valores equivalentes dos parâmetros escolhidos, segundo a componente dessa determinada direção.

A pesquisa de vizinhança é a etapa que antecede a da validação cruzada (descrita no próximo item), e representa a verificação de todos os parâmetros que serão utilizados na krigagem.

No caso de **isotropia**, o programa utilizado na análise geoestatística ISATIS (ISATIS, 1994) registra num arquivo de parâmetros um único modelo variográfico ajustado para descrever o fenômeno em todas as direções, usando para isso um critério denominado de **vizinhança única**. Já no caso de **anisotropia**, são registrados dois modelos variográficos (nas direções de maior e

menor continuidade), sendo utilizado o critério de **vizinhança móvel**. Além dos modelos, esse arquivo incorpora também os parâmetros de vizinhança definidos na pesquisa.

Os trabalhos dessa etapa se iniciam com a criação de um *grid*, o mesmo que foi usado posteriormente no processo de krigagem. No presente caso, onde os pontos amostrais se encontram agrupados numa área de cerca de 25 km², aproximadamente retangular e alongada segundo a direção SW/NE, foi necessária a criação de um *grid* de 56 km² para o seu recobrimento total. Esse *grid* dimensionado igualmente para todas as zonas contém 1400 nós, com espaçamento de 200m entre eles, valor esse próximo da distância média entre os poços (215m). Foi feita ainda uma tentativa de se usar uma distância maior, o que mostrou-se inconveniente devido a perda de algumas informações.

Na pesquisa de vizinhança, alguns parâmetros definidos foram comuns para todas as 4 zonas principais analisadas. Por exemplo, no raio de busca, a divisão em 8 setores revelou-se a mais adequada, sendo o número mínimo exigido de 2 pontos, e um número ideal de 8 pontos para a realização dos cálculos. O número mínimo de pontos poderia ser maior devido a alta densidade amostral; porém, decidiu-se pelo mínimo de 2, para que algumas informações posicionadas nas bordas dos mapas não fossem desprezadas, principalmente em certas regiões onde os poços estão algo mais distantes entre si. O número ideal adotado de 8 pontos também pode causar alguns problemas, principalmente em zona onde existem agrupamentos de poços e ela se encontra ausente; todavia, como esse tipo de situação ocorre com pouca frequência, um número mais baixo do que esse foi testado e revelou também a perda de algumas informações.

As distâncias do raio de busca devem ser atenciosamente definidas para cada zona. Geralmente, tanto para a direção de maior quanto de menor continuidade, o critério que se adota é definir um valor que seja aproximadamente 50% do valor do seu alcance atingido.

É lógico que sempre ocorrem problemas locais de distorções, pois dificilmente as áreas de pesquisa possuem malhas regularmente espaçadas. Com isso, um determinado raio de busca que está adequado para quase toda a área pode causar problemas localizados, como distorções por insuficiência de dados, ou mesmo falta de resolução em algumas regiões dos mapas krigados. Na maioria

dos programas geoestatísticos, como é o caso do ISATIS, existem mecanismos para se contornar esses problemas, bastando para isso se fazer uma análise das amostras vizinhas que estão sendo utilizadas na estimativa dos pontos problemáticos, com o objetivo de se estabelecer parâmetros específicos para essas regiões.

5.6 - VALIDAÇÃO CRUZADA

Em seguida foi aplicada a técnica da validação cruzada, onde se analisa a compatibilidade dos modelos variográficos e também os parâmetros de vizinhança estabelecidos, com os valores das amostras.

Esse procedimento funciona como uma pré-krigagem, pois cada valor amostral fica oculto inicialmente e é estimado por krigagem a partir dos valores já estabelecidos das amostras vizinhas (Srivastava & Isaaks, 1989). A partir daí, os pontos real (Z) e estimado (Z^*) são confrontados, gerando-se um erro atribuído ao processo usado na estimativa, através da diferença entre eles ($Z-Z^*$). A análise quantitativa dos erros cometidos ponto a ponto é feita através do diagrama de dispersão de Z x Z^* , do diagrama de dispersão dos erros padronizados $(Z-Z^*)/S^* \times Z^*$ (onde S representa o desvio padrão), e do histograma de distribuição desses erros padronizados. Os pontos amostrais com eventuais valores anômalos (denominados *outliers* ou pontos não robustos), encontram-se referenciados num mapa base anexo de cada zona.

Essa técnica, além da quantificação dos erros que foram cometidos no processo de estimativa escolhido, fornece elementos para se fazer uma calibração dos modelos e parâmetros de vizinhança pré-estabelecidos. Os referidos elementos geoestatísticos poderão ser reformulados, caso os valores anômalos tenham uma frequência de média a alta e os erros comprovem a falta de resolução da ferramenta naquela área específica.

A partir dos diagramas de dispersão de erros padronizados $(Z-Z^*)/S^* \times Z^*$ das zonas S2, S4 e S5 (figs. 5.14A, 5.16A e 5.17A), foi observado que de uma maneira geral, os modelos variográficos ajustados e também os parâmetros de vizinhança adotados se encontram dentro dos padrões de confiabilidade (vide pontos em “cruzes”). Os pontos em “bolas” representam anomalias.

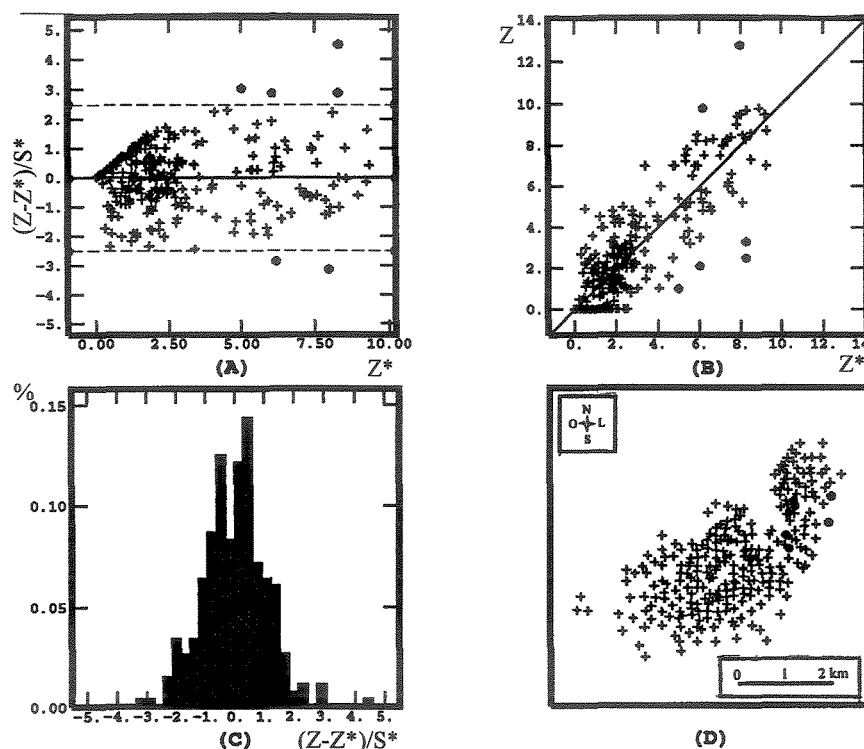


Figura 5.14 - (S2) Validação cruzada - (A) Diagrama de dispersão dos erros padronizados (onde S^* é o desvio padrão); (B) Diagrama de dispersão de $Z \times Z^*$; (C) Histograma dos erros padronizados; (D) Mapa base.

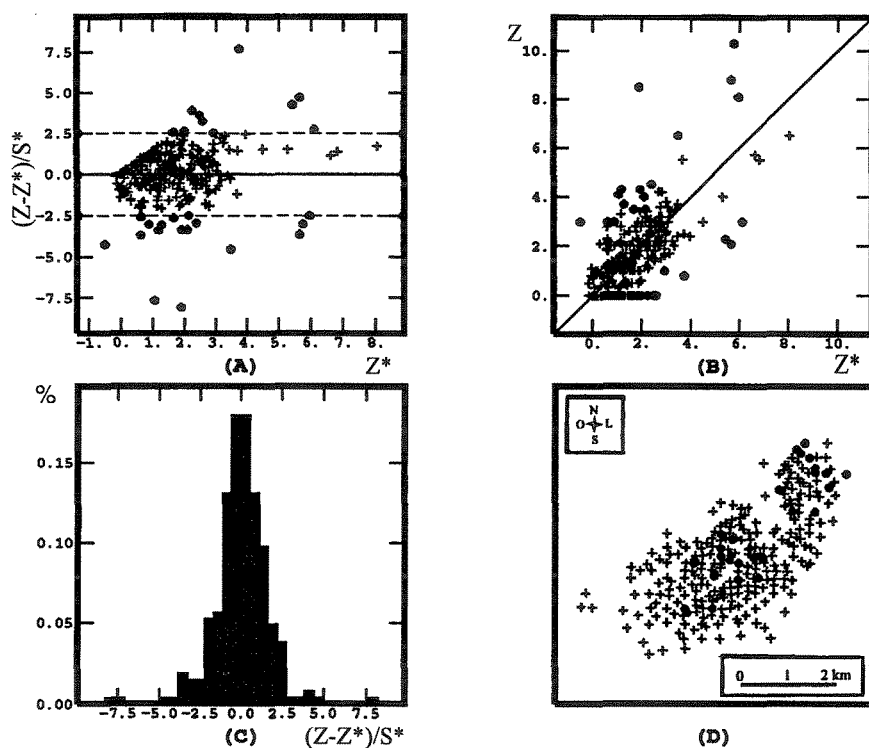


Figura 5.15 - (S3) Validação cruzada - (A) Diagrama de dispersão dos erros padronizados (onde S^* é o desvio padrão); (B) Diagrama de dispersão de $Z \times Z^*$; (C) Histograma dos erros padronizados; (D) Mapa base.

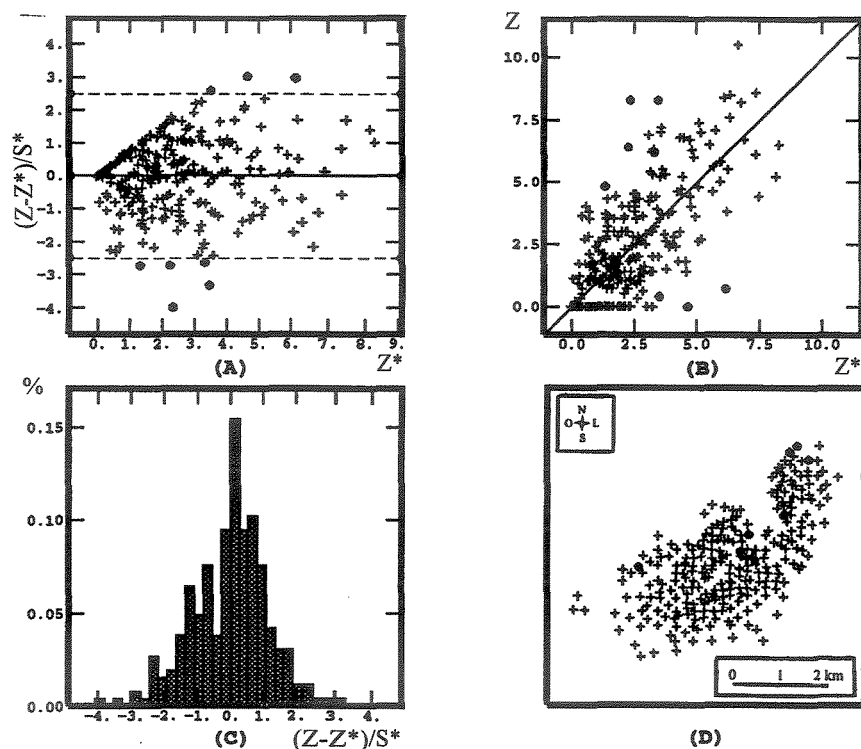


Figura 5.16 - (S4) Validação cruzada - (A) Diagrama de dispersão dos erros padronizados (onde S^* é o desvio padrão); (B) Diagrama de dispersão de $Z \times Z^*$; (C) Histograma dos erros padronizados; (D) Mapa base.

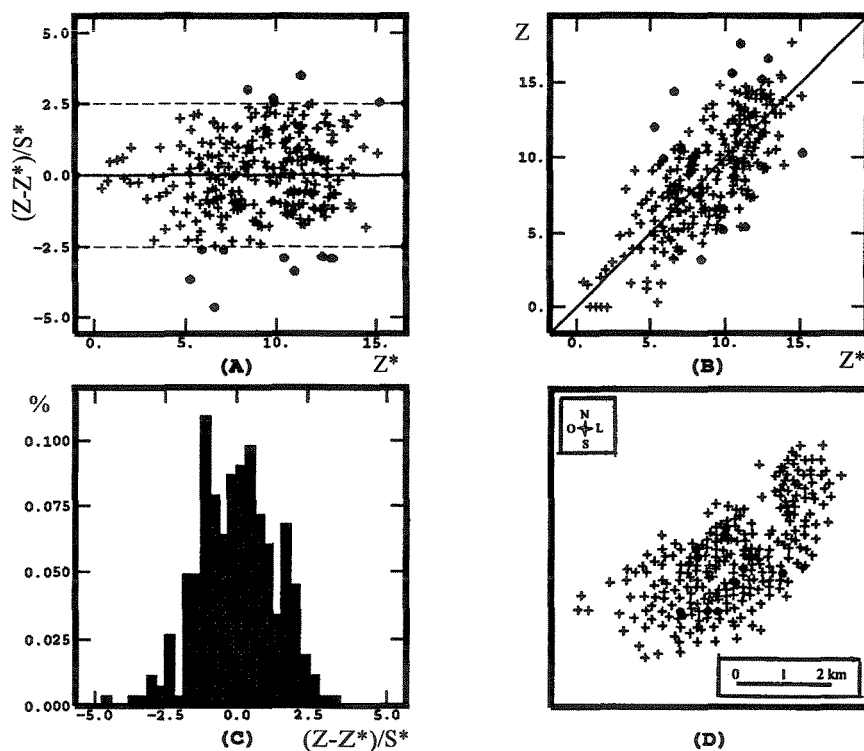


Figura 5.17 - (S5) Validação cruzada - (A) Diagrama de dispersão dos erros padronizados (onde S^* é o desvio padrão); (B) Diagrama de dispersão de $Z \times Z^*$; (C) Histograma dos erros padronizados; (D) Mapa base.

Na zona S3 (fig. 5.15A) onde ocorre o maior número de pontos discrepantes, foi feita uma tentativa sem sucesso de se obter um melhor resultado. Como a maioria dos pontos anômalos foi originada tanto a partir de amostras com valores extremos, quanto de amostras localizadas nas bordas da área (problemas que serão abordados mais adiante), os resultados iniciais foram considerados satisfatórios para os objetivos propostos pelo presente trabalho. Além disso, o total de 10% de pontos discrepantes numa área com uma densa malha de amostras como essa, é tido como razoável.

Os diagramas de dispersão de $Z \times Z^*$ (figs. 5.14B, 5.16B e 5.17B) indicam uma boa correlação para as zonas S2, S4 e S5, onde a maioria dos pontos se encontra em torno da primeira bissetriz. Para a zona S3 (fig. 5.15B), assim como ocorre no diagrama de erros padronizados, os 10% de valores anômalos revelados foram considerados aceitáveis.

Os histogramas dos erros padronizados (figs. 5.14C, 5.15C, 5.16C e 5.17C) exibem um certo caráter bimodal, com excessão da zona S3. A boa escolha dos modelos e dos parâmetros de vizinhança fica assegurada pela tendência do comportamento gaussiano revelado pelas respectivas curvas de distribuição, sendo observados poucos valores fora do intervalo de confiabilidade (entre -2 e 2).

Pelo mapa base das 4 zonas (figs. 5.14D, 5.15D, 5.16D e 5.17D) pode-se identificar o posicionamento dos *outliers*, que são decorrentes da limitação da ferramenta utilizada.

O maior problema registrado nesse processo de estimativa refere-se ao caso dos **valores extremos**. Como o algoritmo trabalha com um raio de busca, para uma determinada amostra com valor muito alto e que se encontre próxima a amostras com valores baixos, o primeiro ponto é estimado a partir da média dos valores que estão ao seu redor, tendendo a haver uma suavização nesse local, o que em muitos casos provoca uma drástica redução desses valores máximos. De maneira análoga, o mesmo ocorre com os valores mínimos.

Outro problema frequente é o das **amostras localizadas em áreas limítrofes**, onde foram detectados alguns pontos mal estimados nessa situação. Isso pode ocorrer, dependendo se o ponto a estimar estiver um pouco mais longe do que o normal em relação aos seus vizinhos, sendo que o raio de busca abrange

um número insuficiente de pontos para uma boa estimativa.

No caso da zona S3, o grande número de pontos discrepantes ocorreu principalmente devido ao problema da suavização de valores extremos mencionado anteriormente, inclusive porque é possível a observação de um certo número de amostras com valor zero (o que também é um extremo), perfazendo regiões de ausência do corpo arenoso dentro da área de estudo. As demais anomalias são, na maioria, causadas por pontos localizados na borda da área nordeste, onde ocorre ambos os efeitos de borda e de valores extremos.

Para todos esses problemas existem artifícios que poderiam melhorar mais os valores que não estão bem estimados, como por exemplo mudar os parâmetros de vizinhança em algumas áreas de borda, em áreas com baixa densidade amostral ou ainda nos locais de valores extremos.

Analisando-se a situação da zona S3, foi constatado que uma mudança do modelo variográfico ajustado e também dos parâmetros de vizinhança para toda a área, não iria resultar na melhora dos pontos mal estimados, devendo o problema ser abordado ponto a ponto. Caso seja necessária a elaboração de mapas de estimativa mais aprimorados, na definição dos limites internos do reservatório em áreas onde o mesmo pode ou não estar presente, poderia ser usado paralelamente um outro algoritmo para uma melhor resolução desses pontos localizados.

5.7 - KRIGAGEM

Concluída a etapa de validação cruzada, foi elaborada então a krigagem propriamente dita. Convém mencionar a importância parcial dos mapas krigados de espessura no presente trabalho, principalmente por se constituírem ferramentas auxiliares da variografia na análise geométrica e do comportamento dos reservatórios deltaicos.

Antes de se iniciar o processo de krigagem, aventou-se a possibilidade de serem retirados alguns pontos com valor zero do espaço amostral, procurando manter apenas aqueles pontos condicionantes, para informar ao programa a existência dessas áreas de ausência do reservatório. Com esse procedimento estaríamos diminuindo o efeito de suavização que certamente seria implementado pelo operador de krigagem. Mesmo tendo uma quantidade pequena de amostras

nessa situação, foi decidido que a atitude não seria conveniente, pois a omissão desses dados poderia prejudicar a interpretação dos resultados. Quanto aos problemas de suavização, existem mecanismos para se amenizar esses efeitos, a depender dos objetivos pretendidos. A criação de uma linha artificial de zeros limitando essas áreas também foi descartada, pois a quantificação da incerteza dos dados poderia estar sendo influenciada pelas tendências geradas por essas informações.

Como se está trabalhando com a espessura de corpos lobados de um sistema deltaico, de antemão já se sabe que a variável não tem comportamento estacionário em toda a área, pela própria forma de ocorrência dos corpos, sendo mais espessos no centro e com tendência a um afinamento nas bordas. No entanto, tem-se o conhecimento de que essa variável tende a ter boa continuidade em áreas restritas, e por isso pode-se admitir para ela uma estacionariedade local. Nesse caso, optou-se pela técnica da krigagem ordinária, pois a mesma exige que o fenômeno em tratamento seja localmente estacionário.

Durante a fase de análise dos variogramas experimentais, foram observados imbricamentos em algumas das direções, estando presentes nos variogramas de todas as quatro zonas principais. **Essas estruturas imbricadas refletem, entre outras coisas, a superposição de uma ou mais estruturas sobre a primeira.** Nos estudos regionais, onde a malha de pontos é extremamente irregular e é constante a presença de agrupamentos, os imbricamentos revelados representam muitas vezes a soma de estruturas de diferentes escalas. Para casos como esse, se faz necessário um tratamento geoestatístico diferenciado como o método da **krigagem fatorial**, que considera essas diferenças de escala (Cortez, 1996). No presente estudo, as mudanças de escala na variabilidade dos dados observadas são atribuídas à própria amalgamação dos lobos deltaicos, a partir de uma malha relativamente regular e densa de poços, onde o reservatório ocorre na maioria das amostras.

Como produtos finais da krigagem pontual, os mapas de espessura de arenitos por zona (figs. 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21) encontram-se dentro dos limites aceitáveis de confiabilidade para uma análise semi-quantitativa. Os 5 poços localizados estrategicamente ao longo da área e retirados do arquivo inicial antes da aplicação das técnicas geoestatísticas, mostraram seus valores reais compatíveis

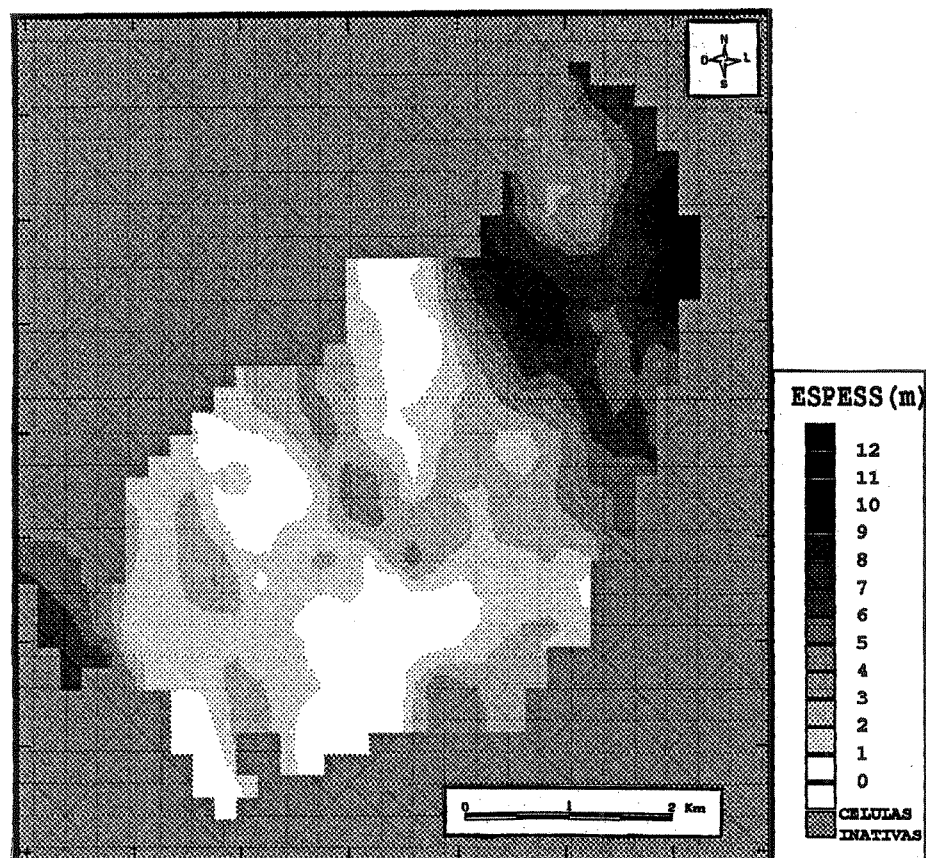


Figura 5.18 - (S2) Mapa krigado de espessura.

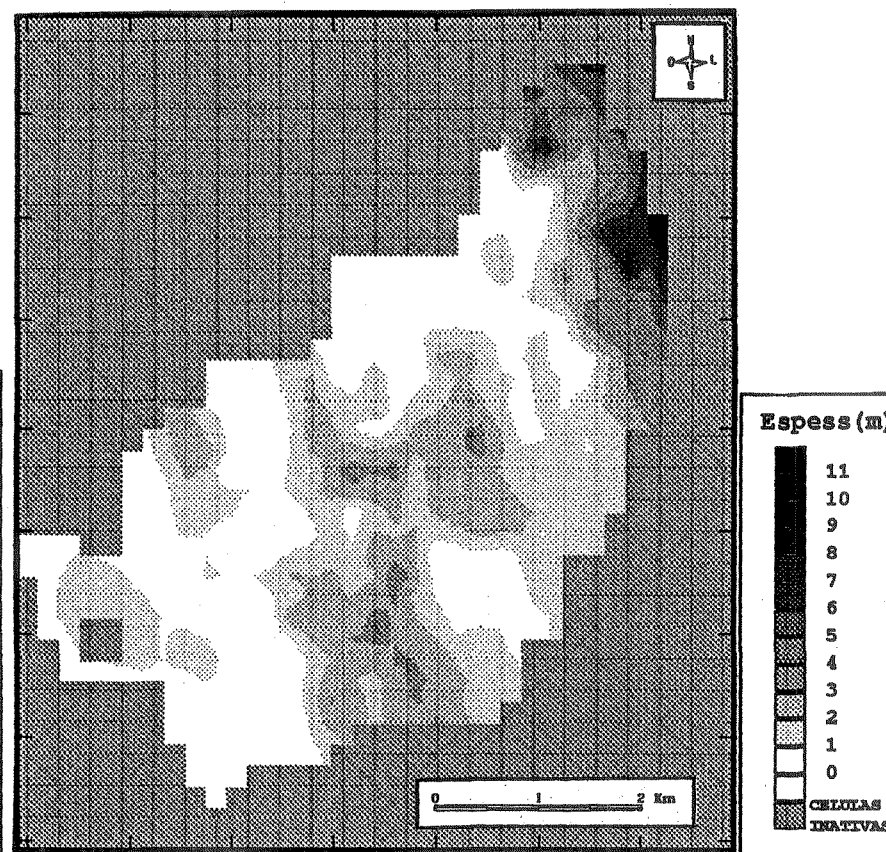


Figura 5.19 - (S3) Mapa krigado de espessura.

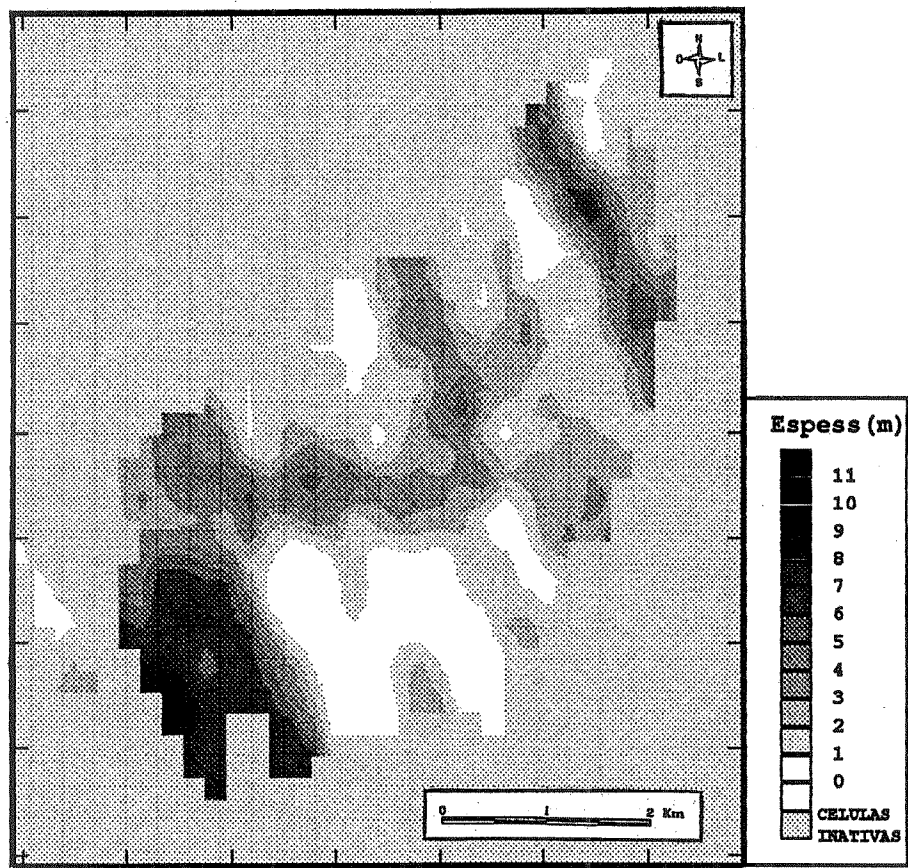


Figura 5.20 - (S4) Mapa krigado de espessura.

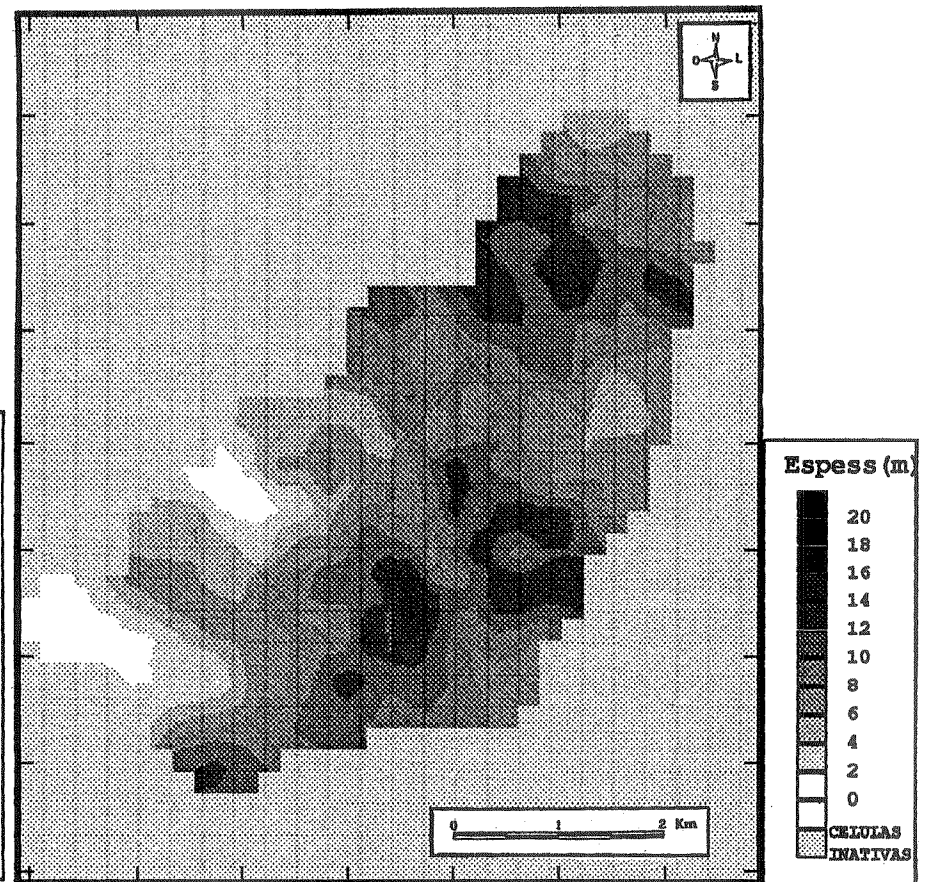


Figura 5.21 - (S5) Mapa krigado de espessura.

com os respectivos valores krigados. Os mapas de desvio padrão também gerados pelo programa e que não fazem parte da lista de figuras desse trabalho, mostraram-se coerentes, com os valores mais altos tendendo a se posicionar nas bordas, atestando uma melhor estimativa na área central das 4 zonas pela maior quantidade de dados aí existente (Remacre, 1995).

Quando os mapas krigados das zonas S2, S3, S4 e S5 são confrontados, observa-se o **efeito dos arranjos de compensação e o processo de amalgamação de lobos e conjuntos de lobos**, com tendência aos corpos superiores serem depositados nos baixos criados pelo paleorelevo dos corpos sotopostos. Essas e outras informações obtidas dos mapas krigados, associadas aos mapas com valores proporcionais de espessura, constituem importantes ferramentas para auxiliar a análise variográfica da variável espessura. Com a integração de todos esses dados, somados a síntese estratigráfica desenvolvida na parte inicial desse trabalho, foram criadas condições de se fazer uma caracterização bastante criteriosa dos padrões de distribuição dos conjuntos de lobos deltaicos.

5.8 - RESULTADOS

Os resultados obtidos com a análise geoestatística de depósitos deltaicos foram bastante significativos. Isto porque, sempre que se elabora um estudo estratigráfico detalhado, a etapa seguinte que seria a da quantificação através de técnicas geoestatísticas dos elementos de arquitetura da geometria externa definidos, tem sido muito pouco explorada, deixando uma lacuna vazia nas tarefas de caracterização dos reservatórios.

Quando se pretende fazer um estudo variográfico, é de grande importância que sejam tomadas algumas precauções como o amplo conhecimento dos processos sedimentológicos que atuaram na formação dos reservatórios, a conscientização das dimensões da área e da escala de trabalho, a escolha do tratamento preliminar que será dado a variável em foco, e também das escalas de variabilidade que se fazem presentes, como será abordado adiante. Todos esses procedimentos se fazem necessários, para que as estruturas reveladas pelos variogramas gerados estejam próximas do comportamento real da variável, e

consequentemente, não sejam feitas interpretações errôneas (Remacre, 1995).

A análise dos variogramas experimentais revelou elementos de arquitetura da geometria externa dos corpos rochosos, para cada uma das zonas e também referentes a todo o intervalo estudado. Algumas feições que podem ocorrer nos variogramas são de suma importância para definir esses elementos e, em alguns casos, quantificar a geometria externa dos reservatórios. Uma delas é o caso da feição denominada informalmente de efeito “buraco”, originado pela alternância cíclica de valores altos e baixos da variável espessura, e cuja trajetória pode ser descrita através de uma função trigonométrica. Obtido no próprio variograma, o comprimento de onda dessa função pode fornecer a medida do comprimento ou largura do reservatório, a depender das dimensões do corpo e da direção da pesquisa variográfica. O termo “efeito buraco” deve ser utilizado com alguma cautela pois, em alguns casos, essas estruturas podem não ter significado geológico ou representar tendências que não se enquadram nos objetivos pretendidos.

No caso de estudo, somente na zona S3 se conseguiu quantificar um elemento geométrico dos corpos lobados através do efeito “buraco”, obtendo-se um valor de 1550m para a **largura média** dos conjuntos de lobos deltaicos, uma vez que o referido variograma encontra-se na direção ortogonal a do eixo longitudinal desses corpos (Az 70°). Na zona S4, o variograma de Az 10° também apresentou um efeito “buraco”, revelando 1700m para o comprimento de onda da função trigonométrica que o descreve. Nesse caso, a largura média dos conjuntos de lobos foi considerada não realística (aparente) por ser obtida de um variograma de direção oblíqua a de maior continuidade. Na direção ortogonal a essa ocorreu um problema de superposição de estruturas, como será mencionado nos parágrafos seguintes.

Foi observada no variograma de Az 300° da zona S3 (fig. 5.6), uma feição com um comportamento fisicamente semelhante ao de um “efeito buraco”, tendendo a ter uma mesma ciclicidade da variância, porém apresentando uma forma da curva diferente. Ao se analisar o mapa com valores proporcionais de espessura, nota-se que esse mesmo variograma atravessa basicamente 3 corpos (ou setores) da área total; ao passo que o de Az 70° atravessa 4 corpos. Seguindo esse raciocínio, pode-se sugerir que essa feição do primeiro variograma

represente o mesmo trecho inicial do efeito “buraco” que aparece no variograma de Az 70°, encontrando-se em direção oblíqua a de maior continuidade. Portanto, o valor aproximado de 1650m obtido do comprimento de onda do primeiro variograma, representa também uma largura média aparente para os lobos dessa zona. É conveniente também notar as diferenças de escala dos eixos nos dois variogramas.

Analisando-se os diagramas em rosa das 4 zonas principais, constatou-se que, de uma maneira generalizada, a direção de maior continuidade do fenômeno geológico é NNW-SSE. No entanto, a direção de menor continuidade não se encontra ortogonalmente a primeira, onde o seu valor real de alcance está mascarado pela superposição de outras estruturas. Na verdade, esses valores mais altos do que o esperado para os alcances registrados nessas direções ortogonais a do eixo longitudinal, são atribuídos a **amalgamação lateral dos lobos**, fazendo com que exista uma **região de recobrimento** entre duas áreas de conjuntos de lobos (áreas interlobos) que, em muitos casos, proporciona um padrão de continuidade em pesquisas assim posicionadas. Portanto, conclui-se que **as escalas de variabilidade dadas pelos dois alcances de direções ortogonais são diferentes**. Esse padrão ocorre em todas as 4 zonas detalhadas, inclusive na de maior espessura (S5).

É de suma importância a identificação dessas direções de anisotropia da variável espessura numa caracterização geométrica, atentando-se para a “mistura” de escalas de variabilidade, principalmente para subsidiar geologicamente projetos de injeção no campo.

Os variogramas experimentais de todas as zonas, revelaram a presença marcante de **estruturas imbricadas** (*nested structures*), a maioria interpretadas como representantes de mudanças no padrão de espessura, ou seja, quando muda-se de um setor de conjunto de lobos para outro de área interlobos, ou vice-versa. De qualquer maneira, **é importante observar que esses imbricamentos podem ocorrer tanto dentro de um único setor (mesma escala) como entre setores (escalas diferentes)**.

A análise dos mapas proporcionais com o auxílio dos mapas krigados de espessura das diversas zonas, revela o processo de afogamento do sistema deltaico pelo lago do Recôncavo de SSE para NNW (figs. 4.8 a 4.13 e 5.18 a

5.21), onde ocorre uma tendência a um deslocamento dos arenitos mais recentes nesse sentido. Pode-se ainda ter uma noção dos **efeitos de arranjos de compensação** e do **alto aporte sedimentar** dado pela intensa amalgamação dos conjuntos de lobos, onde os superiores tendem a preencher as áreas mais baixas delineadas pelos paleoaltos das zonas sotopostas. Alguns elementos geométricos como limites de corpos também podem ser visualizados, bem como as variações relativas dos eixos longitudinais dos conjuntos de lobos.

Para os arenitos de menor espessura (zonas S2 e S3), observa-se uma melhor definição na compartimentação dos setores que constituem os lobos e as áreas interlobos. Nos mapas da zona de espessura intermediária (S4), as áreas interlobos não estão bem delineadas regularmente como nas anteriores, causando variogramas com estruturas mal definidas; diferentemente das demais zonas, o truncamento do conjunto central de lobos sugere a presença do limite longitudinal do mesmo. Já na zona mais possante (S5), pouco se pode fazer inferências sobre a geometria dos seus arenitos, pois a grande espessura em quase toda a área não permite uma divisão da mesma em setores, com tendência a isotropia. Nesse caso, é possível que os arenitos dessa zona englobem um conjunto único de lobos, cujos limites estão ou estariam (no caso da presença de erosão) fora dos limites da área de estudo. Por esse motivo, a análise geoestatística da zona S5 deve ser abordada com um enfoque diferente das demais, devido a mudança na escala da espessura das zonas.

A análise dos mapas krigados de espessura revelou que os mesmos estão coerentes com o contexto geológico a que estão inseridos. Foram observadas algumas distorções, mesmo estando dentro dos padrões de confiabilidade estabelecidos pelos mecanismos de avaliação do próprio método. Devido a escala de trabalho e a prioridade dada nesse estudo para a análise variográfica, foram solucionados apenas alguns desses problemas. Caso os mapas sejam usados para inferências quantitativas como cálculo de volumes ou previsão de espessuras de reservatório em prospectos de locações exploratórias, deve-se recorrer aos artifícios que existem para o aprimoramento dos mesmos.

Um problema muito frequente é o dos **valores extremos**, ou seja, quando tem-se um valor máximo ou mínimo, o algoritmo vai estimar um valor para o ponto a partir dos que estão a sua volta (menores no primeiro caso e maiores no

segundo), causando uma suavização do mapa krigado na região desses valores extremos. Para amenizar o problema, pode-se identificar esses valores *a priori* e escolher parâmetros de vizinhança específicos para essas áreas.

Outro tipo frequente de *outlier* (ponto discrepante entre os valores estimado e verdadeiro), são alguns **pontos localizados nas bordas** das áreas de pesquisa. Assim como no problema anterior, os parâmetros de vizinhança escolhidos para representar toda a área estão inadequados somente para esses determinados pontos, sendo necessária uma revisão dos mesmos em cada região da área que apresenta distorções. A reformulação dos parâmetros de vizinhança também deve ser efetuada, na presença de áreas internas ao mapa onde não houve resolução da técnica aplicada.

Um outro tipo de problema relevante é o das áreas onde o reservatório está ausente. A depender da quantidade de amostras existentes com valor nulo, o modelo variográfico ajustado pode apresentar distorções nos padrões de comportamento da variável espessura, causando uma resolução do mapa pouco satisfatória nessas regiões. Nesse caso, vários procedimentos podem ser tomados, sendo que cada caso deve ser analisado separadamente.

Em trabalhos regionais, é muito frequente a retirada desses agrupamentos de valores nulos, deixando apenas aqueles situados nas bordas das áreas de ausência do reservatório. Não foi adotado esse procedimento para as zonas onde ocorre esse tipo de problema, devido a reduzida área de trabalho e também pela densa malha de poços presente, distribuídos de maneira aproximadamente regular.

Outra alternativa para uma melhor definição de limites, poderia ser o algoritmo da **krigagem com desigualdades** (Langlais, 1990), que seria usado somente nessas regiões de ausência de arenito. A princípio, o método não sugere uma única posição para o limite do reservatório numa determinada área e sim um intervalo de possíveis posições, onde em cada um desses intervalos é estimada a melhor posição para o limite.

Alguns trabalhos, como é o caso de Soares (1990), têm usado a **krigagem da indicatriz** na delimitação da geometria externa de corpos rochosos. O produto final seria um mapa indicando as áreas de presença ou ausência de reservatório

que, dependendo do caso, poderia descrever de maneira fiel esses limites de ocorrência do reservatório em questão.

6) - CONCLUSÕES

1) O intervalo dessa pesquisa abrange uma sucessão sedimentar com espessura média de 55m, que registra o progressivo afogamento de um delta lacustre e está inserido num grande ciclo delimitado por duas superfícies máximas de inundação.

2) A análise dos testemunhos revelou 3 grupos faciológicos principais:

- rochas-reservatório - arenitos finos a muito finos com laminação plano-paralela e laminação cruzada de baixo ângulo produzida pela migração das marcas de corrente;
- rochas não-reservatório (I) - intercalação de siltitos, lamitos e arenitos muito finos, com presença secundária de calcissiltitos;
- rochas não-reservatório (II) - folhelhos cinza escuros finamente laminados (marcos estratigráficos).

3) A partir da interpretação dos testemunhos e seções estratigráficas, os reservatórios estudados foram definidos como corpos arenosos lobados, formados pela amalgamação de barras de desembocadura de canais distributários e, secundariamente, como acumulações de sedimentos provenientes do rompimento dos diques marginais de canais distributários.

4) Considerando que a maioria das heterogeneidades internas dos reservatórios deltaicos da área foi originada por processos sin-deposicionais, podem ser destacadas as seguintes:

- camadas pelíticas de afogamento do delta pelo meio aquoso permanente (lago);
- superfícies erosionais presentes na base de alguns corpos arenosos, os quais revelam espessuras tanto de alguns metros quanto de poucos milímetros;
- níveis conglomeráticos que frequentemente acompanham essas superfícies erosionais;
- variações verticais na textura dos arenitos, onde se observa uma tendência de

granodecrescência e redução de porosidade ascendente;

- variações laterais na textura dos arenitos, com os lobos deltaicos tendendo a apresentar uma redução de granulometria do centro para as bordas.

5) A detecção de alguns elementos de arquitetura como limites físicos de topo/base e laterais dos arenitos, tipos desses limites, formas e dimensões, direções preferenciais de ocorrência e relações entre os corpos, serviram como base para caracterização da macrogeometria dos reservatórios. Nas seções *dip* não foi possível visualizar a presença de corpos sigmoidais completos, provavelmente devido a pequena área de estudo. Nas seções *strike*, observa-se uma geometria lenticular para a envoltória dos conjuntos de lobos deltaicos, sendo possível a individualização de setores dispostos lateralmente entre si, que representam tanto áreas de conjuntos de lobos deltaicos quanto áreas interlobos.

6) Em estudos estratigráficos de alta resolução, é importante a integração da sucessão sedimentar estudada com os ambientes sedimentares contíguos, para que os marcos estratigráficos regionais sejam bem caracterizados, e com isso o agrupamento e correlação das rochas contemporâneas tenham um maior grau de confiabilidade.

7) Com base na análise estratigráfica, foram definidas 5 unidades ou zonas. Na de maior espessura (zona S5) ocorreu uma mudança na escala de observação, onde os elementos da geometria externa dos lobos não foram identificados devido ao caráter isotrópico da zona dado pela homogeneidade dos valores de espessura. Portanto, nesse tipo de estudo os melhores resultados são obtidos em reservatórios não necessariamente pouco espessos, mas que apresentem um certo padrão de variabilidade da variável ao longo da área.

8) A comparação dos mapas proporcionais de espessura das diversas zonas e também dos mapas krigados, mostra os arranjos de compensação entre os lobos deltaicos e a sua amalgamação, algumas feições geométricas indicando limites laterais e até longitudinais (zona S4) dos corpos lobados, a variação na direção dos seus respectivos eixos deposicionais, e ainda o processo de afogamento do

delta através da tendência de sucessivo deslocamento dos conjuntos de lobos mais recentes para NNW.

9) O estudo variográfico detalhado mostrou-se bastante eficaz na detecção dos elementos que caracterizam quantitativamente a geometria externa de corpos rochosos, como a feição informalmente conhecida como efeito “buraco”. Na zona S3 obteve-se o valor de 1550m para a largura média dos conjuntos de lobos de frente deltaica, a partir do comprimento de onda da função trigonométrica que descreve essa feição no variograma da direção de menor continuidade (Az 70°). Os valores obtidos através do efeito “buraco” presente em outros variogramas das diversas zonas não foram considerados por ocorrerem sempre em direções oblíquas as de maior continuidade dos corpos arenosos, registrando apenas valores aparentes para a largura média dos conjuntos de lobos.

10) Através dos diagramas em rosa, obteve-se a direção de NNW-SSE para o eixo deposicional do sistema de lobos de frente deltaica (maior alcance dos variogramas). Adicionalmente, foi observada uma superposição de estruturas que ocultaram os valores reais dos alcances nas direções de menor continuidade de todas as zonas, sendo isso atribuído a uma mudança na escala de observação no decorrer do estudo variográfico, onde a pesquisa foi realizada através de 1 (um) único conjunto de lobos deltaicos nas direções NW-SE e 2 (dois) ou mais conjuntos amalgamados lateralmente nas direções SW-NE.

11) O variograma mostrou-se uma poderosa ferramenta na quantificação da geometria externa de reservatórios, desde que seja elaborado de maneira criteriosa, onde se faz necessário um amplo reconhecimento dos processos deposicionais que atuaram na área de estudo, das dimensões desta, da representatividade da amostragem, do tipo de variável em tratamento e, principalmente, do controle das direções de anisotropia, e da relação que possa existir entre as escalas de variabilidade observadas e a geometria dos corpos rochosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BETTINI, C. & ALMEIDA, A.S., 1994. **Introdução a geoestatística.** PETROBRÁS, (Apostila de curso interno), 107 p.
- BHATTACHARYA, J.P. & WALKER, R.G., 1992. **Facies Models: Response to sea level change.** Geological Association of Canada, ch 9 (Deltas), p.157-177.
- BRAGA, J.A.E., 1987. **Estratigrafia, estrutura e acumulações de petróleo na Bacia do Recôncavo.** PETROBRÁS, in Seminário sobre rifts intracontinentais, 1987, Rio de Janeiro, p.204-218.
- BRUHN, C.H.L., 1995. **Rochas reservatório siliciclásticas.** Disciplina curricular do curso de mestrado em Geoengenharia de Reservatórios da UNICAMP (Notas de aula).
- BRISTOW, C.S. & MYERS, K.J., 1989. **Detailed sedimentology and gamma-ray log characteristics of a Namurian deltaic succession I: Sedimentology and facies analysis,** in WHATELEY, M.K.G. & PICKERING, K.T.; (eds), *Deltas: Sites and Traps for Fossil Fuels.* Geological Society Special Publication 41, p.75-80.
- CAIXETA, J.M.; BUENO, G.V.; MAGNAVITA, L.P. & FEIJÓ, F.J., 1994. **Coluna Estratigráfica das Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá.** Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, 8(1), jan./mar., p.163-172.
- COLEMAN, J.M. & WRIGHT, L.D., 1975. **Modern river deltas: variability of processes and sand bodies,** in, BROUSSARD, M.L., (ed.), *Deltas, models for exploration,* Houston, TX, Houston Geological Society, p.99-149.
- COLEMAN, J.M. & PRIOR, D.B., 1982. **Deltaic Environments,** in SCHOLLE,

- P.A. & SPEARING, D.R.; (eds.), *Sandstone Depositional Environments*. AAPG, Memoir 31, p.139-178.
- CORTEZ, M.M.M., 1996. **Análise Geoestatística da Geometria Externa dos Reservatórios Fluvial e Eólico da Formação Água Grande, Área Central da Bacia do Recôncavo**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 104 p.
- DELLA FÁVERA, J.C., 1987. **Natureza e significado estratigráfico dos marcos elétricos na seção do Andar Aratu, Bacia do Recôncavo**, in: Congresso Brasileiro de Paleontologia, Rio de Janeiro, N° 10, 72p.
- DELLA FÁVERA, J.C., 1995. **Fundamentos da estratigrafia moderna, notas de aula** (2ª edição). Disciplina curricular do curso de mestrado em Geoengenharia de Reservatórios da UNICAMP (Apostila), 165p.
- ELLIOT, T., 1986. **Deltas**, in READING, H.G. (ed.), *Sedimentary environments and facies*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, p.113-154.
- ELLIOT, T., 1989. **Deltaic systems and their contribution to an understanding of basin-fill successions**, in WHATELEY, M.K.G. & PICKERING, K.T.; (eds.), *Deltas: Sites and Traps for Fossil Fuels*. Geological Society Special Publication 41, p.3-10.
- FIGUEIREDO, A.M.F.; BRAGA, J.A.E.; ZABALAGA, J.C.; OLIVEIRA, J.J.; AGUIAR, G.A.; SILVA, O.B.; MATO, L.F.; DANIEL, L.M.F.; MAGNAVITA, L.P. & BRUHN, C.H.L.; 1994. **Recôncavo Basin: A Prolific Intracontinental Rift Basin**, in LANDON, S.M. (ed.), 1994, *Interior Rift Basins*, AAPG Memoir 59, p.157-203.
- FRIEDMAN, G.M. & SANDERS, J.E., 1978. **Principles of sedimentology**. John Wiley & Sons, Inc., 792p.
- GAGLIANONE, P.C.; TRINDADE, L.A.F. & DANIEL, L.M.F.; 1985. **Avaliação geoquímica regional da Bacia do Recôncavo: Fase 2**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, (Relatório interno), 156p.

- GALLOWAY, W.E., 1975. **Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems**, in, BROUSSARD, M.L., (ed.), *Deltas, models for exploration*, Houston, TX, Houston Geological Society, p.87-98.
- GALLOWAY, W.E. & HOBDAI, D.K., 1983. **Terrigenous clastic depositional systems**, ch 5 (Delta Systems). Springer-Verlag, N. York, p.81-113.
- GUERRA, P.A.G., 1988. **Geoestatística Operacional**. Ministério das Minas e Energia, DNPM, 145p.
- HORSCHUTZ, P.M.C., 1971. **Sedimentação deltaica no Membro Santiago da Formação Pojuca**. PETROBRÁS, (Relatório interno), 28p.
- ISATIS, 1994. **User's guide, To know more about Isatis**. Version 2.0, Fontainebleau, França.
- JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J., 1978. **Mining Geostatistics**. Academic Press, London, 598p.
- LANGLAIS, V., 1990. *Estimation sous contraintes d'inégalités*. Tese de Doutorado, *École des Mines de Paris*, França, 212p.
- MARTINSEN, O.J., 1990. **Fluvial, inertia-dominated deltaic deposition in the Namurian (Carboniferous) of northern England**. *Sedimentology* 37, p.1099-1113.
- MATO, L.F., 1984. **Arenitos reservatório do Membro Santiago Superior, no campo de Miranga - Bloco principal e bloco norte, Bacia do Recôncavo**. Salvador, PETROBRÁS, (Relatório interno), 28p.
- MATO, L.F.; CAIXETA, J.M. & MAGALHÃES, M.R.C.; 1992. **Padrões de sedimentação na passagem da Formação Marfim para a Formação Pojuca (Andar Rio da Serra / Andar Aratu) e significado estratigráfico do marco 15, Cretáceo Inferior, Bacia do Recôncavo, Bahia**. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 6(1/2), jan/jun, p.59-72.

- MEDEIROS, R.A. & PONTE, F.C., 1981. **Roteiro geológico da Bacia do Recôncavo (Bahia):** Petrobrás, Salvador, Publicação especial, 63p.
- MILANI, E.J., 1984. **Modelo evolutivo do rift Recôncavo / Tucano / Jatobá, in** Ciência - Técnica - Petróleo, CENPES, PETROBRÁS, Nº 18, 32p.
- MILANI, E.J. & DAVISON, I., 1988. **Basement control and transfer tectonics in Recôncavo / Tucano / Jatobá rift, northeast Brazil, in**, Tectonophysics, v.154, p.40-70.
- NETTO, A.S.T.; BRAGA, J.A.E. & BRUHN, C.H.L., 1984. **Prospectos estratigráficos do Recôncavo; arcabouço estrutural, análise estratigráfica e potencialidade exploratória dos andares Rio da Serra e Aratu..** Salvador, PETROBRÁS, (Relatório interno), 83p.
- PAZ, M.A.M. & SOUZA, M.J.; 1984. **Campo de Miranga, um exemplo de reexploração.** Ciências da Terra 9, p.19-22.
- PICARELLI, A.T. & CAIXETA, J.M., 1991. **Análise bioestratigráfica e paleogeográfica do Andar Aratu - Bacia do Recôncavo.** CENPES, PETROBRÁS, (Relatório interno), 24p.
- PICARELLI, A.T. & MILHOMEN, P., 1992. **Reconcavona mirangaensis - Subzona NRT 005.3A - Um novo fóssil-guia para o Andar Aratu da Bacia do Recôncavo, NE Brasil.** CENPES, PETROBRÁS, (Relatório interno), 21p.
- POSTMA, G., 1984. **Slumps and their deposits in fan delta front and slope.** Bergen, Norway, Geology (jan) 12, p.27-30.
- PULHAM, A.J., 1989. **Controls on internal structure and architecture of sandstone bodies within Upper Carboniferous fluvial-dominated deltas, County Clare, western Ireland, in** WHATELEY, M.K.G. & PICKERING, K.T., (eds.), *Deltas: Sites and Traps for Fossil Fuels*, Geological Society Special Publication 41, p.179-203.
- REMACRE, A.Z., 1995. **Geoestatística I.** Disciplina curricular do curso de

mestrado em Geoengenharia de Reservatórios da UNICAMP (Notas de aula).

RODRIGUES, E.B., 1985. **Ambiente deposicional e evolução diagenética do arenito Araçás no campo de Araçás, Formação Pojuca, Cretáceo Inferior da Bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil.** Dissertação de mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 119p.

SANTOS, C.F., CUPERTINO, J.A. & BRAGA, J.A.E.; 1990. **Síntese sobre a Geologia das Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, in RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J.; (eds.), *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*.** Rio de Janeiro, PETROBRÁS, (Relatório Interno), p.235-266.

SCRUTON, P.C., 1960. **Delta building and the deltaic sequence, in SHEPARD, F.P.; PHLEGER, F.B. & van ANDEL, T.H.; (eds.), *Recent sediments northwest Gulf of Mexico*,** Tulsa, OK, AAPG, p.82-102.

SOARES, A., 1990. **Geostatistical estimation of orebody geometry: Morphological kriging.** Portugal, Mathematical Geology, v.22, N° 7, p.787-802.

SOARES, P.C., 1988. **Aplicação da geoestatística na avaliação de controle de paleo-lineamentos na sedimentação.** São Paulo, SP, Geociências 7, p.328-329.

SOARES, P.C. & BAGGIO, S.B., 1994. **Formação Botucatu: Geometria, fácies elétricas e indicadores paleotectônicos, in 38º Congresso Brasileiro de Geologia,** Camboriú, SC, p.96-97.

SRIVASTAVA, R.M. & ISAACS, E.H.; 1989. **An introduction to APPLIED GEOSTATISTICS.** Oxford University Press, 552p.

VAN WAGONER, J.C.; POSAMENTIER, H.W.; MITCHUM, R.M.; VAIL, P.R.; SARG, J.F.; LOUTIT, T.S. & HARDENBOL, R.M.; 1988. **An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions, in WILGUS, C.K. et al (eds.), *Sea-level changes: an integrated***

approach, SEPM, Special Publication 42, p.39-46.

VIANA, C.F.; GAMA JÚNIOR, E.; SIMÕES, I.A.; MOURA, J.A.; FONSECA, J.R. & ALVES, R.J.; 1971. **Revisão estratigráfica da Bacia do Recôncavo / Tucano**. Boletim técnico da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v.14, Nº 3/4, p.157-192.

WEBER, K.J., 1986. **How heterogeneity affects oil recovery**. Shell International Petroleum, Maatschappij B.V., The Hague, The Netherlands, p.487-544.

ZABALAGA, H.M.C. & DE MAMAN, E.J., 1990. **Campo de Miranga - Evidências de movimentação oblíqua na Bacia do Recôncavo**. PETROBRÁS, 4º Seminário de Geologia de desenvolvimento e reservatórios, Natal, RN, p.357-367.