



UFRJ

Priscilla Reuters Bitencourt

CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DE FÁCIES DE UMA SUCESSÃO
ESTRATIGRÁFICA NO DELTA DO RIO PARAÍBA DO SUL (RJ)

Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia)

Rio de Janeiro
2006

Priscilla Reuters Bitencourt

CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DE FÁCIES DE UMA SUCESSÃO
ESTRATIGRÁFICA NO DELTA DO RIO PARAÍBA DO SUL (RJ)

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia, Instituto de
Geociências, da Universidade Federal
do Rio de Janeiro – UFRJ, como
requisito necessário para obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Leonardo Borghi
Carlos Jorge de Abreu

UFRJ
Rio de Janeiro
2006

Bitencourt, Priscilla Reuters
Contribuição à análise de fácies de uma sucessão estratigráfica no
delta do rio Paraíba do Sul no estado do Rio de Janeiro (RJ).
Priscilla Reuters Bitencourt - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.
xxii, 30 p. ; 30cm (Instituto de Geociências – UFRJ, B.Sc., Curso
de Graduação em geologia, 2006)

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)- Universidade federal do
rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Responsável: Leonardo Borghi
1.Petrofácies. 2. Delta do rio Paraíba do Sul. 3. Areias.
Borghi, Leonardo. II IGEO/UFRJ

Priscilla Reuters Bitencourt

CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DE FÁCIES DE UMA SUCESSÃO
ESTRATIGRÁFICA NO DELTA DO RIO PARAÍBA DO SUL (RJ)

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia, Instituto de
Geociências, da Universidade Federal
do Rio de Janeiro – UFRJ, como
requisito necessário para obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Leonardo Borghi
Carlos Jorge de Abreu

Aprovada em: 19 dez. 2006

Por:

Prof. Leonardo Borghi (UFRJ)

Prof. Carlos Jorge de Abreu (UFRJ)

Prof. José Agnelo Soares (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2006

“Meta a gente busca
Caminho a gente acha
Desafio a gente enfrenta
Vida a gente inventa
Saúde a gente mata
Sonho a gente realiza ”

Agradecimentos

A minha família: meu pai, por me dar todo o suporte que sempre precisei; minha mãe por ter me ajudado a tomar as decisões mais importantes da minha vida e ao meu irmão, por ter me incentivado em todas os momentos da minha vida.

Ao meu orientador Leonardo Borghi, pela sua amizade, dedicação e orientação ao longo dos últimos anos de faculdade.

Ao Fred, pela paciência e incentivo nestes momentos finais.

Aos amigos da turma 2002, pelos momentos de aprendizagem, alegria e dificuldades que compartilhamos nas viagens de campo e nas matérias durante os últimos 5 anos.

As amigas, mais conhecidas como Smurffets, Alessandra, Alice, Ana Carolina, Ana Paula (companheira de todas as aventuras e momentos importantes), Giselle, Gislaine, Kátia, Luana, Samille e Thayana. Simplesmente foi inesquecível todos os momentos que vivemos juntas!

Aos amigos do Lagesed, Carlos, Gustavo, Juliana, Leonardo, Marina, Sabrina e Vivian pelo companheirismo e pelos momentos que passamos juntos. Além dos amigos e geólogos Marcelo e Max que auxiliaram na coleta de amostras no delta do rio Paraíba do Sul.

Ao professor Carlos Jorge de Abreu, por ter fornecido o material de estudo através do projeto FINEP / CPETRO/UFRJ nº 65.2000.0038.00, intitulado “ Análise integrada do sistema área fonte, *by-pass*, zona de acumulação do sistema turbidítico Almirante Câmara, Recente, bacia de Campos.

Ao professor José Agnelo Soares, pelo apoio durante a realização da modelagem de eletrofácies.

Aos técnicos: Luiz Ferro (*in memorian*) e Roberto Gomes de Lima, por terem ajudado a realizar as análises sedimentológicas.

Ao técnico, Tarcísio Raymundo de Abreu, pela confecção das lâminas petrográficas.

As geólogas Vivian Cristina Pessoa e Margareth Brasil, pela descrição do testemunho analisado no presente trabalho.

Ao Departamento de Geologia, e ao secretário de graduação, Wal, pela ajuda e orientação na vida acadêmica.

À Agência Nacional de Petróleo pela bolsa concedida durante o início do projeto, através do Programa de Capacitação de Recursos Humanos e Geologia do Petróleo. (FRT/ PRH-ANP/ MCT n° 18)

Ao coordenador do PRH-18, Leonardo Borghi, pelo apoio cedido durante o projeto.

À todos mais que estiveram do meu lado e participaram da minha vida, apoiando e incentivando-me em todos os momentos e decisões importantes, fica aqui o meu grande e sincero OBRIGADO.

Resumo

BITENCOURT, Priscilla. **Contribuição à análise de fácies de uma sucessão estratigráfica no delta do rio Paraíba do Sul no Estado do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2006. xiv, 30p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O presente estudo objetivou a caracterização textural (sedimentológica) e composicional (petrográfica) de amostras de areias coletadas na planície costeira e em um testemunho (200 m) no delta do rio Paraíba do Sul, além da modelagem de eletrofácies no poço testemunhado, através da análise das curvas geofísicas de GR, ILD e condutividade. A integração da análise sedimentológica, petrográfica e geofísica visa contribuir para futuros estudos estratigráficos no delta, além da compreensão de uma importante área-fonte para a sedimentação de águas profundas na bacia de Campos. Foram analisadas 17 amostras nos cordões arenosos aflorantes na parte sul do delta, 3 amostras fluviais (Paraíba do Sul, Muriaé e Dois Rios) e 16 amostras no testemunho. Em geral, as análises texturais resultaram em areias médias, subangulosas a subarredondadas e moderadamente a mal selecionadas; particularmente no testemunho as areias são argilosas. Composicionalmente, as amostras dos cordões arenosos e do testemunho compõem-se por quartzo (Qm=85%), feldspato (F= 12%), líticos (L= 1,2%) e minerais pesados (0,5%); no testemunho são observados bioclastos, oólitos de hematita e glauconita. Foram definidas 3 eletrofácies com base nos valores de média normalizada e desvio-padrão fornecidos pelos perfis de GR, ILD e condutividade, com as quais foram reconhecidas 3 eletrosseqüências, através da identificação de sucessões de eletrofácies, que representam, em amplos traços, os ambientes deposicionais desenvolvidos durante a evolução do delta do rio Paraíba do Sul.

Palavras-chave: petrofácies, delta do rio Paraíba do Sul, areias, eletrofácies

Abstract

BITENCOURT, Priscilla. **Analisis facies contribution of stratigrafic sucession delta do rio Paraíba do Sul in the estate of Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2006. xiv, 30p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The study aimed a textural (sedimentologic) and compositional (mineralogic) characterization of sands collected through the coastal plain and in a core (200 m) from the Paraíba do Sul river delta, and also an eletrofacies modeling of the coring well, by use of GR, ILD and conductivity geophysical curves. The integrated analysis of the sedimentologic, petrographic, and geophysic data is intended as a contribution for future stratigraphic studies of the delta, as the understanding of an important source-area for deep water sedimentation in the Campos Basin. Seventeen sand samples from the deltaic strand plain were analysed, and 16 from the core. In general, textural analyses points to medium sands, subangular to sub-rounded, moderately to poorly sorted; in the core, sands are clayey. Compositionally, the sands of the coastal plain and the core are composed by quartz (Qm=85%), feldspar (F= 12%), lithics (L=1,2%) and heavy minerals (0,5%); particularly in the core bioclastic, hematite oolites and glauconite are observed. Three electrofacies were defined based on the values of a normalized average and the standard-deviation supplied by a special geophysical cluster analysis of the GR, ILD and conductivity curves; this procedure allowed the recognition of 3 eletrosequences, beyond the identification of successions of electrofacies, which broadly represent depositional environments developed during the evolution of Paraíba do Sul river delta.

Key-words: petrofacies / Paraíba do Sul river delta / sands/ eletrofacies

Lista de figuras

Figura 1-Mapa de localização da área de estudo e vias de acesso [p.2]

Figura 2-Domínio tectonos-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro, potenciais áreas-fonte para os sedimentos do delta do rio Paraíba do Sul. (Fonte: CPRM, 2001) [p.3]

Figura 3-Domínio tectonos-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro, potenciais áreas-fonte para os sedimentos do delta do rio Paraíba do Sul. (CPRM, 2001) [p. 6]

Figura 4- Figura 4-Análise granulométrica. Nos cordões arenosos (a) observam-se a predominância de granulometria média. No testemunho (b) observa-se a predominância de granulometria fina nas profundidades acima da amostra 9 (105 metros) e granulometria média nas amostras 10 (107,3 m), 11 (114,3 m), 12 (130,5 m) e 13 (142,5 m). [p.10]

Figura 5 – Parâmetros texturais das areias nos cordões arenosos (a) observam-se 3 intervalos de variação dos parâmetros texturais localizados nas fotosequências F, J e N. No testemunho (b) foram identificados 4 intervalos nas amostras 4,8 11 e 14 observando uma importante variação da média textural. [p.12]

Figura 6-Na assembléia mineralógica das areias dos cordões arenosos (a) observa-se a predominância de quartzo com pequenas variações. No testemunho (b) observa-se a variação do teor (%) de quartzo em função da presença de bioclastos, argila e quantidade de feldspato maior do que nos cordões arenosos. [p.16]

Figura 7 – Distribuição composicional dos cordões arenosos (a) plotados no diagrama de Folk (1974) e no diagrama de Dickinson (1985) (b). Observa-se uma população predominante em termos de proveniência, assinalada no interior cratônico (b). [p.18]

Figura 8 – Distribuição composicional do testemunho plotados no diagrama de Folk (1974) (a) e no diagrama de Dickinson (1985) (b). Observam-se duas populações distintas em termos de proveniência das amostras do testemunho (b), assinaladas no interior cratônico (azul) e continental transicional (vermelho). [p. 18]

Lista de Tabelas

Tabela 1-Descrição, diagnose e interpretação das eletrofácies [p.21]

Lista de Quadros

Quadro 1– Associação das eletrosequências e interpretação [p.22]

Quadro 2 – Correlação entre litofácies e eletrofácies do testemunho [p.2 e 25]

Sumário

Resumo.....	viii
Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xi
Lista de quadros.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 MATERIAL E MÉTODO.....	2
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
4 RESULTADOS.....	8
4.1 Caracterização dos parâmetros sedimentológicos.....	9
4.1.1 Granulometria.....	9
4.1.2 Seleção	10
4.1.3 Assimetria	11
4.1.4 Curtose.....	11
4.1.5 Aspectos gerais dos parâmetros texturais.....	12
4.2 Caracterização petrográfica.....	13
4.2.1 Aspectos gerais.....	13
4.2.2 Caracterização dos cordões arenosos e do testemunho.....	16
4.3 Caracterização das eletrofácies.....	19
4.2 Eletrossequências.....	21
5 CORRELAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA, PETROGRÁFICA E DE ELETROFÁCIES.....	25
6 CONCLUSÕES.....	26
Referências Bibliográficas.....	27
Apêndice A – Análise Textural	
Apêndice B – Resultado dos métodos analíticos	
Apêndice C – Modelos de evolução da planície costeira do delta do rio Paraíba do Sul.	
Apêndice D – Estampas de ilustração do testemunho.	

Apêndice E – Estampas de fotomicrografia de lâminas dos cordões arenosos e do testemunho.

Anexo – Artigo de SOARES (2005)

1 INTRODUÇÃO

O estudo da composição e da mineralogia de areias em amostras coletadas desde a fonte sedimentar até o sítio deposicional pode contribuir para a caracterização da qualidade das rochas reservatórios e para a compreensão dos efeitos da evolução diagenética (i.e., porosidade secundária por dissolução, matriz secundária, compactação e cimentação).

Os ambientes flúvio-deltaicos são uma importante fonte de sedimentos para a plataforma e, subsequentemente, para regiões de águas profundas, onde se acumulam por processos gravitacionais, como os turbiditos. Tais depósitos são extremamente importantes no cenário exploratório nacional de óleo e gás, no qual participam com quase 80% das reservas, particularmente na bacia de Campos.

O complexo deltaico do rio Paraíba do Sul, que se situa estratigraficamente no topo da bacia de Campos tem sido alvo de estudos desde a década de 1970 para a compreensão da evolução da sedimentação da sua planície costeira. Pesquisas realizadas por Bacocoli (1971), Bastos & Silva (1996), Martin & Suguio (1984a,b) Martin & Dominguez (1987), Martin & Flexor (1986), Dominguez (1990), Dias & Silva (1984a,b), Silva (1987), Gonçalves (2005), Gonçalves & Silva (2005) e Silva *et al.* (2005) fornecem a base de conhecimentos sobre os fatores que influenciaram a evolução dessa planície, tais como as flutuações do nível do mar durante o Quaternário, atividade tectônica, e a dinâmica fluvial da desembocadura do rio, através de estudos sobre o arredondamento das areias, discordâncias nos cordões arenosos holocênicos e análise de proveniência e distribuição de minerais pesados. Em termos estratigráficos, Della Piazza (1983) analisou a superfície discordante de separação entre o Pleistoceno e Holoceno.

Neste contexto, um dos objetivos deste estudo é a caracterização sedimentológica e petrográfica de amostras de areias coletadas na faixa dos cordões arenosos holocênicos

aflorantes na parte sul do delta rio Paraíba do Sul, e de um testemunho sacado de poço perfurado e perfilado no delta do rio Paraíba do Sul, próximo à Lagoa Feia (RJ). O outro objetivo foi a modelagem de eletrofácies integrada à análise dos dados sedimentológicos e petrográficos. A finalidade é permitir futuras discussões sobre a caracterização faciológica dessa sucessão estratigráfica no delta do rio Paraíba do Sul, como forma de contribuição à compreensão da acumulação das areias turbidíticas da bacia de Campos e permitir a avaliação de sua qualidade como reservatório.

2 MATERIAL E MÉTODO

A planície costeira ao sul do rio Paraíba do Sul localiza-se na região nordeste do Estado do Rio de Janeiro, próximo à Cidade de Campos do Goitacazes (Figura 1). Apresenta uma superfície com 120 km de comprimento e 60 km de largura.

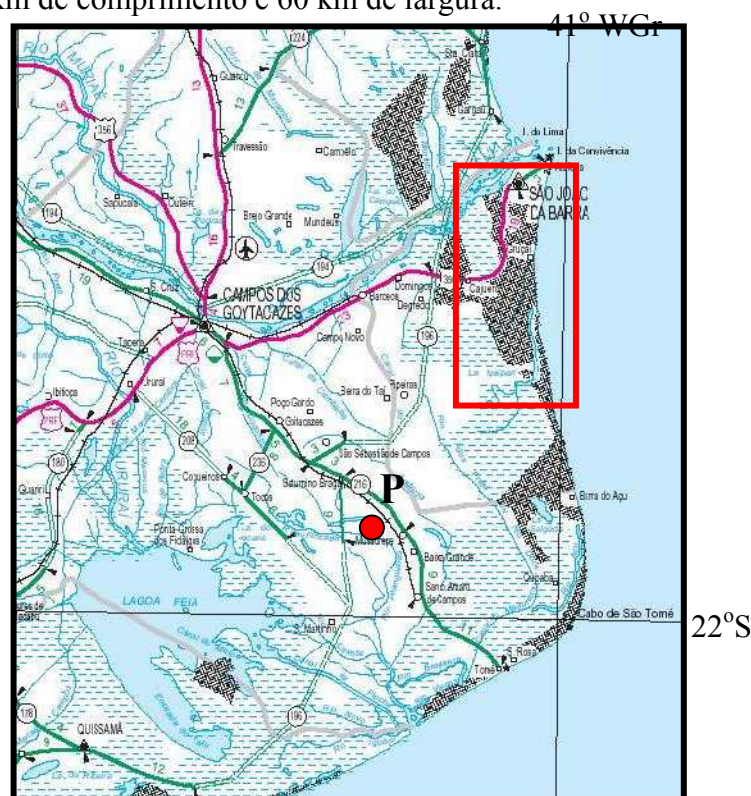


Figura 1 – Mapa de localização da área do poço (P) e de coleta de amostras de areia em superfície (área assinalada com quadrado); e vias de acesso. (Fonte: DNIT/2002, escala original: 1:500.000).

A coleta de amostras em superfície obedecem à ocorrência de domínios geológico-geomorfológicos no delta, delineados por fotointerpretação geológica realizada por Raposo & Bitencourt (2005) na faixa de cordões arenosos holocênicos aflorantes na parte sul do delta (Figura 2).

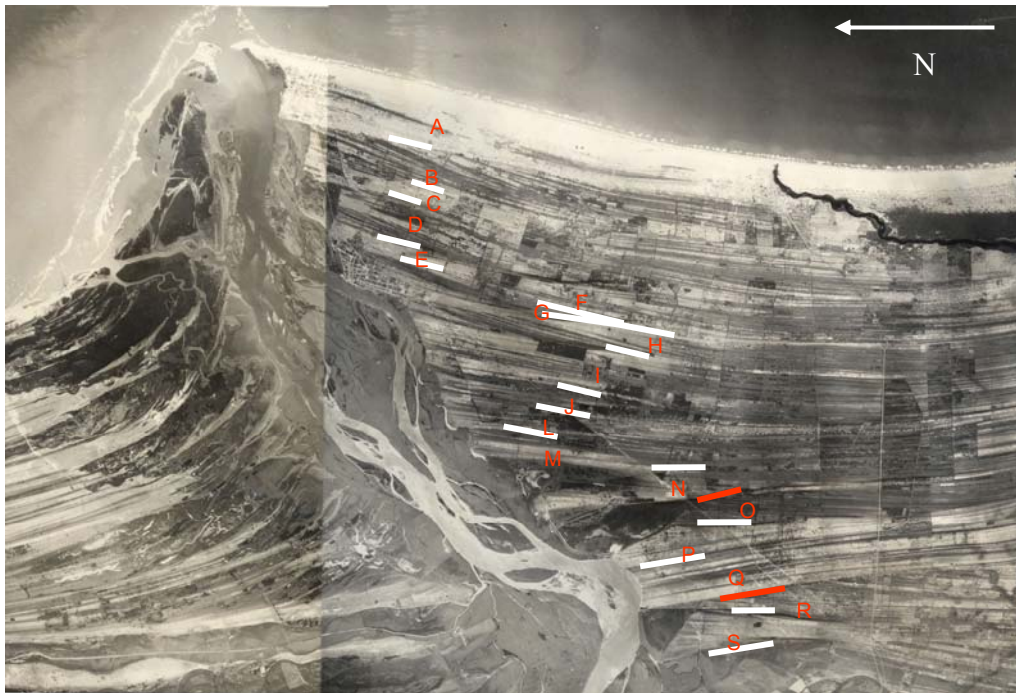


Figura 2 – Mapeamento fotogeológico¹ realizado por Raposo & Bitencourt (2005). As letras representam os fotofácies, foto-horizontes discordantes (—), horizontes concordantes (traço branco).

Foram coletadas 17 amostras nos cordões arenosos holocênicos e 3 amostras fluviais (Tabela 1, Apêndice B), incluindo os rios Paraíba do Sul, Dois Rios e Muriaé, que são os afluentes mais próximos da desembocadura do rio Paraíba do Sul. As coletas realizadas nos cordões arenosos utilizaram apenas um trado mecânico simples e uma pá para a perfuração, atingindo aproximadamente 1 metro de profundidade. As amostras possuem massa de

¹ Fotografias aéreas 12842-12844; USAF, VM-AST-10 1370 PM R-92, esc. 1:60.000, 17 set. 1964.

aproximadamente 1 kg, e tiveram seus posicionamentos registrados com pontos de coordenadas geográficas UTM (WGS 1984) com uso do aparelho de GPS.

A coleta de amostras em subsuperfície foi realizada em testemunho de um furo de sondagem (Poço Canyon-1-RJ) próximo à região de Lagoa Feia (coordenadas: 7573378,88/278961,84 UTM, WGS, 1984) (Tabela 2, Apêndice B), o qual alcançou a profundidade de 200 metros, atravessando toda a sucessão estratigráfica holocênica do delta e registrando, na sua maior parte, depósitos arenosos do Pleistoceno. O testemunho foi descrito através de perfil estratigráfico na escala de 1:40, o qual serviu de base para a amostragem. O testemunho apresenta baixa recuperação (~75%) em função do material ser inconsolidado.

Foram coletadas 15 amostras de areias com 50 g distribuídas ao longo do testemunho para análise granulométrica, escolhidas de acordo com a sua representatividade em todo o pacote sedimentar e considerando a variação granulométrica, presença de bioclastos, presença de argila e grânulos de quartzo e feldspato. As amostras foram quarteadas para gerar subamostras para análise petrográfica, além da granulometria.

Os ensaios granulométricos por tamização (fração areia) e pipetagem (fração argila) visaram caracterizar parâmetros texturais tais como moda, média, curtose, seleção e assimetria, segundo o método gráfico (*cf.* Folk, 1974) (Apêndice A).

A análise petrográfica realizada com microscópio Carl Zeiss AXIOPLAN 40, visou a caracterização composicional (mineralógica) e das areias, no intuito de discriminar distintas proveniências dos sedimentos, além de sua classificação Folk (1974). A confecção da lâminas foi realizada com volume de aproximadamente 10 gramas utilizando-se somente a fração areia fina e média presente nas amostras, pois isso permite a comparação dos resultados entre as diversas amostras, eliminando-se o problema do controle textural sobre a composição (q.v. Basu, 1985), o que ainda permite classificar petrofácies em diagramas QmFL de Dickinson (1985). Como estudos análogos ao presente pode-se citar o de Svage *et al.* (1988) para a

Baixada de Jacarepaguá em escala local, e o de Potter (1986, 1994) em escala regional, para a região costeira da América do Sul.

Em paralelo, realizou-se a modelagem de eletrofácies segundo o método proposto por Soares (2005) (Anexo A), a fim de fornecer subsídios estratigráficos para futuras descrições e correlações no delta com uso de perfis geofísicos. A modelagem de eletrofácies foi realizada com perfis de raios-gama (GR), resistividade (ILD), e condutividade do entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada.

Inicialmente, realizou-se a filtragem dos dados, principalmente no perfil de GR e, secundariamente no perfil de ILD, pois apresentavam valores anômalos, descartados. Em seguida, os dados das curvas de cada perfil foram normalizados, para que todas as variáveis estivessem numa mesma escala de valores. A aplicação da regra discriminante linear passo-a-passo determinou, em ordem decrescente, a prioridade da utilização do perfil de raios-gama (GR), seguido pelo perfil de resistividade (ILD), e finalmente pelo perfil de condutividade, que apresentou pouca contribuição aos resultados, pois os valores correspondentes à curva eram muito semelhantes em diferentes litologias.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

Em termos de área-fonte para os sedimentos do rio Paraíba do sul, o Estado do Rio de Janeiro oferece três domínios tectono-magmáticos: Juiz de Fora/ Paraíba do Sul; Serra do Mar, e Região dos lagos, além de coberturas cenozóicas (Figura 3). Estes domínios constituem-se de ortognaisses, paragnaisses e metassedimentos variados (xistos, quartzitos, mármore etc) (CPRM, 2001), que caracterizam uma província típica de interior cratônico (*sensu* Dickinson, 1985).

Outra importante fonte para os sedimentos do delta do rio Paraíba do Sul é a Formação Barreiras, localizada no litoral brasileiro desde a região Norte até o Estado do Rio de Janeiro, incluindo vizinhanças do delta do rio Paraíba do Sul. É constituída por sedimentos argilosos, arenosos e argilo-arenosos, inconsolidados e horizontalizados, formados por processos de transporte fluvial durante os períodos de variações climáticas do Terciário e Quaternário inferior, que preencheram uma larga e estreita bacia ao longo da costa, (q.v. Bigarella , 1975, *apud* Silva, 1987).

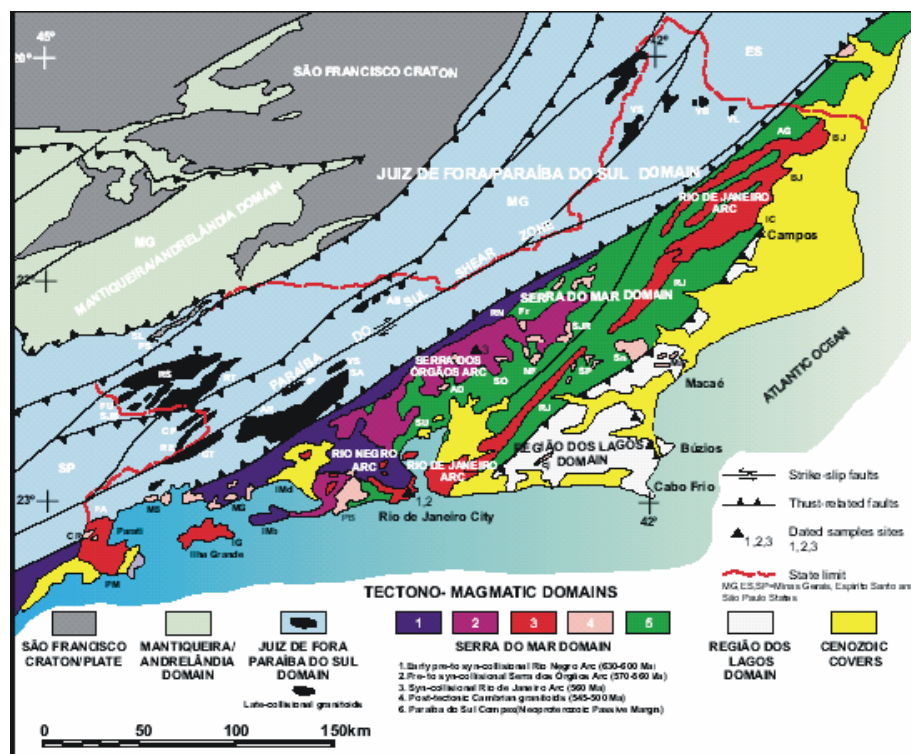


Figura 3 – Domínio tectonos-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro, potenciais áreas-fonte para os sedimentos do delta do rio Paraíba do Sul. (Fonte: CPRM, 2001)

A planície costeira do rio Paraíba do Sul é constituída por depósitos quaternários e formados por sedimentos fluviais, lagunares, coluvionares em áreas pantanosas, marinhos e transicionais (terraços marinhos pleistocênicos e holocênicos). Os terraços marinhos pleistocênicos apresentam maior expressão na parte sul da desembocadura do rio, e pouca na parte norte; os terraços marinhos holocênicos são caracterizados por sedimentos arenosos,

contêm uma grande quantidade de conchas, são mais expressivos na adjacência da desembocadura do rio Paraíba do Sul e apresentam um alinhamento das cristas de praia contínuo e pouco espaçado (q.v. Martin *et al.*, 1984).

As hipóteses sobre a evolução da planície costeira do rio Paraíba do Sul iniciaram-se com o estudo de Lamego (1955, *apud* Tomaz, 2005) que reconheceu 4 fases de progradação deltaica (Figura 1, Apêndice C), sendo que cada estágio refere-se a um tipo de delta instalado durante um período de flutuação do nível do mar (transgressão e regressão). Este modelo não foi bem aceito por diversos autores que seguiram nos estudos do delta (Martin *et al.*, 1984a; Silva, 1997), que refutam a analogia ao delta do tipo Mississipi.

Martin *et al.* (1984b) propõem um modelo de evolução da planície costeira do rio Paraíba do Sul baseado no mapeamento geológico, datações de radiocarbono e experiências prévias com outras partes do litoral brasileiro. Posteriormente, Martin *et al.* (1993) propuseram um novo modelo de evolução paleogeográfico para as planícies costeiras situadas entre Macaé (RJ) e Maceió (AL) (Quadro 1, Apêndice C), baseado em estudos sedimentológicos, biológicos e datações de radiocarbono, caracterizando uma alternância de fases construtivas e destrutivas na planície costeira do rio Paraíba do Sul, resultantes das modificações no sentido da corrente de deriva litorânea.

Silva (1987) sugere um modelo de evolução para a região de Lagoa Feia e planície costeira do rio Paraíba do Sul (Quadro 2, Apêndice C), caracterizado por uma complexa superposição de eventos transgressivos e regressivos do nível relativo do mar, onde observou o desenvolvimento de seqüências arenosas progradantes (“cristas de praia”) e retrogradantes (“ilhas-barreira e cordões litorâneos”), superpostas e sobrepostas a sedimentos lacustres e sedimentos fluviais. Esses eventos são resultados de oscilações eustáticas, atividade tectônica, direção da corrente de deriva litorânea e variações climáticas.

Dominguez (1990) afirma que o modelo de sedimentação deltaica em ambientes dominados por ondas proposto por Coleman & Wright (1967, *apud* Dominguez, 1990) não explica de forma apropriada à evolução quaternária de planícies de cordões litorâneos associados às maiores desembocaduras fluviais da costa leste do Brasil. O autor propõe um modelo que considera as variações do nível do mar, direção da corrente de deriva litorânea, regime de ondas atuantes (NE e S-SE), desempenhando um importante papel no transporte litorâneo de sedimentos para as planícies consideradas (Figura 2, Apêndice C).

Tomaz (2005) realizou o mapeamento de paleocanais ao longo da planície costeira do rio Paraíba do Sul através de fotografias aéreas e da plataforma continental utilizando o modelo batimétrico da bacia de Campos, discutindo a possível relação com *canyon* Almirante Câmara. O mesmo autor identificou uma feição de lobo turbidítico recente que constitui o principal receptor de sedimentos desta porção da bacia de Campos.

4 RESULTADOS

Texturalmente, as amostras são em geral areias médias superiores ($\phi = 1,36$), moderadamente bem selecionados ($\sigma = 0,67$), mesocúrtica ($K_G = 1,0$), com assimetria positiva ($S_{ki} = 0,21$) e grãos angulosos a subangulosos e subarredondada (nas frações maiores) (Tabelas 1 e 2, Apêndice B). À exceção das amostras coletadas no testemunho que são em sua maioria compostas por areias argilosas até 110 metros de profundidade, abaixo desta as amostras de areias são texturalmente semelhantes as dos cordões arenosos.

Composicionalmente, as amostras dos cordões arenosos são constituídas predominantemente por grãos de quartzo monocristalino ($Q_m = 85\%$) com inclusões de rutilo e zircão; feldspato (microclina e plagioclásio) ($F = 12\%$); e subordinadamente quartzo policristalino ($Q_p = 0,9\%$); além de fragmentos líticos ($L = 1,2$), bioclastos (incluindo

microfósseis carbonático e silicosos, e fragmentos de conchas; Bio= 20%), glauconita e minerais pesados (0,5%) (Tabelas 1 e 2, Apêndice B). No testemunho, foi identificada uma assembléia mineralógica similar àquela identificada nos cordões arenosos, com presença predominante de quartzo monocristalino, além de identificadas evidências de bioturbação (Figuras 1 e 2, Estampa I, Apêndice E) e argila (matriz) em pouca quantidade. Em termos de petrofácies (*sensu* Dickinson, 1985), a maior parte das amostras enquadram-se como de “interior cratônico”, corroborando o contexto geológico.

4.1 Caracterização dos parâmetros sedimentológicos

4.1.1 Granulometria

Nos cordões arenosos observam-se areia média ($\phi = 1,35$) e nos rios Muriaé, Dois rios e Paraíba do Sul areia média ($\phi = 1,10$) (Figura 4a). No testemunho observam-se areias muito finas lamosas ($\phi = 4,0$) e areias fina superior lamosas ($\phi = 2,0$) (Figura 4b) (figuras 1, 2 e 3, Estampa I, Apêndice D) e acima da profundidade de 44 metros; enquanto que, abaixo desta profundidade, predominam areia média, grossa além de grânulos (figuras 4 e 5, Estampa I; Figura 6, Estampa II, Apêndice D); não obstante siltes e argilas, intercalam-se até a profundidade de 110 metros (Figura 7, Estampa II, Apêndice D) e, em torno de 142 metros ocorre areia fina (figuras 8, 9, 10, Estampa II, Apêndice D).

As amostras 10 (107,3 m), 11 (114,3 m), 12 (130,5 m) e 13 (142,5 m) apresentam granulometria média podendo ser correlacionadas com as amostras dos cordões arenosos.

4.1.2 Seleção

O desvio-padrão calculado nos cordões arenosos aponta seleção média ($\sigma= 0,65$), nos rios ($\sigma= 0,56$), e nas areias do testemunho ($\sigma= 1,45$). No testemunho observa-se o predomínio de areias lamosas pobremente selecionadas acima da profundidade de 80 metros, devido à evidência de bioturbação resultando na mistura de areias finas com argilas e siltes. Abaixo desta profundidade predominam areias moderadamente selecionadas, tal como nos cordões arenosos e nos rios.

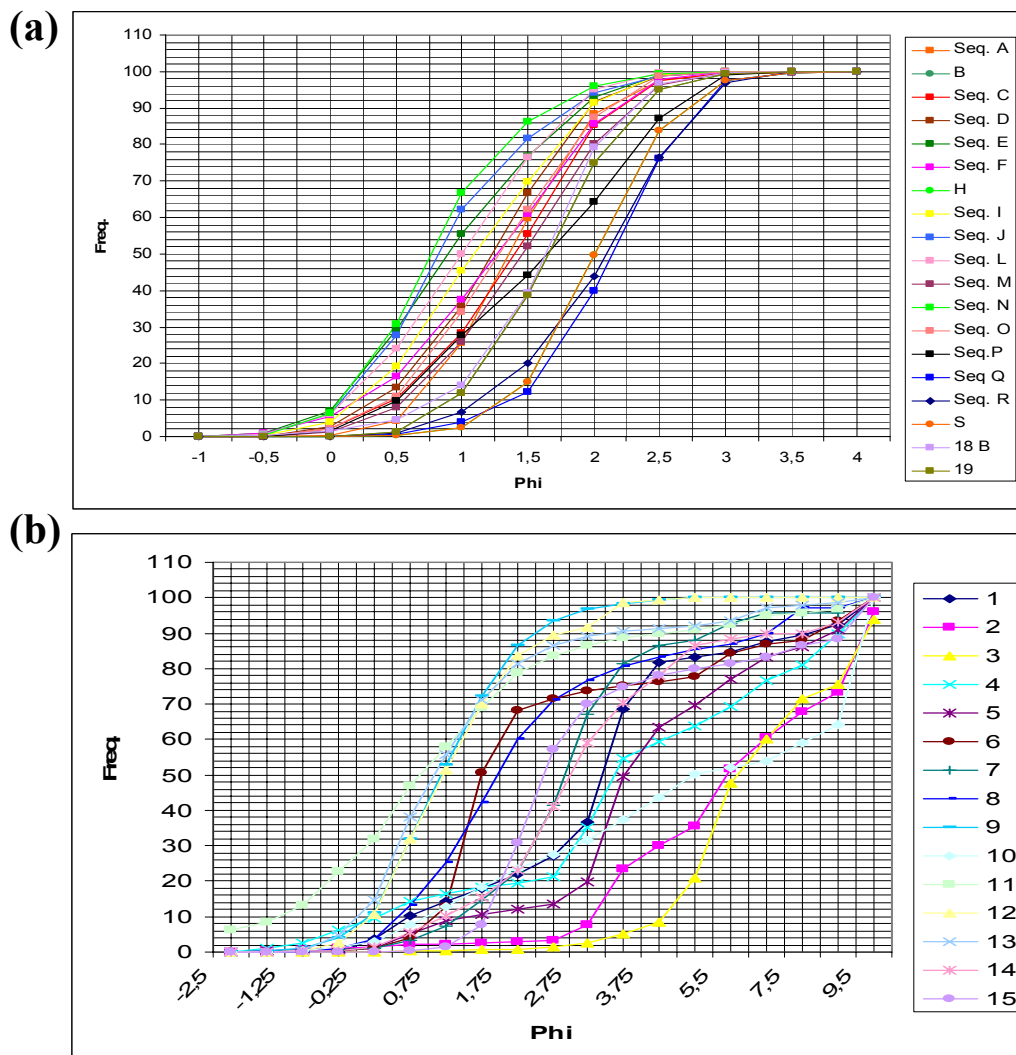


Figura 4 – Análise granulométrica. Nos cordões arenosos (a) observam-se a predominância de granulometria média. No testemunho (b) observa-se a predominância de granulometria fina nas profundidades acima da amostra 9 (105 metros) e granulometria média nas amostras 10 (107,3 m), 11 (114,3 m), 12 (130,5 m) e 13 (142,5 m).

4.1.3 Assimetria

As amostras dos cordões arenosos apresentam assimetria positiva com o valor médio de 0,21; os rios apresentam distribuição simétrica com valor médio de 0,03; e no testemunho, as areias lamosas possuem assimetria positiva mais acentuada com valor médio de 0,42.

As amostras dos cordões arenosos (Figura 4a) do testemunho (Figura 4b) apresentam assimetria positiva, mas o testemunho apresenta excesso de material fino (cauda de finos) (Figura 4b). As amostras dos rios apresentam simetria, possuem frações de areia mais grossa (cauda pouco inclinada para a esquerda).

4.1.4 Curtose

A curtose apresenta valores desde 0,9 até 1,0 em todas as amostras analisadas, incluindo os cordões arenosos, os rios e o testemunho. A população presente é predominantemente mesocúrtica.

Na curva de distribuição granulométrica dos cordões arenosos (Figura 4a), as seqüências J e N localizam-se na extremidade da direita, indicando a predominância de grãos com granulometria mais grossa; e as seqüências localizadas mais próximas da extremidade esquerda do gráfico apresentam como granulometria predominante os grãos mais finos.

A curva de distribuição granulométrica do testemunho (Figura 4b) apresenta a predominância de granulometria fina, pois a maioria das curvas localiza-se na extremidade esquerda do gráfico. Há exceções, como as amostras 9 (105 metros de profundidade) e 12 (130,5-133,5 metros de profundidade) que são compostas somente por areia, predominando a classe granulométrica de areia média.

4.1.5 Aspectos gerais dos parâmetros texturais

Nos cordões arenosos (Figura 5a) observam-se variações nos parâmetros texturais localizadas na fotossequências F, J e N. As variações nos parâmetros texturais podem ser correlacionadas com as discordâncias identificadas no mapeamento fotogeológico realizado por Raposo e Bitencourt (2005). Na fotossequência F observa-se uma queda no valor da moda e mediana, enquanto os valores de desvio-padrão e a curtose tendem a aumentar.

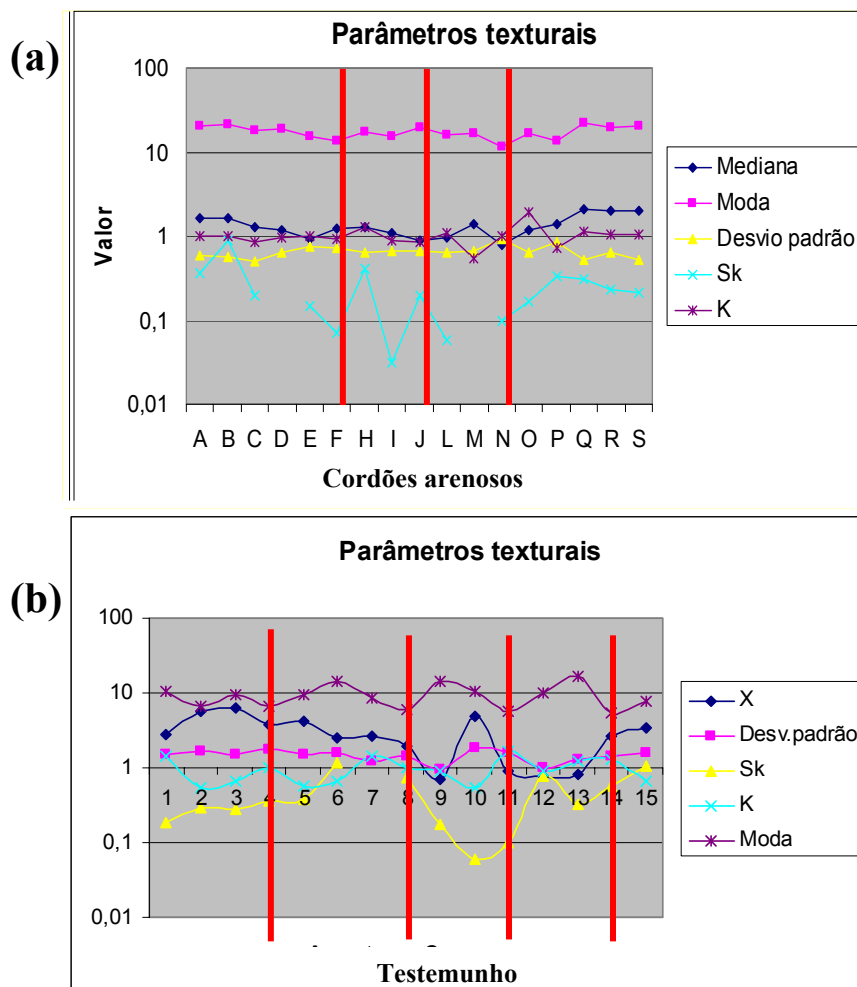


Figura 5 – Parâmetros texturais das areias nos cordões arenosos (a) observam-se 3 intervalos de variação dos parâmetros texturais localizados nas fotossequências F, J e N. No testemunho (b) foram identificados 4 intervalos nas amostras 4, 8, 11 e 14 observando uma importante variação da média textural.

A fotosequência J é caracterizada pelo aumento do valor da moda, enquanto que nos outros parâmetros texturais (mediana, desvio-padrão, curtose e assimetria) não se verificam nenhuma variação significativa. Na fotosequência N o valor da moda e o desvio-padrão diminuem, seguido de um aumento, juntamente com o valor da mediana. Os valores correspondentes à assimetria variam muito, assim não sendo considerados como um bom parâmetro textural a ser analisado.

No testemunho são identificadas quatro principais mudanças nos parâmetros texturais localizadas em torno das amostras 4 (40,35 metros), 8 (86,6 metros), 11 (114,3 metros), e 14 (159,6 metros) (Figura 5b). Entre as amostras 4 e 8 os valores da mediana e da assimetria diminuem bruscamente, enquanto que os outros parâmetros texturais não apresentam nenhuma variação significativa. No intervalo até a amostra 11 corresponde um aumento nos valores da mediana e da assimetria seguido de uma diminuição e novamente outro aumento até a amostra 14. O desvio-padrão apresenta-se relativamente estável entre as amostras 9 e 12, seguido de uma ligeira diminuição no valor até atingir o valor inicial. A curtose e a moda apresentam variações cíclicas nos valores ao longo de todas as amostras, sendo que particularmente no intervalo até a amostra 4 o valor da moda é baixo.

As variações dos parâmetros texturais são resultantes da presença de argila nas amostras de areia, caracterizando-as como mal selecionadas, subangulosas a subarredonadas e granulometria predominante fina.

4.2 Caracterização petrográfica

4.2.1 Aspectos gerais

O principal mineral constituinte dos cordões arenosos e do testemunho é o quartzo (84,8%) (Figuras 6a e 6b). Predominando o monocristalino com extinção ondulante

($Q_{mo} = 60\%$), seguidos por quartzo monocristalino com extinção reta ($Q_{mr} = 20\%$), e raramente, de quartzo policristalino ($Q_p = 0,9\%$). Podem ou não apresentar fraturas, microporosidade intergranular, inclusões de zircão, turmalina e apatita (somente nos cordões arenosos) e revestimento de óxido de Ferro. Os grãos em sua maioria apresentam-se subangulosos a angulosos, com exceção de alguns grãos de areia média superior e grossa, e com moderada esfericidade.

Os feldspatos ($F = 12\%$) (Figuras 6a e 6b) são compostos em sua maioria por microclina (10%) e subordinadamente pelo plagioclásio (1,5%), podem ou não apresentar feições de alteração dos mais variados graus. A maioria apresenta cor castanha indicando oxidação, com forma subarredondada, mas em geral possuem forma subangulosa a angulosa, e baixo a médio grau de esfericidade. À exceção da ocorrência de um grão de microclina com forma euédrica no testemunho (107,35 metros de profundidade), apresentando-se pouco alterado (Figuras 5 e 6, Estampa I, Apêndice E).

Os grãos de quartzo e feldspato (Figuras 3 e 4, Estampa I, Apêndice E) em sua maioria apresentam-se subangulosos a angulosos e com baixo grau de circularidade. À exceção de grãos de quartzo com granulometria grossa, grãos de feldspato alterados e a glauconita apresentam-se subarredondados a arredondados e com boa esfericidade. Apresentam inclusões de zircão, turmalina e apatita, somente nos cordões arenosos.

Os fragmentos líticos ($FR = 1,2$) (Figura 6a e 6b) são pouco abundantes. São constituídos em sua maioria por alteritos de argila, oólitos de hematita e concreções ferruginosas (Figuras 7 e 8, Estampa I, Apêndice E), apresentam variadas dimensões, desde a granulometria areia fina até superiores aos grãos do arcabouço, geralmente são arredondados. A composição destes líticos sugere a reelaboração de paleossolo em um ambiente oxidante acima de 105 metros de profundidade, provavelmente durante exposição subaérea num momento de regressão forçada.

Os bioclastos (20-25%) (Figura 6b) estão presentes somente nas amostras areno-argilosas, argilosas e siltes acima de 100 metros de profundidade no testemunho. Constituídos por fragmentos de conchas, algas (Figuras 9 e 10, Estampa I, Apêndice E), incluindo algas vermelhas (rodólitos), moluscos (Figuras 11 e 12, Estampa I, Apêndice E), foraminíferos (Figuras 13 e 14, Estampa I, Apêndice E), espículas de esponja, gastrópode (Figuras 15 e 16, Estampa I, Apêndice E), briozoários, espinho–equinóide, equinodermo. Os microfósseis identificados em lâmina petrográfica apresentam alto grau de importância na avaliação dos resultados, pois permitem caracterizar um ambiente marinho, apesar de não terem sido analisados com detalhe.

Os minerais acessórios (0,5%) (Figura 6a e 6b) são compostos basicamente por biotita e minerais “pesados” como zircão e turmalina que também ocorrem como inclusões nos grãos de quartzo monocristalino. Constituem a minoria da assembléia mineralógica.

A glauconita é identificada com aumento de 20X no microscópio, ocorre com baixa significância até 100 metros de profundidade, o que não permite calcular a porcentagem de frequência durante a contagem de pontos nas lâminas.

A argila (25%) (Figura 6b) ocorre de forma dispersa na matriz, ou como grãos de argila que foram dissolvidos e/ou compactados, e por vezes envolvem grãos de quartzo. Está presente somente nas camadas areno-argilosas, e areno-siltosas acima de aproximadamente 80 metros de profundidade. A presença de argila na matriz ocorre devido à ação de organismos bioturbantes durante a deposição dos estratos, resultando na mistura das areias finas com argilas e siltes.

4.2.2 Caracterização dos cordões arenosos e do testemunho

As variações na assembléia mineralógica dos cordões arenosos comparadas às do testemunho contribuem para o estudo da evolução dos ambientes de sedimentação durante o Pleistoceno e Holoceno, além de auxiliar na compreensão da área fonte dos sedimentos.

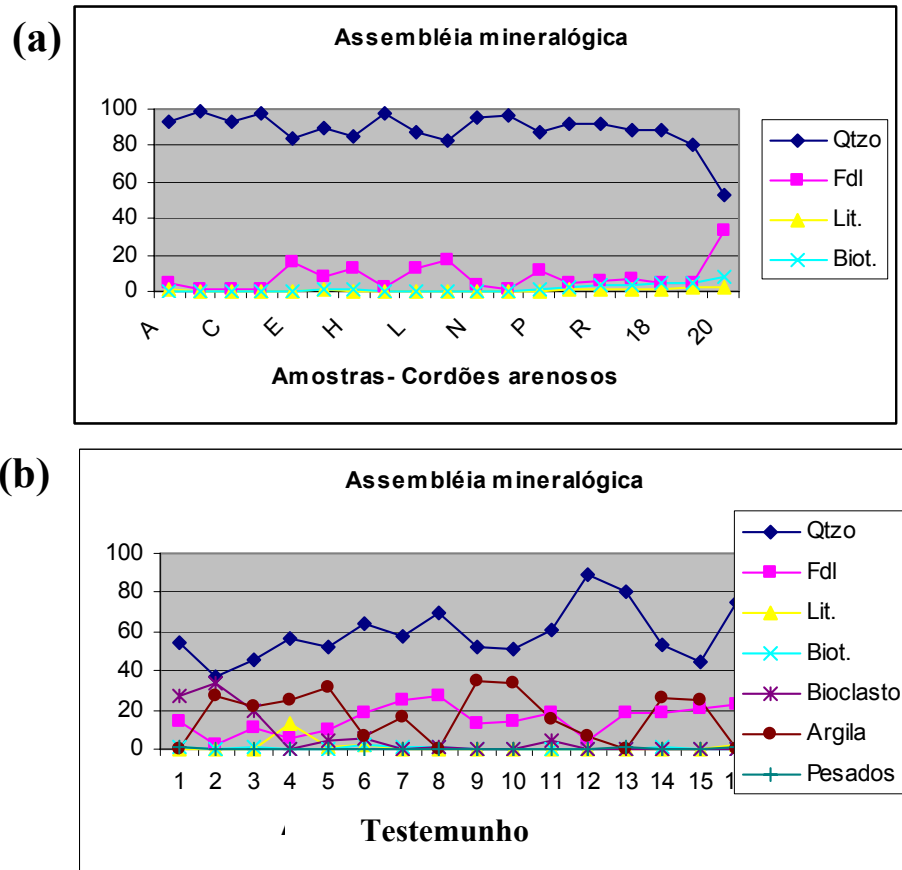


Figura 6-Na assembléia mineralógica das areias dos cordões arenosos (a) observa-se a predominância de quartzo com pequenas variações. No testemunho (b) observa-se a variação do teor (%) de quartzo em função da presença de bioclastos, argila e quantidade de feldspato maior do que nos cordões arenosos.

Nos cordões arenosos (Figura 6a) a composição mineralógica é composta predominantemente por quartzo, apesar de apresentar uma leve diminuição de teor nas fotessequências F, N e S. Atinge o teor máximo de quartzo na fotessequência L e o seu

predominantemente por quartzo, apesar de apresentar uma leve diminuição de teor nas fotossequências F, N e S. Atinge o teor máximo de quartzo na fotossequência L e o seu mínimo na fotossequência 20 (rio Paraíba do Sul). O teor de feldspato nos cordões arenosos é muito baixo, mas apresenta valores relativamente maiores nas amostras de rios (Muriaé, Dois rios e Paraíba do Sul). A quantidade de litoclasto e biotita é pouco significativa.

As amostras do testemunho (Figura 6b) são compostas essencialmente por quartzo que apresentam variações no seu teor em função da presença de outros constituintes mineralógicos tais como, bioclastos, argilas, líticos e feldspato. O feldspato (microclina e plagioclásio) possui teor (%) mais alto em relação às amostras dos cordões arenosos, apresenta variações pouco significantes.

As areias coletadas nos cordões arenosos na parte sul do delta (Figura 6a) apresentam razão Q:F:L= 82:15:3 e foram classificadas no diagrama QFL de Folk (1974) como areia quartzosa, pois são compostas em média por 85% de quartzo, subordinadamente por feldspato (microclina e plagioclásio) e de fragmentos líticos, apresentando mineralogia madura. No testemunho (Figura 6b) as areias lamosas apresentam razão Q:F:L= 75:20:5, são classificadas no diagrama QFL de Folk (1974) como um subarcósio nas amostras 1 e 3, entre o intervalo da amostra 6 até 11 e da amostra 13 até 16. As amostras 2, 4, 5 e 12 são classificadas como uma areia quartzosa.

A classificação petrográfica do diagrama ternário de Dickinson, (1985) aponta para sedimentos de interior cratônico (Figuras 7b e 8b) que correspondem às amostras fluviais, os cordões arenosos. No testemunho foram identificadas duas populações distintas e termos de proveniência situadas em ambiente de interior cratônico e continental transicional.

Em termos de proveniência o feldspato potássico pode indicar derivação a partir de rochas graníticas, geralmente é resistente ao intemperismo apesar de ter sofrido reciclagem e algumas alterações durante o transporte desde a área fonte até o sítio de deposição, e os

continental transicional do diagrama de Dickinson, (Figura 8b), apresentam menor maturidade do que o quartzo-arenito, indicando que possivelmente as coberturas sedimentares foram retiradas e expuseram as rochas do embasamento.

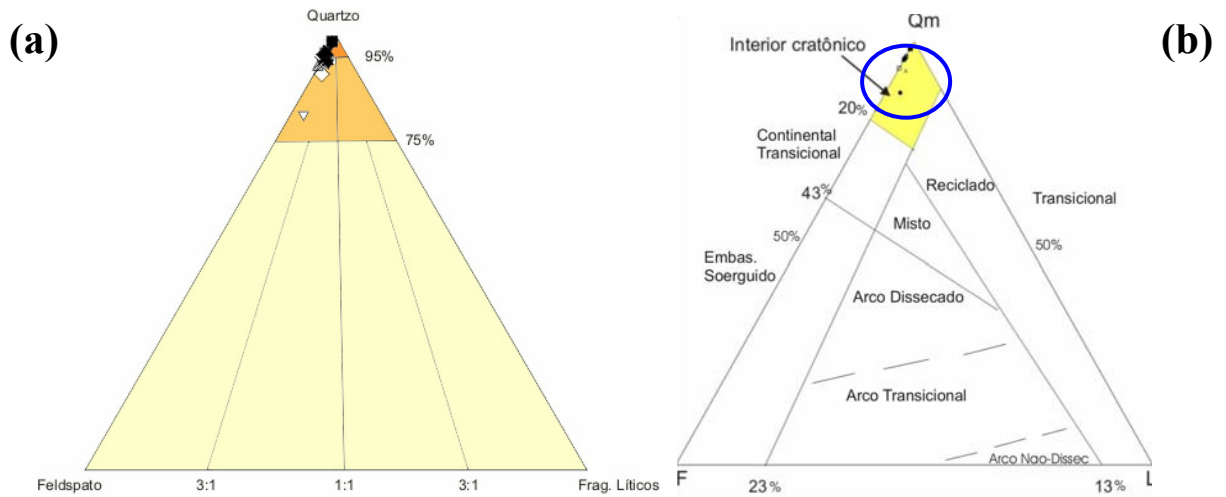


Figura 7-Distribuição composicional dos cordões arenosos (a) plotados no diagrama de Folk (1974) e no diagrama de Dickinson (1985) (b). Observa-se uma população predominante em termos de proveniência interior cratônico (b).

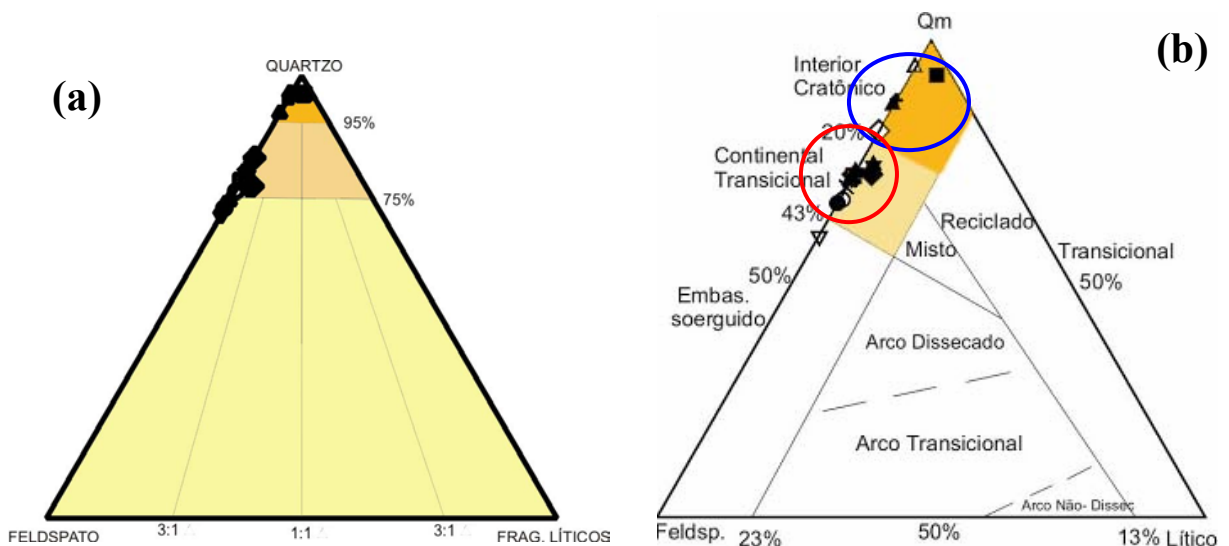


Figura 8-Distribuição composicional do testemunho plotados no diagrama de Folk (1974) (a) e no diagrama de Dickinson (1985) (b). Observam-se duas populações distintas em termos de proveniência das amostras do testemunho (b), assinaladas interior (azul) cratônico e continental transicional (vermelho).

4.3 Caracterização das eletrofácies

Através do método de modelagem de eletrofácies proposto por Soares (2005), foram identificadas 3 eletrofácies baseadas nas suas propriedades físicas (Tabela 1), cada uma foi interpretada individualmente através da comparação dos valores de média normalizada e desvio-padrão.

Deve-se ressaltar que uma mesma litofácies pode apresentar variação nos valores das propriedades físicas medidas. Isso ocorre, devido aos fatores composicionais como a presença de argila, carbonato, minerais de feldspato e até cimentação, além de aspectos que influenciam durante a perfuração do poço, tais como fluido de perfuração, peso do fluido, centralização da ferramenta.

Eletrofácies Ea (amarelo). — A eletrofácies Ea apresenta valores baixos na curva de GR e valores altos na curva de ILD; atinge entre 5 e 20 metros de espessura e, particularmente acima de 80 metros de profundidade apresenta intercalações com eletrofácies Ev e El em pacotes com dezenas de metros de espessura. (Quadro 1). Correlaciona-se litologicamente a areia fina a grossa, com presença de grânulos de quartzo e feldspato.

A composição mineralógica é essencialmente quartzosa, com baixa quantidade de feldspato (microclina e plagioclásio). Observa-se a presença de alguns fragmentos líticos, tais como concreções ferruginosas, ólitos de hematita (Figura 7 e 8, Estampa II, Apêndice E) que indicam a reelaboração de paleossolos e texturas plásmicas de argila típicas de paleossolo. No diagrama QFL de Folk (1968) Ea classifica-se como uma areia quartzosa (Figura 8a) na amostras 12 e como um subarcósio nas amostras 1, 13 e 16 (Figura 6b) (Tabela 2, Apêndice B). Em termos de proveniência a areia quartzosa aponta para um ambiente de interior cratônico no diagrama de Dickinson (1985) e o subarcósio para ambiente continental transicional (Figura 8b).

amostras 12 e como um subarcósio nas amostras 1, 13 e 16 (Figura 6b) (Tabela 2, Apêndice B). Em termos de proveniência a areia quartzosa aponta para um ambiente de interior cratônico no diagrama de Dickinson (1985) e o subarcósio para ambiente continental transicional (Figura 8b).

Eletrofácies Ev (verde). — Esta eletrofácies é melhor representada pela curva GR que apresenta valores altos, e pela ILD, com valores baixos. Ocorre nas profundidades acima de 60 metros, geralmente intercalada com a eletrofácies El; abaixo dessa profundidade intercala-se com a Ea. Correlaciona-se litologicamente com camadas argilosas intercaladas com siltes e areias muito finas. A partir de 110 metros de associa-se à Ea um subarcósio.

Petrograficamente, apresenta composição quartzosa com freqüência de feldspato (microclina e plagiocásio) menor do que Ea, incluindo a presença de fragmentos de concha, rodólitos (Figura 9 e 10, Estampa II, Apêndice E), microfosséis (Estampa II, Apêndice E) e argila (25%). No diagrama QFL de Folk (1968) (Figura 8a) a eletrofácies Ev corresponde a um subarcósio nas amostras 7, 10, 11, 14 e 15 (Figura 6b) (Tabela 2, Apêndice B), indicando no diagrama de Dickinson (1985) (Figura 8b) para uma ambiente continental transicional. As amostras 7 e 10 são texturalmente caracterizadas como areias argilosas e as amostras 11, 14 e 15 como subarcósio. As amostras 4 e 8 (areias quartzosas) e 6 (subarcósio) correspondem a intercalação entre eletrofácies Ea e Ev.

Eletrofácies El (laranja). — A eletrofácies El não ocorre com muita freqüência. É bem representada pelos altos valores de GR, porém mais baixo que na Ev e por valores baixos de ILD. Está melhor representada nas profundidades acima de 40 metros por pacotes intercalados principalmente com a eletrofácies Ev, e abaixo de 100 metros intercala-se pouco frequentemente com Ea. Correlaciona-se em termos litológicos com camadas de siltes.

No diagrama QFL Folk (1968) esta eletrofácies corresponde a uma areia quartzosa na amostra 2 e um subarcósio nas amostras 3, 5 e 9 (Figura 6b) (Tabela 2, Apêndice B), apontando para ambiente continental transicional no diagrama de Dickinson (1985) (Figura 8b).

Tabela 1 – Caracterização das eletrofácies

Eletrofácies	Diagnose	GR (API)	RES (ohmm)	COND. (mmho/m)	Interpretação
Ea (Amarelo)	GR- Baixo	Mn: 50,06	Mn: 140,09	Mn: 9,06	Areia
	ILD- Alto	σ : 28,94	σ : 98,34	σ : 3,58	
Ev (Verde)	GR- Alto	Mn: 92,99	Mn: 20,01	Mn: 65,60	Argila/ Subarcósio
	ILD- Baixo	σ : 71,51	σ : 11,49	σ : 31,21	
El (Laranja)	GR – Médio	Mn: 71,49	Mn: 5,40	Mn: 198,73	Silte
	ILD- Médio	σ : 41,37	σ : 1,34	σ : 57,11	

Mn= Média normalizada; σ = desvio- padrão

4.2 Eletrossequências

As eletrossequências foram definidas a partir de sucessões de eletrofácies, reconhecidas juntamente com o comportamento das curvas GR e ILD. Em geral apresentam em torno de 5 a 10 metros de espessura.

O reconhecimento das eletrossequências foi realizado de forma visual, através da integração de informações composicionais e sedimentológicas das areias descritas no testemunho juntamente com o conhecimento geofísico, dado pelos perfis GR e ILD, associado às eletrofácies. Foram reconhecidas 3 eletrossequências (Quadro 1).

Eletrossequência 1. — Em geral apresenta comportamento serrilhado da curva GR (Quadro 1). Caracteriza-se por sucessões monótonas da eletrofácies Ea, que podem atingir até

20 metros de espessura. Esta eletroseqüência pode ser interpretada como paleoambientes fluviais e flúvio-deltaicos.

Eletroseqüência 2. — Caracteriza-se pelas eletrofácies Ev e Ea, corresponde a um perfil GR com padrão serrilhado (Quadro 2). Predomina a eletrofácies Ea sob a forma de pacotes com dezenas de metros de espessura principalmente na profundidade acima de 110 metros. Pode ser interpretada como cordões arenosos, típico de ambiente marinho, tal como observado na planície deltáica estudada.

Eletroseqüência 3. — Esta eletroseqüência é facilmente reconhecida pelo perfil tipo funil, onde apresenta uma tendência ao afinamento granulométrico para o topo no perfil GR (Quadro 2). Composta pelas eletrofácies Ea, Ev e El, com predominância de Ev e El. Geralmente apresentam intercalações entre Ev e El, e possivelmente com Ea. Ocorrem desde pacotes finos até relativamente mais espessos (aproximadamente 5 metros). Pode representar depósitos de planície de maré, indicando o aumento do nível do mar, onde as planícies costeiras são erodidas e vales fluviais afogados dando origem a lagunas e estuários.

Quadro 1 – Associação das eletroseqüências e interpretação

Eletroseqüências	Eletrofácies	Perfis GR	Interpretação
1	Ea	Serrilhado	Ambiente fluvial, progradação deltáica
2	Ev, Ea	Serrilhado	Cordões arenosos, ambiente de praia
3	Ea, Ev, El	Funil	Estuários, Planícies de maré

5 CORRELAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA, PETROGRÁFICA E DE ELETROFÁCIES

A variação dos valores dos parâmetros texturais nas areias dos cordões arenosos e do testemunho mostram diferenças significativas no desvio-padrão, permitindo a separação em

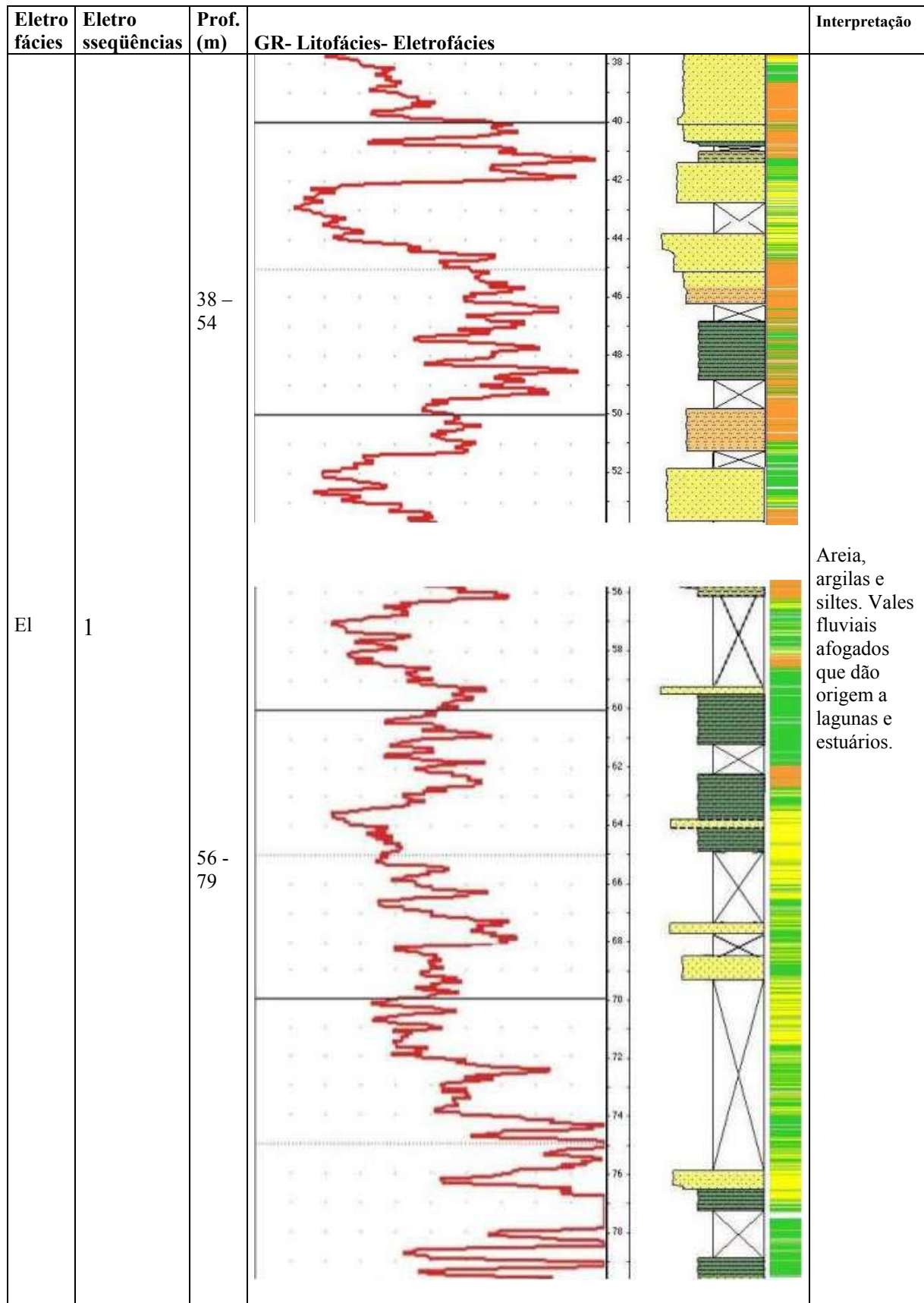
grupos com características sedimentológicas semelhantes. Este processo de segregação dos grãos em função da granulometria e do grau de arredondamento podem indicar a atuação de processos deposicionais nas areias dos cordões arenosos.

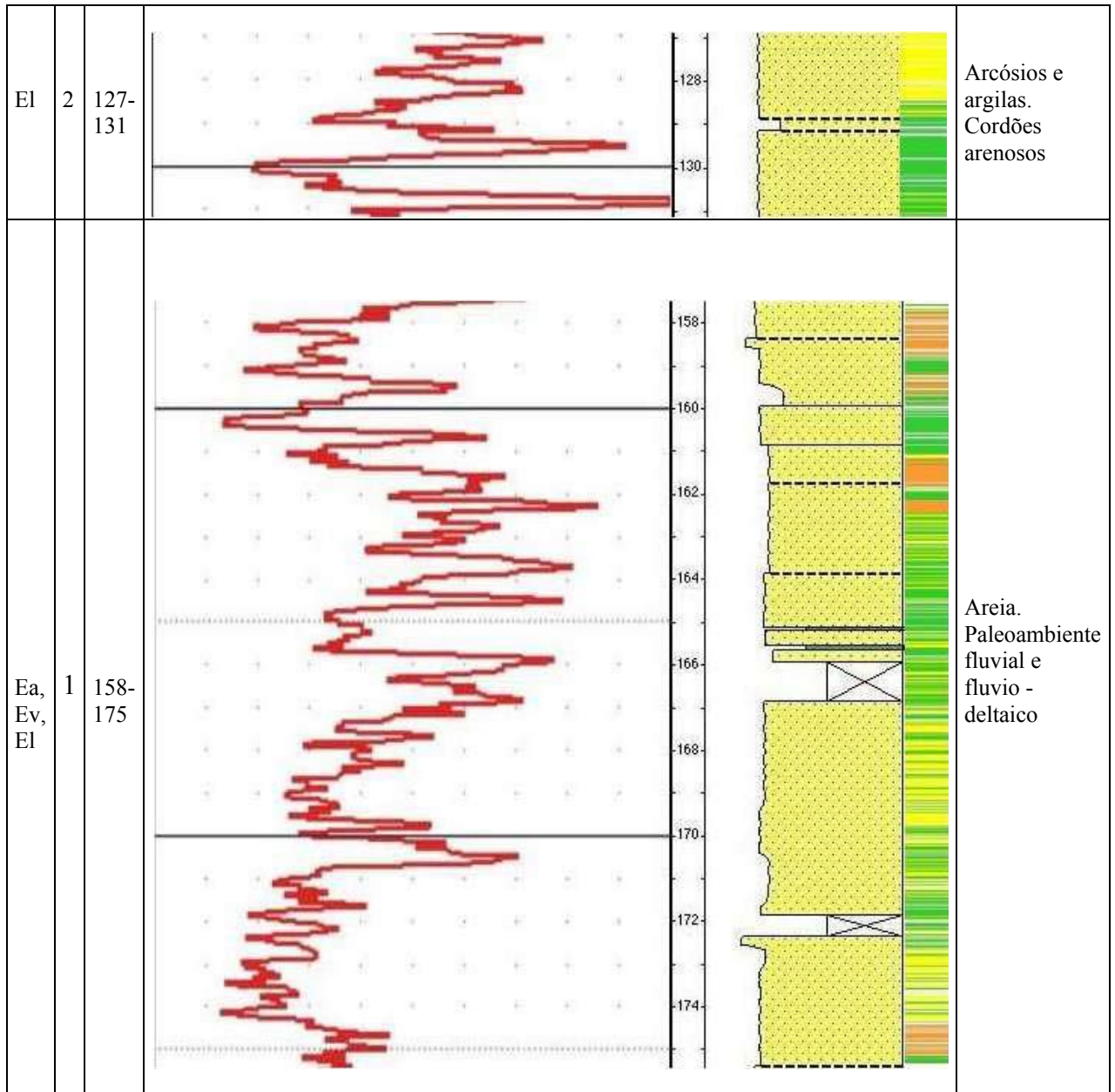
As amostras de areias coletadas em superfície na porção sul da desembocadura do rio Paraíba do Sul, apresentam resultados texturais concordantes com o estudo realizado por Martin *et al.* (1984b) no mesmo local de trabalho, explicando o significado geológico para o grau de arredondamento das areias holocênicas através do sentido de transporte litorâneo dos sedimentos.

Paralelamente, a modelagem de eletrofácies realizada com perfis de GR, ILD e condutividade reconheceu 3 eletrofácies baseado na distinção entre os valores de suas propriedades físicas (média normalizada e desvio - padrão). A identificação de 3 eletrosseqüências, contribuiu para a análise da evolução deposicional do delta do rio Paraíba do Sul.

Especificamente, a eletrosseqüência 1 é composta pelas eletrofácies Ea interpretada como areia. Ocorre entre o intervalo de 130 e 150 metros de profundidade. Texturalmente, a granulometria varia desde areia fina até grânulos que apresentam-se subangulosos e subarredondados com seleção moderada. Composicionalmente, as areias são essencialmente quartzosas, subordinadas de feldspato contém fragmentos líticos tais como concreções ferruginosas e óolitos de hematita. Classifica-se no diagrama de Folk (1968) como um subarcósio e no diagrama de Dickinson (1985) representa uma ambiente continental transicional. No contexto de evolução deposicional deltaico a eletrosseqüência 1 pode ser interpretada como um paleoambiente fluvial ou fluvio-deltaico.

Quadro 2 – Caracterização das eletrosequências.





A eletrosequência 2 caracteriza-se pelas eletrofácies Ea e Ev, sendo interpretada como areia argilosa ou subarcósio. Ocorre entre os intervalos de 64 e 100, 110 e 130 metros e abaixo de 155 metros de profundidade. Texturalmente, apresenta grãos subangulosos e mal selecionados, incluem granulometria desde silte e argila até areia grossa. A composição mineralógica é composta principalmente por quartzo, feldspato (microclina e plagioclásio) e

fragmentos líticos, além de bioclastos incluindo fragmentos de rocha, microfósseis e rodólitos (Estampa II, Apêndice F) e argila. Classifica-se no diagrama de Folk (1974) como areia quartzosa nas amostras 4 e 12 (Figura 6b) e predominantemente como subarcósio nas amostras entre 6 e 8 e em 10 e 16. Em termos de interpretação, sugere-se que esta eletrossequência represente os cordões arenosos, típicos em ambiente de praia.

A eletrossequência 3 é composta pelas eletrofácies Ea, Ev e El. Ocorre nas profundidades até 64 metros e no intervalo entre 100 e 110 metros. Em termos sedimentológicos, composicionais e de classificação petrográfica apresentam as mesmas características que as eletrossequências 1 e 2. É indicado que esta eletrossequência seja interpretada como um ambiente de planície de maré, no período de aumento do nível do mar.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo permite ampliar a caracterização textural e composicional em subsuperfície da planície costeira do rio Paraíba do Sul, pois os modelos propostos anteriormente não dispuseram de dados geológicos de subsuperfície.

A identificação da composição mineralógica permite analisar a proveniência dos sedimentos depositados nos terraços arenosos durante as flutuações do nível do mar (regressão e transgressão) ocorridas durante o Pleistoceno – Holoceno. Este estudo contribui para a compreensão da variação da distribuição mineralógica, e de parâmetros texturais nas amostras analisadas.

Aliado aos métodos anteriores, a aplicação da modelagem de eletrofácies realizada no testemunho na região próxima à Lagoa feia é um método inédito, propondo uma análise completa de um perfil estratigráfico, permitindo contribuir na abordagem para a evolução do delta do rio Paraíba do Sul. Assim, o reconhecimento de uma sucessão de eletrofácies, dada

por perfis geofísicos, permitiu identificar eletrosequências que representam um trecho da evolução dos ambientes de sedimentação deltáica que, quando correlacionadas com as fácies litológicas, garantiu a eficácia do método aplicado.

Referências bibliográficas

- Almeida, A.G.; Figueiredo Jr., A.G.; Ribeiro, G.P. *et al.* 2005. Estratigrafia do quaternário da planície deltaica ao sul do rio Paraíba do Sul, RJ. *In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, 7, Niterói, 2005. *Resumos expandidos*, Niterói, SBG-RJ/ES. CD-ROM, 5p.
- Alves, E.C.; Gorini, M.A.; Rodrigues, P.C.H.; Silva, C.G. 1980. Estudo da sedimentação quaternária na região entre Rio Doce e Cabo Frio. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31, Camboriú, 1980. *Anais*, Camboriú, SBG, v.1, p.515-529.
- Bacoccoli, G. 1971. Os deltas marinhos holocênicos brasileiros. Uma tentativa de classificação. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 14:5-38.
- Bastos, A.C. & Silva, C.G. 1996. Evidências de períodos erosivos cíclicos na planície de cristas de praia do rio Paraíba do Sul, RJ. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 39, Salvador, 1996. *Anais*, Salvador, SBG, v.1, p.379-383.
- Basu, A. 1985. Influence of climate and relief on compositions of sands released at source areas. *In: ZUFFA, G.G. (ed.) Provenance of arenites*. Dordrecht, D. Reidl Publ., p.1-18. (NATO Series)
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2001. *Geologia do Estado do Rio de Janeiro*. Brasília, CPRM, 85p.
- Della Piazza, H. 1983. Discordância pré-Holocênica e sua importância no estudo de fundações da bacia de Campos - Brasil. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 26:91-114.
- Dias, G.T.M.; Silva C.G.; Malschitzky, I.H.; Pirmez, C. 1984a. A planície deltaica do Rio Paraíba do Sul; seqüências sedimentares subsuperficiais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 33. Rio de Janeiro, 1984. *Anais... Resumos expandidos*, Rio de Janeiro, SBG, v4, p.1565 – 1576.
- Dias, G.T.M.; Silva, C.G.; Malschitzky, I.H.; Pirmez, C. 1984b. A frente deltaica do Rio Paraíba do Sul; fisiografia submarina e distribuição sedimentar. 1984a *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 33. Rio de Janeiro, 1984. *Anais... Resumos expandidos*, Rio de Janeiro, SBG, v1, p.83-84.
- Dickinson, W.R. 1985. Interpreting provenance relation from detrital modes of sandstones. *In: ZUFFA, G.G. (ed) Provenance of arenites*. Dordrecht, D. Reidl Publ., p.333-361. (NATO Series)
- Dominguez, J.M.L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Martin, L. 1983. O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas à desembocadura dos rios São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, 13:93-105.

- Dominguez, J.M.L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Martin, L. 1987. Sea-level history and evolution of river mouth-associated beach-ridge palins along the east-southeast Brazilian coast: a summary. *Sea level fluctuation and coastal evolution*. p.115 - 117.
- Dominguez, J.M.L. 1990. Delta dominados por ondas: críticas às idéias atuais com referência particular ao modelo de Coleman & Wright. *Revista Brasileira de Geociências*, 20:352-361.
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. 2.ed. Austin, Hemphill Publ. Co., 184p.
- Gonçalves, C.Z. 2005. *Proveniência e distribuição dos minerais pesados no complexo deltaico do rio Paraíba do Sul*. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense, Dissertação de Mestrado, 113p.
- Gonçalves, C.Z. & Silva, C.G. 2005. *Proveniência e distribuição dos minerais pesados no complexo deltaico do rio Paraíba do Sul*. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 7, Niterói, 2005. *Resumos expandidos*, Niterói, SBG-RJ/ES. CD-ROM, 6p.
- Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J.-M.; Dominguez, J.M.L.; Azevedo, A.E.G. 1984a. Evolução da planície costeira do rio Paraíba do Sul (RJ) durante o Quaternário: influência das variações do nível do mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. *Resumos expandidos*, Rio de Janeiro, SBG, v.1, p.84-97.
- Martin L.; Suguio, K.; Flexor, J.-M.; Tessler, M.G.; Eichler, B.B. 1984b. Significado geológico das variações dos graus de arredondamento das areias holocênias da planície costeira do Rio Paraíba do Sul, (RJ). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro. *Anais*, Rio de Janeiro, SBG, v.1, p.119-132.
- Martin, L.; Flexor, J.-M. 1984. Porque a planície costeira do rio Paraíba do Sul não pode ser denominada de “clássico delta dominado por ondas”. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL RJ-ES, 1, Rio de Janeiro, 1987. *Anais*, Rio de Janeiro, SBG, p.70-84.
- Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J.M. 1986. *As flutuações de nível do mar durante o quaternário superior e a evolução geológica de “Deltas” brasileiros*. São Paulo, Universidade de São Paulo, 186p. (Boletim IG-USP, Publicação Especial, n.15)
- Martin, L.; Suguio, K.; Flexor, J.M.; Dominguez, J.M.L. 1997. *Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do estado do Rio de Janeiro e do Espírito Santo*. Belo Horizonte, CPRM/FAPESP, 101p.
- Potter, P.E. 1986. South America and a few grains of sand: Part I- Beach sands. *The Journal of Geology*, 94:301-319.
- Potter, P.E. 1994. Modern Sands of South America: composition, provenance and global significance. *Geologisches Rundschau*, 83:212-232.
- Savage, K.M.; Cesero, P.; Potter, P.E. 1988. Mineralogic maturity of modern sand along a high-energy tropical coast: Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of South American Earth-Sciences*, 1:317-328.

- Silva, C.G. 1987. *Estudo da evolução geológica e geomorfologia da região da Lagoa Feia, RJ*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, 160p.
- Tomaz, E.A. 2005. *Mapeamento de paleocanais ao longo da planície costeira do rio Paraíba do Sul e plataforma continental da bacia de Campos e sua possível relação com a evolução do canyon Almirante Câmara*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, 89p.

Apêndice A- Métodos de análise granulométrica

1 Análise textural

A amostragem do material para a realização de ensaios granulométricos tem como objetivo determinar aspectos morfológicos, forma, angulosidade e parâmetros texturais tais como moda, média, curtose, seleção e assimetria através das curvas granulométricas. As amostras dos cordões arenosos e do testemunho foram quarteadas para gerar subamostras para ensaios granulométricos e análise petrográfica.

A análise da distribuição granulométrica considera parâmetros discriminadores e morfodinâmicos de aspectos de superfície, tamanho e forma das partículas que compõem a areia e ou arenito.

A preparação das amostras para análise granulométrica considera alguns fatores importantes que podem interferir no resultado final do tamanho do grão, recomendando que todas as substâncias que interfiram no processo sejam removidas, como argilas, carbonatos e precipitados químicos.

O ensaio granulométrico aplicado nas amostras coletadas foi realizado de acordo com os procedimentos definidos por Folk (1968), com o propósito de obter o tamanho do grão das partículas clásticas que foram depositadas. As análises foram realizadas no laboratório de geologia sedimentar, com o auxílio dos técnicos Luiz Ferro (*in memoriam*) e Roberto Gomes de Lima. Utilizando um conjunto de 11 peneiras, com intervalo de $\phi 25$ entre cada, incluindo as peneiras principais e as intermediárias, com objetivo de detalhar a amostragem. As propriedades das peneiras utilizadas seguem na tabela abaixo:

Tabela 1-Especificações das peneiras utilizadas em mm, F_i (ϕ), e mesh.

mm	2,00	1,41	1,00	0,71	0,50	0,35	0,250	0,180	0,125	0,088	0,062
F_i (ϕ)	1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
n ^o peneira	10	14	18	25	35	45	60	80	120	170	230

Para acelerar o processo de análise as peneiras foram colocadas no agitador e fixadas com um suporte durante 15 minutos. Em seguida são separadas de acordo com a sua granulometria e cada fração é pesada individualmente na balança digital.

Segundo Folk (1968), para realizar análise de pipetagem para siltes e argilas todo o material grosso, (maior que 0,0062mm) deve ser removido da amostra, a quantidade de amostra indicada para trabalhar são de aproximadamente 15 gramas, sendo que no trabalho presente a análise foi realizada com um peso de aproximadamente 35 gramas, pois a quantidade de material fino era muito baixa.

2 Apresentação gráfica da análise granulométrica

Neste estudo os gráficos de frequência acumulativa e histograma de massa foram utilizados para auxiliar na visualização dos resultados e distribuição dos sedimentos, além de permite a comparação entre as amostras.

O histograma de massa é um gráfico de barras que representa as percentagens dos valores de granulometria. Segundo Folk (1968), a curva cumulativa de probabilidade deve ser usada para a determinação de todos os parâmetros estatísticos devido à facilidade de leitura dos valores no gráfico e a sua acuracidade, depende do tamanho das partículas e a inclinação depende do grau de seleção dos grãos. A curva cumulativa critmética permite a visualização de todos os parâmetros estatísticos, e a comparação entre os valores.

A curva de frequência é obtida através da medida da inclinação das curvas de tangente da curva cumulativa. Os dados de análise granulométrica podem ser plotados em gráficos com base aritmética e/ou com base logarítmica, dependendo da finalidade do trabalho sendo que a primeira apresenta maior acuracidade e facilidade na leitura visual, Folk(1968).

Parâmetros estatísticos de análise granulométrica

A aplicação dos parâmetros estatísticos, descreve quantitativamente as feições das curvas granulométricas; esses valores podem ser tabulados e até indicadores de ambientes de sedimentação diferentes.

Folk (1968), define que moda é uma propriedade que representa o diâmetro da partícula que mais ocorre em uma dada distribuição granulométrica. Este diâmetro corresponde ao ponto de inflexão da curva cumulativa, somente se a curva estiver em escala aritmética, podendo ser o ponto mais alto da curva de frequência. A única maneira de determinar a moda é utilizando o gráfico de probabilidade com as amostras plotadas, e medir a porcentagem de ocorrência das amostras que apresentam um diâmetro menor que o grão mais grosso; e um diâmetro maior que o grão mais fino. Este procedimento é feito repetidamente até obter o valor mais alto que corresponde ao diâmetro da moda.

Este parâmetro estatístico apresenta importância na avaliação da gênese do sedimento, transporte de sedimentos, principalmente quando duas ou mais fontes contribuem. O diâmetro modal tende a permanecer constante em algumas áreas, enquanto que em outras pode variar bastante. Além disso, esta propriedade é difícil determinar independente do tamanho do grão do resto dos sedimentos.

A mediana é um parâmetro textural que representa o diâmetro correspondente a 50% na curva cumulativa, pode ser expresso em milímetros ou em ϕ (F_i), mas não reflete o tamanho dos sedimentos, principalmente se forem distribuições assimétricas.

Segundo Folk (1968), a média é determinada através da medida gráfica dada pela fórmula: $M_z = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})/3$.

Os valores resultantes da média são superiores à mediana porque é baseado em três pontos e apresenta uma melhor distribuição de valores.

Folk (1968), afirma que as medidas de tendência central são avaliadas para determinar a uniformidade de distribuição e seleção dos sedimentos.

Desvio padrão é uma ótima medida de seleção dos grãos, apesar de apenas considerar os dois valores centrais da curva. O cálculo é dado pela fórmula:

$$Si = (\varphi84 - \varphi16)/4 + (\varphi95 - \varphi5)/6,6$$

Esta fórmula inclui 90% da distribuição dos sedimentos e a seleção, sendo a média do desvio calculado para $\varphi16$ e $\varphi84$ e $\varphi5$ e $\varphi95$.

Tabela 2- Valores de seleção e grau de classificação

Valores de φ	Seleção
> 0,35	Muito bem selecionado
0,35 – 0,50	Bem selecionado
0,5 – 0,71	Moderadamente bem selecionado
1,0 – 2,0	Moderadamente selecionado
2,0 – 4,0	Pobremente selecionado
< 4,0	Muito pobremente selecionado

A assimetria é um parâmetro medido de acordo com a cauda de distribuição dos sedimentos, pode estar deslocada mais a esquerda ou a direita. Esta curva é bastante afetada pela seleção dos sedimentos, podendo apresentar valores similares de grãos de tamanho médio e serem diferentes quanto a assimetria, Folk(1968).

O cálculo de Ski é dado pela equação :

$$Ski = (\varphi84 + \varphi16 - 2 \varphi50) / (\varphi84 - \varphi16) + (\varphi95 + \varphi5 - 2 \varphi50) / (\varphi95 - \varphi5)$$

Em curvas simétricas a assimetria é nula, ou seja, $Ski=0$; curvas com excesso de material fino (cauda para a direita) possuem assimetria positiva; e aquelas onde há mais material grosseiro (cauda para a esquerda) possuem assimetria negativa.

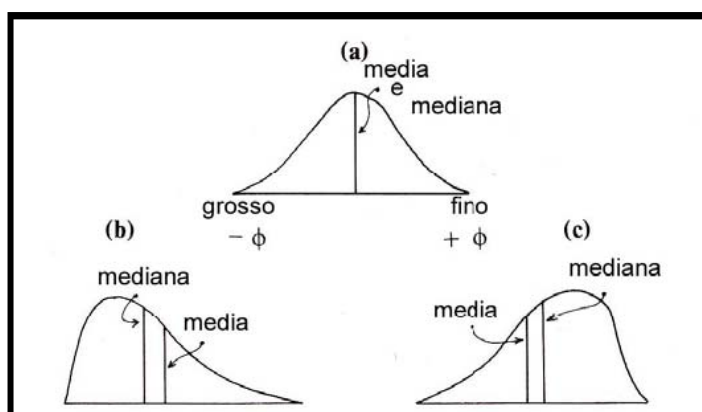


Figura 1- Padrão de distribuição de diferentes graus de assimetria: (a) simétrico; (b) positiva; (c) negativa (Leeder,1985)

Quanto mais o valor de S_{ki} se afasta de zero, maior a assimetria os limites matemáticos teóricos variem de +1,00 a -1,00, dificilmente passam de +0,80 e -0,80.

Tabela 3-Valores limites para a classificação da assimetria (Folk, 1968)

Ski	Assimetria
+ 1,0 - +0,3	Positiva acentuada
+0,3 - +0,1	Positiva
+0,1- -0,1	Simétrica
-0,1- -0,3	Negativa
-0,3- -1,0	Negativa acentuada

A Curtose é um parâmetro medido pela fórmula Gaussiana definida na curva de probabilidade normal o intervalo entre os pontos de ϕ_{95} e ϕ_5 o diâmetro deve ser exatamente 2,44 vezes o intervalo entre os pontos ϕ_{25} e ϕ_{75} .

Esta propriedade mede a razão entre a seleção dos extremos da curva e a seleção da parte central, sendo uma medida quantitativa que descreve o afastamento/desvio da curva normal. Se a parte central da curva apresentar maior seleção do que na extremidade, a curva é classificada como leptocúrtica; se a extremidade da curva apresentar maior seleção do que a parte central, a curva é classificada como platicúrtica.

Os valores para a classificação da curtose apresentam $K_g = 1,00$ para curvas normais; $K_g > 1,00$ para leptocúrticas; e $K_g < 1,00$ para platicúrticas. O valor ideal para a curtose é 1,00.

Tabela 4 - Valores limites para as diferentes faixas de curtose (Folk, 1968)

Kg	Classificação
>0,67	muito platicúrtica
0,67 - 0,90	platicúrtica
0,90 - 1,11	mesocúrtica
1,11 - 1,50	leptocúrtica
1,50 - 3,00	muito leptocúrtica
>3,00	extremamente leptocúrtica

Apêndice B- Resultado dos métodos analíticos

Tabela 1-Relação das amostras dos cordões arenosos e rios com os respectivos resultados petrográficos e texturais

Tabela 2-Relação das amostras do testemunho com os respectivos resultados petrográficos e texturais. Coordenada UTM (WGS, 1984): 278961.84/ 7573378.88 N

Tabela 1-Relação das amostras dos cordões arenosos e rios com os respectivos resultados petrográficos e texturais

*Folk 1968, Bimodal supermature sandsstones, Product of desert floor, XXIII Internat, Geol, Cong, Proc, 8, p. 9-32

Amostras	Coord, (UTM, WGS, 1984)	PARÂMETROS TEXTURAIIS					MINERALOGIA					Class, Petrog,*
		X	Moda	Si	Ski	K	Q	Fld	Lit,	Biot,		
A	0290496 7599600	1,63	20,46	0,58	0,35	0,98	93,6	4,6	1,6	0	Areia quartzosa	
B	289264 759603	1,66	21,56	0,55	0,86	0,93	98,3	1,3	0	0,3	Areia quartzosa	
C	288534 7597882	1,3	17,75	0,50	0,19	1,25	92,9	1,6	0	0	Areia quartzosa	
D	287980 7597283	1,18	18,74	0,63	-0,02	0,88	97,9	0,6	0	0,3	Areia quartzosa	
E	0287515 7597023	0,93	15,49	0,75	0,15	0,83	83,6	15,6	0	0	Areia quartzosa	
F	0287230 7596931	1,21	13,79	0,71	0,07	1,07	90,2	7,5	0,6	1,6	Areia quartzosa	
H	286730 7597094	1,28	17,64	0,65	0,41	0,55	85,6	13	0	1	Areia quartzosa	
I	0286145 7596939	1,1	15,50	0,67	0,03	10,12	90,3	7,5	0,6	1,3	Areia quartzosa	
J	0285753 7596931	0,88	19,75	0,67	0,19	1,95	97,6	1,9	0	0,3	Areia quartzosa	
L	285300 7596912	0,96	15,81	0,64	0,05	0,72	87,2	12,6	0	0	Areia quartzosa	
M	0284855 7596904	1,4	16,74	0,67	-0,02	11,34	82,6	16,9	0	0,3	Areia quartzosa	
N	0284300 7596886	0,78	11,59	0,91	0,09	1,05	95,9	3,9	0	0	Areia quartzosa	
O	0283687 7596868	1,2	16,96	0,65	0,16	1,02	96,2	1,3	0	0	Areia quartzosa	
P	0282720 7596866	1,38	13,71	0,85	0,33	0,92	86,9	11,3	0,3	1,3	Areia quartzosa	
Q	0282015 7596894	2,11	21,75	0,52	0,31	0,92	92	4,3	1	2,6	Areia quartzosa	
R	0281500 7596787	2,01	19,24	0,63	0,22	1,05	91,6	5,9	0,9	4	Areia quartzosa	
S	0281177 7596671	2	20,76	0,51	0,21	1,02	88,9	6,6	0,9	4	Areia quartzosa	
Muriaé	0249625 7608375	1,5	22,65	0,54	0,01	0,92	88,6	4,9	0,6	4,6	Subarcóseo	
Dois Rios	0208975 7605781	0,71	22,31	0,50	-0,05	0,92	80,9	4,3	2,6	4,3	Subarcóseo	
P, do Sul	0681323 7471274	0,03	22,50	0,38	2,07	0,73	53,2	33,3	2,6	7,6	Subarcóseo	

Legenda:

Parâmetros Texturais: X= Média; Si= Desvio-Padrão; Ski= Assimetria; K= Curtose
 Composição Mineralógica: Q= Quartzo; Fld= Feldspato; Biocl,= Bioclastos; Pesados= Minerais pesados; Biot,= Biotita;
 Alterito= Alterito(Lítico); Arg,= Argila

Tabela 2-Relação das amostras do testemunho com os respectivos resultados petrográficos e texturais.
 Coordenada UTM (WGS, 1984): 278961.84/ 7573378.88 N

Amostras	PARÂMETROS TEXTURAIIS						COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA						Class. Petrográfica *
	Prof(m)	X	Si	Ski	K	Q	Fld	Biocl.	Pesados	Biot.	Alterito	Argila	
1	18,9	2,83	1,48	0,18	1,46	54,6	14,6	27,7	1,2	1,6	0	0	Subarcóseo
2	32,7	5,63	1,64	0,3	0,53	36,6	2	34	0	0	0	27,3	Areia quartzosa
3	40,35	6,2	1,48	0,28	0,67	45,6	10,6	19,6	0	0,6	0	21,6	Subarcóseo
4	43,2	3,86	1,78	0,36	0,99	56	5	0	0	0	13,3	25,3	Areia quartzosa
5	54,3	4,23	1,52	0,38	0,57	52	10	4	0	0	1,6	32	Areia quartzosa
6	74,7	2,5	1,57	1,15	0,65	64,3	18,9	5	0	2	2,6	6,6	Subarcóseo
7	86,8	2,58	1,20	-0,04	1,42	58	24,9	0	0	0,6	0	16,3	Subarcóseo
8	101,1	1,91	1,42	0,72	0,97	70	27,6	0,6	0	1,6	0	0	Subarcóseo
9	105	0,71	0,97	0,17	0,90	52,6	12,6	0,3	0	0	0	34,3	Subarcóseo
10	107,35	4,86	1,86	0,06	0,54	51	14,6	0	0,3	0	0	33,3	Subarcóseo
11	114,3	0,9	1,58	0,09	1,66	61,3	18	4,6	0	0	0	15,6	Subarcóseo
12	130,5	0,78	1,01	0,76	0,92	89,3	4	0	0,3	0	0	6,3	Areia quartzosa
13	142,5	0,81	1,26	0,32	1,25	80,6	18,3	0	0,9	0	0	0	Subarcóseo
14	159,6	2,71	1,43	0,56	1,31	53,2	18,6	0	0	1,3	0,3	26	Subarcóseo
15	163,5	3,41	1,60	1,07	0,66	44,3	20,3	0	0	0	0	24,6	Subarcóseo
16	171	-	-	-	-	74,6	22,3	0	0,6	0	2,3	0	Subarcóseo

*Folk, R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. 2.ed. Austin, Hemphill Publ. Co., 184p.

Legenda:

Parâmetros Texturais: X= Média; Si= Desvio-Padrão; Ski= Assimetria; K= Curtose

Composição Mineralógica: Q= Quartzo; Fld= Feldspato; Biocl.= Bioclastos; Pesados= Minerais pesados; Biot.= Biotita; Alterito= Alterito(Lítico); Argila= Argila

Apêndice C - Modelos de evolução da planície costeira do delta do rio Paraíba do Sul

Figura 1-Fases de progradação deltáica do rio Paraíba do Sul (modificado por Lamego, 1955).

Figura 2-Esquema evolutivo, durante os últimos 120 ka das planícies de cordões litorâneos associadas às desembocaduras dos Rios São Francisco, Jequitinhonha, Doce e Paraíba do Sul (segundo Dominguez, 1990).

Quadro 1-Esquema de evolução do complexo deltaico do rio Paraíba do Sul (Segundo, Martin *et al.*, 1983,1984)

Quadro 2- Esquema de evolução para a região de Lagoa Feia e complexo deltaico do rio Paraíba do Sul (Silva, 1987).

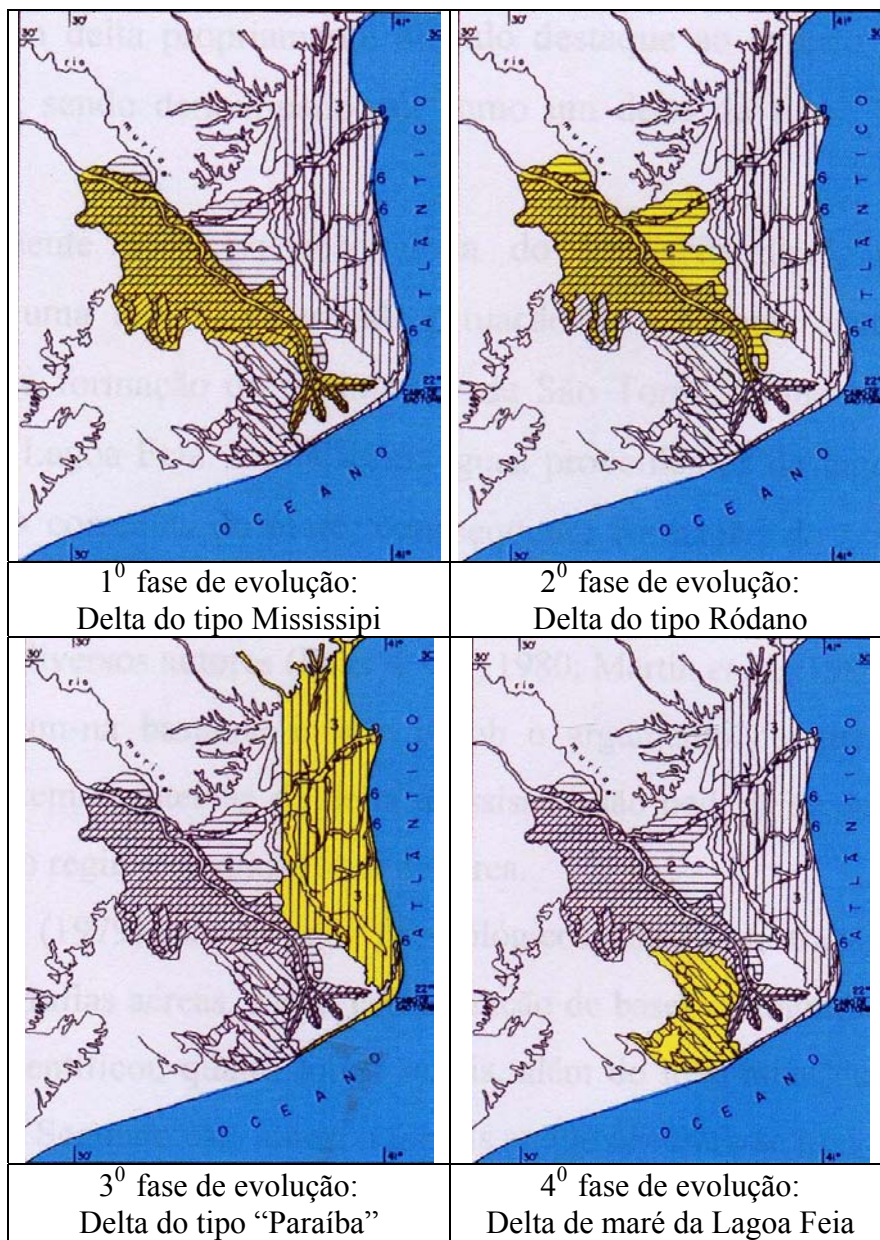
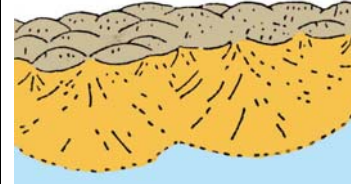
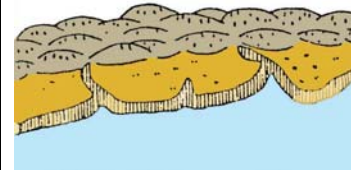

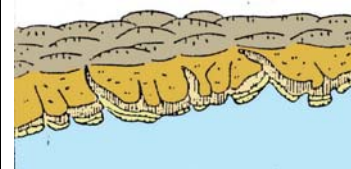

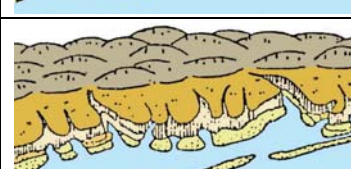






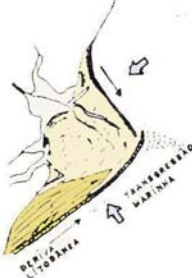



Figura 1-Fases de progradação deltáica do rio Paraíba do Sul (modificado por Lamego, 1955).

Quadro 1-Esquema de evolução do complexo deltaico do rio Paraíba do Sul (Segundo, Martin *et al.*, 1983,1984)

Fases de evolução	Descrição evolutiva	Esquema evolutivo
A	Clima semi-árido, nível relativo do mar abaixo do atual e deposição de sedimentos da Formação Barreiras.	
B	Subida relativa do nível do mar impede a sedimentação da Formação Barreiras demarcando por vales entalhados, e formando uma linha de falésias.	
C	Regressão marinha, dá início à formação de depósitos de leques aluviais incostados nas falésias esculpidas na Formação Barreiras.	
D	Máximo da penúltima transgressão marinha (123.000 A .P.), erode as planícies costeiras depositadas anteriormente. Os vales fluviais são afogados e originam lagunas e estuários.	
E	Fase de regressão marinha permite a construção da planície costeira pleistocência progradante.	
F	Corresponde ao máximo da última transgressão marinha (7.000 a 5.100 A. P.), provoca a erosão dos terraços arenosos pleistocênicos e inicia-se a formação de lagunas e ilhas – barreira.	 5.100 ANOS B.P.
G	Construção de deltas intralagunares provoca o assoreamento das lagunas.	
H	Inicia-se a construção dos terraços marinhos holocênicos e a transformação das lagunas em lagos e lagoas, devido a inserção de água salgada na fase anterior.	 APÓS 5.100 B.P.

Quadro 2-Esquema de evolução para a região de Lagoa Feia e complexo deltaico do rio Paraíba do Sul (Silva, 1987).

Fases de evolução	Descrição evolutiva	Esquema evolutivo
A	Transgressão provoca o afogamento e erosão parcial da Formação Barreiras	
B	Regressão permite a formação de cristas de praia paralelas à orientação das paleofalésias da Formação Barreiras	
C	Transgressão marinha (120.000 anos A.P.) provoca o truncamento das cristas de praia formadas anteriormente	
D	Regressão marinha (15.000 anos A.P.), inicia-se a formação de um novo sistema de cristas de praia remanescente da Lagoa Feia, que truncou o sistema de cristas de praia formado na fase B.	
E	Última transgressão holocênica (5.000 anos A.P.) provocou o afogamento de grande parte das planícies de cristas arenosas formadas na fase D, individualizou uma extensa laguna que originou a Lagoa Feia. Ocorreu a mudança na orientação do rio Paraíba do Sul para a posição atual.	
F	A fase atual é caracterizada pelo assoreamento progressivo da Lagoa por sedimentação fluvial, e como conseqüência a formação de deltas intralagunares.	

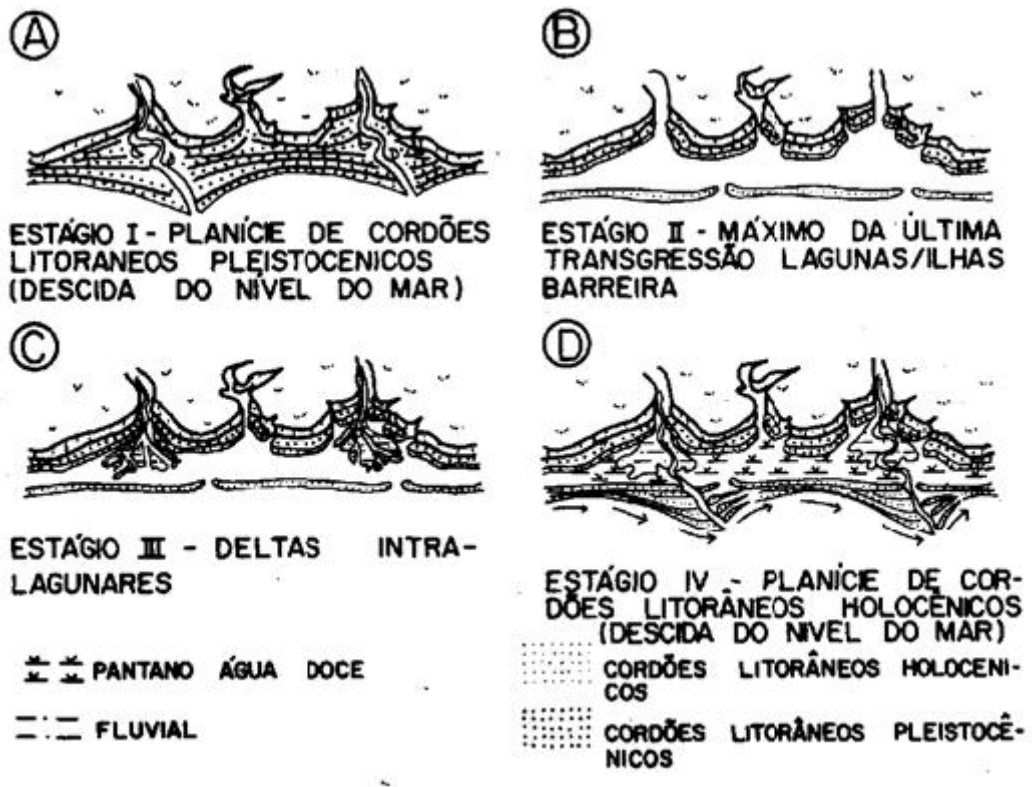


Figura 2-Esquema evolutivo, durante os últimos 120 ka das planícies de cordões litorâneos associadas às desembocaduras dos Rios São Francisco, Jequitinhonha, Doce e Paraíba do Sul (segundo Dominguez, 1990).

Apêndice D – Estampa de ilustração do testemunho

ESTAMPA I

(1)-Aspecto da amostra 1 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 34.50 metros de profundidade. Observar a presença de arenito muito fino inferior argiloso, bem selecionado, com marca de raiz ao longo das lâminas. (Escala natural)

(2)-Aspecto da amostra 2 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 41.00 metros de profundidade. Observar a presença de arenito fino inferior argiloso, muito mal selecionado com grânulos ao longo das lâminas. (Escala natural)

(3)-Aspecto da amostra 3 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 43,30 metros de profundidade. Observar a presença arenito fino, argiloso moderadamente selecionado, com fragmentos de concha ao longo das lâminas. (Escala natural)

(4)-Aspecto da amostra 4 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 54,60 metros de profundidade. Observar a presença areia média superior, mal selecionada com grânulos de quartzo ao longo das lâminas. (Escala natural)

(5)-Aspecto da amostra 5 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 83,50metrosde profundidade. Observar a presença arenito conglomerático ao longo das lâminas. (Escala natural)

ESTAMPA II

(6)-Aspecto da amostra 6 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 92-95.00 metros de profundidade. Observar a presença arenito muito fino, mal selecionado, com granulometria variando de muito fino a médio superior/ grosso ao longo das lâminas. (Escala natural)

(7)-Aspecto da amostra 11 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 110.10 metros de profundidade. Observar a presença de argilito variegado ao longo das lâminas. (Escala natural)

(8)-Aspecto da amostra 12 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 112.10 metros de profundidade. Observar a presença arenito muito fino superior cimentado, mal selecionado ao longo das lâminas. (Escala natural)

(9)-Aspecto da amostra 13 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 164.30 metros de profundidade. Observar a presença de areia fina, com seleção moderada ao longo das lâminas. (Escala natural)

(10)-Aspecto da amostra 14 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 169,45 metros de profundidade. Observar a presença de areia fina superior a média, mal selecionado ao longo das lâminas. (Escala natural)

ESTAMPA I

(1)-Aspecto da amostra 1 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 34,50 metros de profundidade. Observar a presença de arenito muito fino inferior, bem selecionado, com marca de raiz ao longo das lâminas. (Escala natural)

(2)-Aspecto da amostra 2 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 41,00 metros de profundidade. Observar a presença de arenito fino inferior, muito mal selecionado com grânulos ao longo das lâminas. (Escala natural)

(3)-Aspecto da amostra 3 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 43,30 metros de profundidade. Observar a presença arenito fino, moderadamente selecionado, com fragmentos de concha ao longo das lâminas. (Escala natural)

(4)-Aspecto da amostra 4 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 54,60 metros de profundidade. Observar a presença areia média superior, mal selecionada com grânulos de quartzo ao longo das lâminas. (Escala natural)

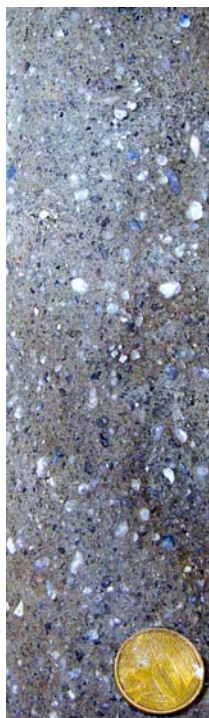
(5)-Aspecto da amostra 5 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 83,50 metros de profundidade. Observar a presença arenito conglomerático ao longo das lâminas. (Escala natural)

ESTAMPA I

1



2



3



4



5



ESTAMPA II

(6)-Aspecto da amostra 6 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 92-95.00 metros de profundidade. Observar a presença arenito muito fino, mal selecionado, com granulometria variando de muito fino a médio superior/ grosso ao longo das lâminas. (Escala natural)

(7)-Aspecto da amostra 11 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 110.10 metros de profundidade. Observar a presença de argilite variegado ao longo das lâminas. (Escala natural)

(8)-Aspecto da amostra 12 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 112.10 metros de profundidade. Observar a presença arenito muito fino superior cimentado, mal selecionado ao longo das lâminas. (Escala natural)

(9)-Aspecto da amostra 13 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 164.30 metros de profundidade. Observar a presença de areia fina, com seleção moderada ao longo das lâminas. (Escala natural)

(10)-Aspecto da amostra 14 em testemunho, no poço Canyon 1 - RJ, a 169,45 metros de profundidade. Observar a presença de areia fina superior a média, mal selecionado ao longo das lâminas. (Escala natural)

ESTAMPA II

6



7



8



9



10



Apêndice E

Estampas de fotomicrografia de lâminas dos cordões arenosos e do testemunho.

Estampa I

- (1)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) dos grãos de quartzo, feldspato muito alterado e alterito nos cordões arenosos.
- (2)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) dos grãos de quartzo, feldspato muito alterado e alterito nos cordões arenosos.
- (3)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) do oólito de hematita, concreções ferruginosas em 54,20 metros de profundidade.
- (4)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) do oólito de hematita, concreções ferruginosas em 54,20 metros de profundidade.
- (5)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) da bioturbação em 107,35 metros de profundidade.
- (6)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) da bioturbação em 107,35 metros de profundidade.
- (7)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) do feldspato (Miroclina) com forma euédrica. 107,35 metros de profundidade.
- (9)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) do feldspato (Miroclina) com forma euédrica. 107,35 metros de profundidade.

Estampa II

- (10)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de algas marinhas na profundidade de 18,90 metros.
- (11)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de algas marinhas na profundidade de 18,90 metros.
- (12)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de moluscos na profundidade de 18,90 metros.
- (13)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de moluscos na profundidade de 18,90 metros.
- (14)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de algas marinhas e ostracodes em 32,70 metros de profundidade.
- (15)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de algas marinhas e ostracodes em 32,70 metros de profundidade.
- (16)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de foraminífero e algas marinhas na profundidade de 32,70 metros.
- (17)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de foraminífero e algas marinhas na profundidade de 32,70 metros.
- (18)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de algas marinhas e gastrópodes na profundidade de 18,90 metros.
- (19)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de algas marinhas e gastrópodes na profundidade de 18,90 metros.

Estampa I

(1)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) dos grãos de quartzo, feldspato muito alterado e alterito nos cordões arenosos.

(2)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) dos grãos de quartzo, feldspato muito alterado e alterito nos cordões arenosos.

(3)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) do oólito de hematita, concreções ferruginosas em 54,20 metros de profundidade.

(4)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) do oólito de hematita, concreções ferruginosas em 54,20 metros de profundidade.

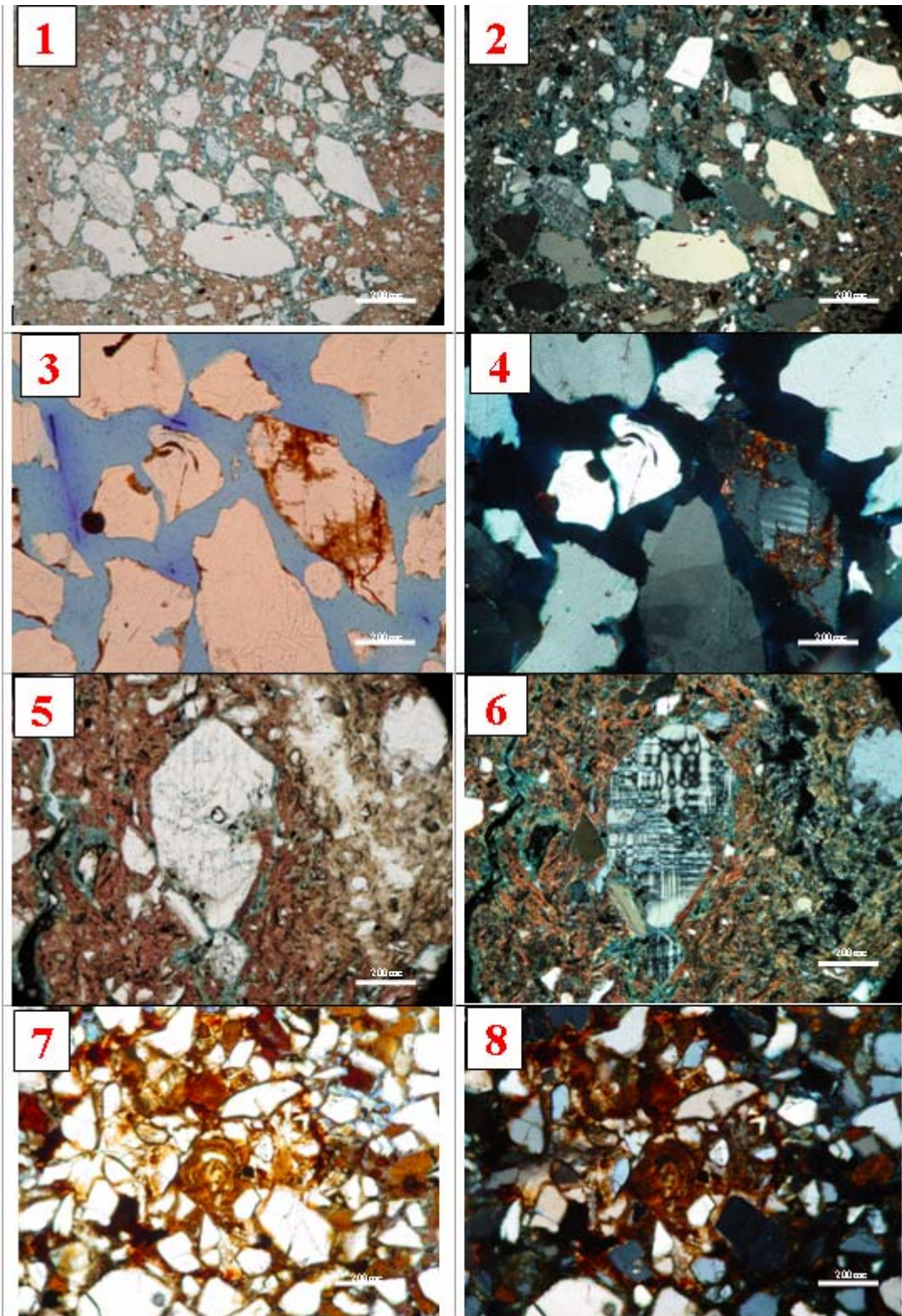
(5)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) da bioturbação em 107,35 metros de profundidade.

(6)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) da bioturbação em 107,35 metros de profundidade.

(7)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) do feldspato (Miroclina) com forma euédrica. 107,35 metros de profundidade.

(8)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) do feldspato (Miroclina) com forma euédrica. 107,35 metros de profundidade.

Estampa I



Estampa II

(9)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de algas marinhas na profundidade de 18,90 metros.

(10)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de algas marinhas na profundidade de 18,90 metros.

(11)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de moluscos na profundidade de 18,90 metros.

(12)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de moluscos na profundidade de 18,90 metros.

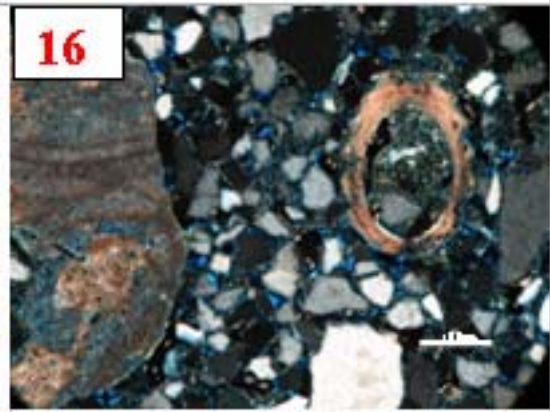
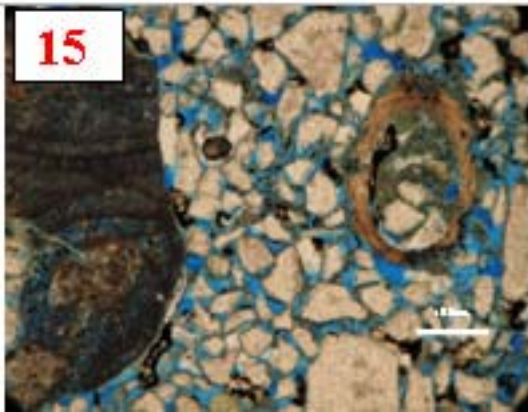
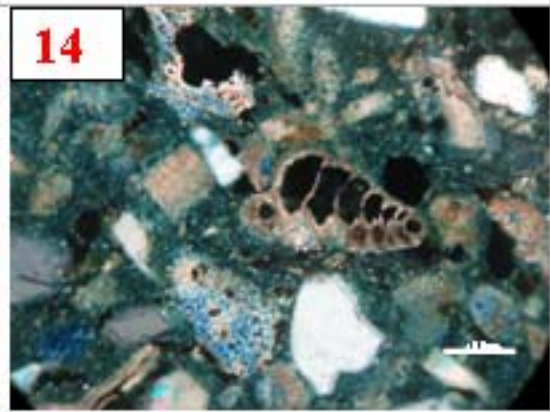
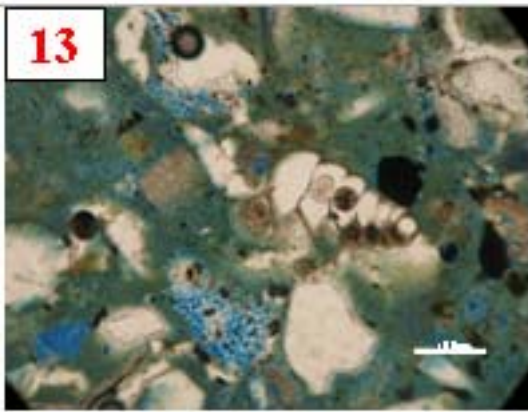
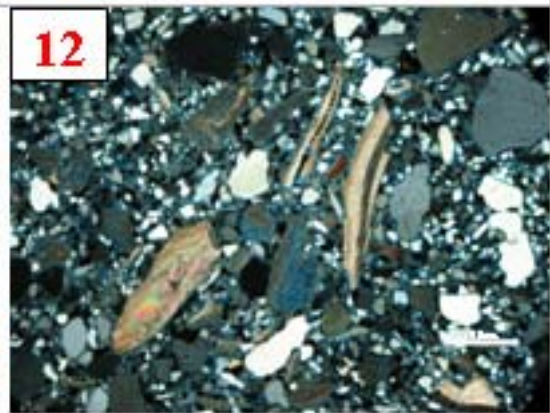
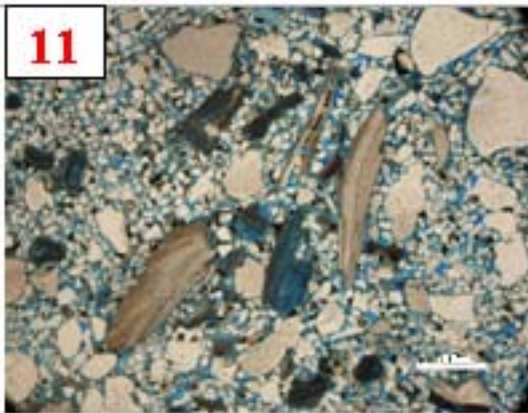
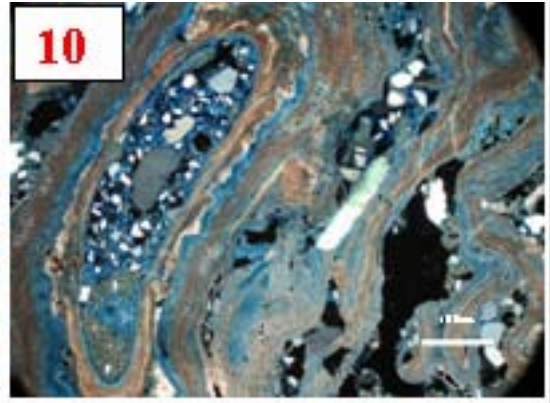
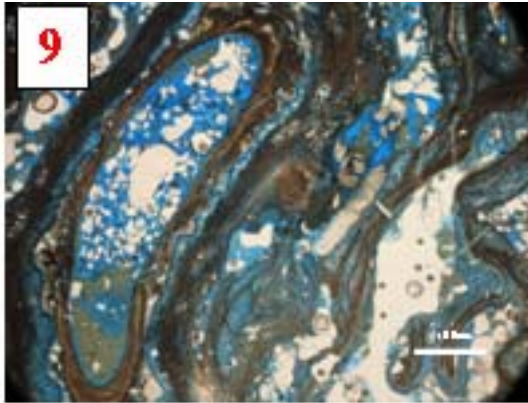
(13)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de foraminífero e algas marinhas na profundidade de 32,70 metros.

(14)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de foraminífero e algas marinhas na profundidade de 32,70 metros.

(15)-Fotomicrografia (nicóis paralelos) de algas marinhas e gastrópodes em 32,70 metros de profundidade.

(16)-Fotomicrografia (nicóis cruzados) de algas marinhas e gastrópodes na profundidade de 18,90 metros.

Estampa II



Anexo

Um fluxo de trabalho para a modelagem de eletrofácies com entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada (Soares, 2005)



Um fluxo de trabalho para modelagem de eletrofácies com entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada.

José Agnelo Soares (agnelo@geologia.ufrj.br) - Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper presents a workflow to build logfacies models which is based on the interlaced application of non-supervised and supervised statistical techniques. The workflow allows answering, in an interactive manner, some basic issues which appear in any logfacies modeling program: How many facies may be recognized? Which is the best log suite to be used in? How the generated logfacies correlate with the original lithofacies? Due to the interactive process between supervised and non-supervised techniques, the proposed workflow is biased to produce a fewer number of logfacies than the number of original lithofacies, but those logfacies tend to correspond to, in a physical properties sense, those most representative lithofacies. A main feature of this workflow is the adoption of the logfacies column provided by a non-supervised classification algorithm as the input column of facies for a supervised classification procedure. This feature warrants that the recognized logfacies suite is the best possible, in terms of log physical properties and lithofacies reproduction. Finally, it is shown a real case where this workflow was applied successfully.

Introdução

A modelagem de eletrofácies pode ser definida como a tentativa de reconhecimento da coluna faciológica de um poço a partir dos perfis geofísicos desse poço. Trata-se de uma importante atividade que permite a construção do modelo geológico da área, mesmo na ausência de testemunhos contínuos na maioria dos poços. Basicamente três famílias de técnicas têm sido utilizadas com o objetivo de reconhecer eletrofácies: as técnicas estatísticas, as redes neurais, a regra *fuzzy*, ou ainda combinações destas.

Este trabalho trata apenas da aplicação de um conjunto de técnicas estatísticas, regularmente usadas para a classificação supervisionada (Tatsuoka, 1971) ou não-supervisionada (Massart & Kaufman, 1983), com o objetivo de reconhecimento das fácies geológicas atravessadas por poços a partir dos perfis geofísicos. Na modelagem de eletrofácies, classificação supervisionada é aquela feita com base na geração de uma regra de reconhecimento de fácies obtida em um intervalo de poço para o qual já se conhece a descrição faciológica de testemunho (lithofácies). Por outro lado, a classificação

não-supervisionada é aquela realizada puramente com base na separação dos grupos de amostras com padrões semelhantes em termos das variáveis classificatórias (no caso, os perfis geofísicos dos poços).

Entre os métodos de classificação não-supervisionada estão *Average Linkage*, *Centróide* e *K-means*. Os dois primeiros são baseados na distância entre amostras no espaço n -dimensional, onde n é o número de perfis utilizado. O *Average Linkage* constrói os grupos de acordo com as menores distâncias entre todos os pares possíveis de amostras da população. Esta característica o torna sensível a possíveis valores anômalos. O método *Centróide*, por sua vez, define os grupos com base na distância (no espaço n -dimensional) entre os centros, ou valores médios, de cada nuvem de amostras, o que o torna um método mais robusto à presença de valores anômalos. Já o método *K-means*, que somente pode ser usado quando já se conhece o número K de grupos (ou eletrofácies) que se deseja modelar, age da seguinte maneira: inicialmente, gera K grupos formados aleatoriamente pelas amostras dos perfis, a seguir esse método reorganiza a composição de cada grupo de modo a minimizar a variabilidade interna de cada grupo e maximizar a variabilidade entre grupos.

Pode-se associar, a alguns métodos de classificação não-supervisionada, algumas estatísticas que permitem, com base nos dados disponíveis, estimar o número ideal de fácies a reconhecer. Estas estatísticas são as funções *Pseudo-F*, *Pseudo-t²* e *Cubic Clustering Criterion (CCC)*. Além disso, pode-se avaliar a composição de cada grupo através de um diagrama em árvore.

Os métodos de classificação supervisionada incluem os chamados métodos paramétricos, que são aqueles para os quais se assume que as distribuições das variáveis obedecem a uma função distribuição conhecida (como funções multinormais, por exemplo), e os métodos não-paramétricos, para os quais essa restrição não se aplica. Os métodos paramétricos incluem a Regra Discriminante Linear (RDL) e a Regra Discriminante Quadrática (RDQ). Já os métodos não-paramétricos incluem, entre outros, os métodos da regra discriminante passo-a-passo, *K-nearest neighbor (KNN)*, e regra discriminante canônica. A regra discriminante linear passo-a-passo permite ordenar os vários perfis disponíveis segundo uma ordem decrescente de poder discriminante. Essa característica torna esse método uma ferramenta muito adequada para utilização na fase inicial do trabalho de modelagem de eletrofácies, quando da escolha dos perfis a serem usados no trabalho. O método KNN se baseia na adoção do rótulo que aparece mais vezes entre os K vizinhos mais próximos, no espaço n -dimensional, segundo a métrica adotada. Já o método da regra canônica consiste num método de redução de dimensão, onde se procura obter algumas variáveis canônicas, pela combinação

linear das variáveis originais, mas não correlacionadas entre si, que juntas, maximizem o poder de discriminação entre fácies.

O fluxo de trabalho

Um fluxograma da estratégia proposta para a modelagem de eletrofácies é apresentado na Figura 1. A primeira operação é constituída pela edição dos dados, que corresponde à preparação do arquivo em colunas, retirada das amostras com dados faltantes, e incorporação da coluna de litofácies, quando disponível.

A seguir os dados passam pela etapa de transformação e padronização das variáveis. Alguns perfis, como é caso dos perfis de resistividade elétrica, variam os valores registrados muito rapidamente, o que normalmente exige uma escala logarítmica para a sua apresentação. Nesses casos recomenda-se aplicar alguma função de transformação para essas variáveis, de modo que as variáveis transformadas tenham um comportamento aproximadamente linear. Para os perfis de resistividade, pode-se aplicar a seguinte transformação:

$$\Omega' = \log_{10}(\Omega + 1) \quad (1)$$

onde Ω é valor original do perfil de resistividade e Ω' é o valor transformado de resistividade.

A padronização é recomendada para todas as variáveis, uma vez que ela deixa todos os perfis com média nula e desvio padrão unitário, fazendo com que todas as variáveis estejam numa mesma escala de valores. O processo de padronização ajuda, inclusive, na interpretação dos coeficientes da regra discriminante, identificando rápida e claramente o poder discriminante relativo de cada perfil. A padronização é dada por

$$x_i' = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (2)$$

onde x_i é valor da i -ésima amostra do perfil, \bar{X} é o valor médio do perfil, e σ é o desvio padrão do perfil.

Conforme a Figura 1, os dados devem ser separados em três conjuntos: um conjunto para treinamento da regra, outro para validação, e um terceiro para predição, ou seja, para o reconhecimento propriamente dito das fácies. A proporção de dados em cada um desses conjuntos pode ser bastante variável, pois depende em muito do quão complexa é a geologia local, da suíte disponível de perfis geofísicos, e da quantidade e representatividade das fácies a reconhecer. De modo geral, costuma-se usar cerca de 30% dos dados para treinamento, 10% a 20% para validação e o restante para a fase de predição. É importante ressaltar que, para a estratégia de classificação aqui apresentada, os dados de treinamento e de validação incluem a descrição de litofácies. Esta exigência não se aplica aos dados de predição.

Com o conjunto de dados de treinamento, procede-se à fase de geração da regra discriminante. É nesta fase que se recomenda que sejam usadas, de forma entrelaçada, as técnicas de classificação supervisionada e não-

supervisionada. Essa estratégia permite responder a algumas questões fundamentais como:

1. Para reconhecer as fácies que desejo, dentre os perfis que disponho, quais deles devo usar? Nem sempre usar todos os perfis resulta no melhor reconhecimento de fácies, pois às vezes adicionar mais uma curva não significa agregar informação útil, mas apenas aumentar o ruído do sistema.
2. Qual o número de fácies que meus perfis podem reconhecer? Em geral, os perfis reconhecem um número de fácies muito menor que aquele reconhecido pelo geólogo responsável pela descrição dos testemunhos.
3. E finalmente, qual a relação entre as eletrofácies reconhecidas e as litofácies descritas pelo geólogo?

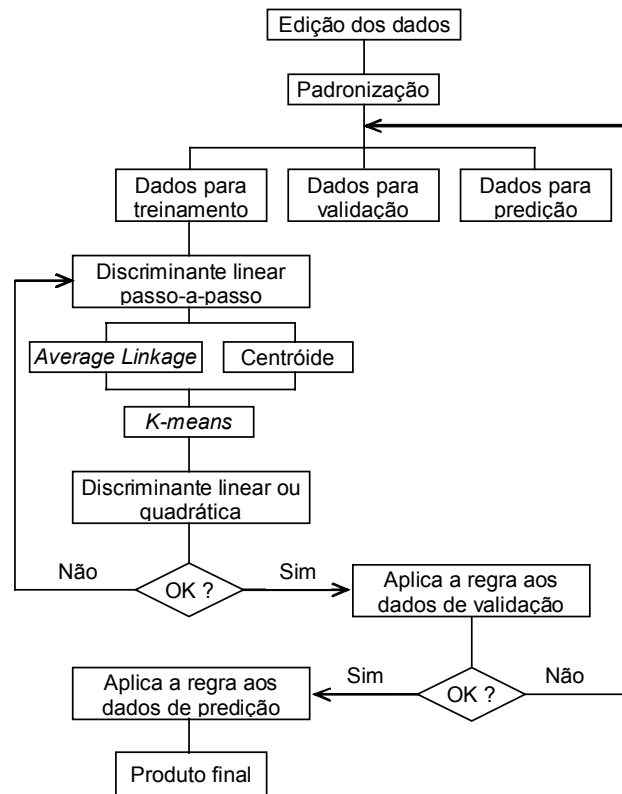


Figura 1 – Fluxograma para modelagem de eletrofácies através do uso entrelaçado de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada.

Com o objetivo de determinar a melhor suíte de perfis, dentre aqueles disponíveis, aplica-se, inicialmente, a regra discriminante linear passo-a-passo nos dados de treinamento. Essa técnica de classificação supervisionada enumera, em ordem decrescente de prioridade, os perfis com maior poder discriminante e, adicionalmente, exclui do modelo aqueles perfis que contribuíam de forma negativa para o reconhecimento das fácies pretendidas. Nesta etapa as fácies a reconhecer ainda são as litofácies originais, descritas diretamente da observação dos testemunhos.

A seguir, com o objetivo de definir o número ideal de fácies a reconhecer, procede-se à aplicação, em paralelo, dos procedimentos de classificação não-supervisionada *Average Linkage* e Centróide sobre o conjunto de dados de treinamento, desta vez desprezando o conhecimento prévio das litofácies. Com o suporte dos gráficos das estatísticas *Pseudo-F*, *Pseudo-t²* e CCC, define-se o número ideal de fácies a reconhecer. As figuras 2, 3 e 4 apresentam exemplos de saídas gráficas para essas estatísticas.

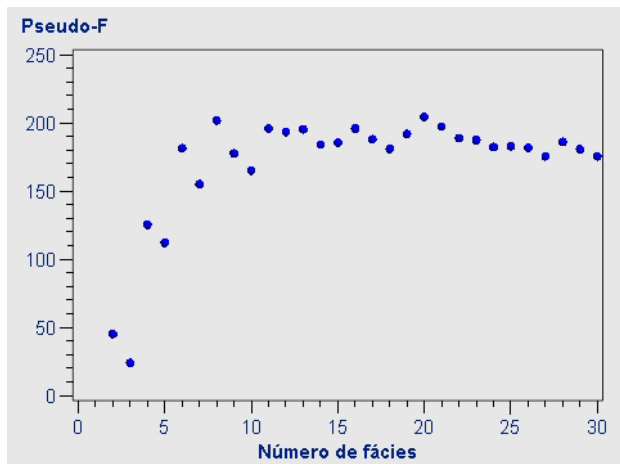


Figura 2 – Estatística *Pseudo-F* contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

O gráfico da estatística *Pseudo-F* indica bons números de grupos quando essa estatística apresenta valores elevados. Assim, para o caso da Figura 2, vemos que 4 ou 6 fácies seriam, de acordo com a estatística *Pseudo-F*, bons números de fácies para se tentar identificar. Quantidades muito altas (como 10, por exemplo) ou muito baixas de fácies (como 2, por exemplo) não são desejáveis para a modelagem de eletrofácies.

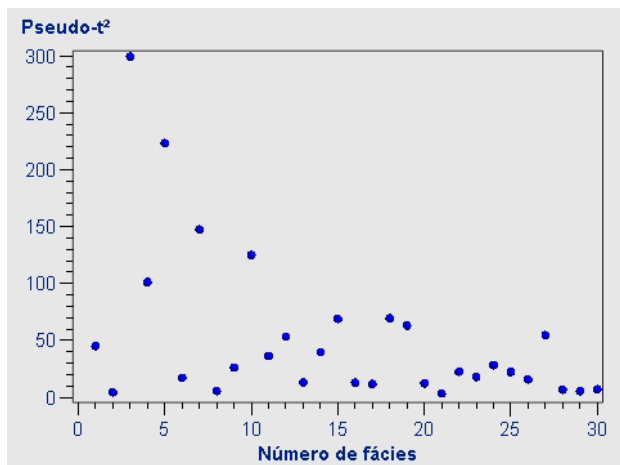


Figura 3 – Estatística *Pseudo-t²* contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

O gráfico da estatística *Pseudo-t²* apresenta valores altos para os números de fácies imediatamente anteriores aos ideais. Para o caso da Figura 3, cujos dados processados

são os mesmos utilizados na Figura 2, os bons números de fácies seriam, novamente, 4 ou 6.

No caso da estatística CCC, valores positivos maiores que 2 ou 3 são indicativos de bons números de fácies, valores entre 0 e 2 indicam valores potenciais de número de fácies, enquanto que valores negativos elevados são indicativos da presença de valores anômalos. No caso dos dados da Figura 4, que são os mesmos das figuras 2 e 3, um bom número de fácies seria 6.

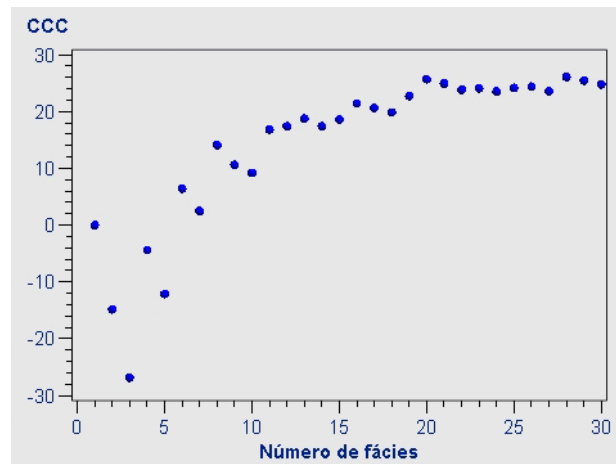


Figura 4 – Estatística CCC contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

Considerando a intersecção entre os valores indicados pelas três estatísticas, pode-se então considerar que 4 ou 6 seriam os números mais indicados de fácies a reconhecer, nesse caso. O intérprete deve então decidir qual número de fácies considerar, dentre aqueles indicados nesta última etapa. Considerar quatro fácies provavelmente significa reconhecer uma fácies não-reservatório e mais três fácies portadoras de distintos níveis de potencialidade para reservatório. Por outro lado, considerar 6 fácies talvez seja excessivamente detalhado para a modelagem de fluxo. Adotar qualquer outro número de fácies, no entanto, provavelmente resultaria numa precisão menor de predição.

Uma vez definido o número de fácies a reconhecer, deve-se proceder a uma classificação não-supervisionada segundo o método *K-means*. Vale a pena lembrar que as fácies agora reconhecidas não são mais as fácies originais, resultantes da descrição dos testemunhos, mas são fácies compostas, as quais rigorosamente somente podem ser definidas em termos das suas propriedades físicas. Felizmente, o procedimento aqui adotado garante algum nível de correlação entre as principais litofácies e algumas das fácies compostas preditas. Quanto às litofácies de menor representatividade, essas tendem a sofrer um processo de pulverização entre as diversas fácies compostas.

A comparação entre a coluna de fácies compostas e a coluna original de litofácies, mostra que a primeira corresponde à segunda com algum grau de suavização. A perda de detalhes não representa, necessariamente, um fator negativo, desde que as feições significativas

sejam preservadas. Qualquer resultado experimental, inclusive a descrição de testemunhos, está sujeita à presença de ruídos indesejáveis. Ao captar prioritariamente as fácies mais marcantes, esse método de geração de fácies compostas exclui, em algum grau, esses ruídos. Além disto, este fenômeno representa uma mudança de escala (*upscaling*) desejável para as modelagens geológica e de fluxo, etapas posteriores à modelagem de eletrofácies.

Assim, uma característica fundamental deste fluxo de trabalho é a adoção da coluna de fácies compostas como sendo representativa da coluna original de litofácies. É essa coluna de fácies compostas que será utilizada, na etapa seguinte, para gerar a regra discriminante a qual será finalmente utilizada para a modelagem definitiva das eletrofácies.

A próxima etapa consiste na geração da regra discriminante que será doravante utilizada em todas as demais etapas do trabalho de modelagem de eletrofácies. Para isto, a coluna de fácies resultante da classificação não-supervisionada pela técnica *K-means* é dada como dado de entrada para a classificação supervisionada pela RDL ou RDQ. Os resultados desta etapa são a regra discriminante propriamente dita e uma nova classificação de eletrofácies, agora baseada na regra gerada. Neste ponto deve-se avaliar a eficiência do processo examinando se a coluna de fácies gerada pela regra respeita as principais feições da coluna litológica original. Em caso negativo, deve-se refazer o processo a partir da aplicação da regra discriminante passo-a-passo, escolhendo melhor os perfis a utilizar, revendo o número ideal de fácies a modelar e reavaliando o uso da RDL ou da RDQ. Em caso positivo, o processo evolui para a aplicação da regra gerada nos dados de validação.

Após submeter os dados de validação à classificação segundo a regra discriminante gerada, deve-se avaliar novamente o processo. Uma vez que a regra discriminante utilizada foi gerada usando apenas os dados de treinamento, aplicá-la aos dados de validação pode resultar numa classificação errônea, mas isto somente acontecerá se houver uma grande variação das características litológicas ou das propriedades físicas dos tipos litológicos entre os dois conjuntos de dados. Obviamente, nesse caso não se pode extrapolar a regra obtida com os dados de treinamento para outros conjuntos dados e a solução seria redistribuir os dados entre os três conjuntos de dados (treinamento, validação e predição) de forma mais representativa. Para evitar esse tipo de problema, recomenda-se que, antes de começar o trabalho de modelagem de eletrofácies, seja feita uma pesquisa exploratória nos dados, observando quais litofácies estão presentes em quais poços, quais perfis estão disponíveis em quais poços, quais poços possuem descrição de litofácies e como se distribuem as variáveis nos diversos poços. Como resultado dessa pesquisa exploratória de dados, o conjunto de dados de treinamento poderá ser escolhido de forma mais representativa, fazendo com que a aplicação da regra aos dados de validação atinja resultados satisfatórios.

A escolha dos dados de validação deve procurar obedecer a um critério de representatividade espacial, ou

seja, os poços de validação devem ser escolhidos de tal forma que os poços de predição estejam inscritos dentro de um polígono definido pelos poços de validação.

Uma vez aceita a classificação dos dados de validação, segundo a regra discriminante gerada com os dados de treinamento, pode-se então proceder à classificação definitiva dos dados do conjunto de predição. Após essa última etapa, todas as classificações, segundo a regra discriminante (RDL ou RDQ) utilizada, compõem o produto final que é a modelagem de eletrofácies para o campo.

Estudo de caso

A fim de exemplificar a modelagem de eletrofácies, conforme o fluxo de trabalho proposto neste trabalho, serão apresentados, a seguir, os resultados obtidos sobre os dados referentes a quatro poços de um determinado campo produtor de petróleo. Para cada um dos quatro poços, foram disponibilizados os perfis geofísicos de raios gama (GR), resistividade profunda por indução (ILD), porosidade de nêutrons (NPHI), densidade (RHOB), além da descrição faciológica dos testemunhos (coluna de litofácies).

Com o objetivo de reproduzir todas as etapas do fluxo de trabalho apresentado na Figura 1, os dados foram divididos da seguinte maneira: os dados do poço 1 foram utilizados como conjunto de treinamento, os dados do poço 2 foram considerados como de validação, e os dados dos poços 3 e 4 foram usados para predição. Dessa forma, apenas para o poço 1 a coluna de litofácies foi utilizada como dado de entrada para o processo de modelagem de eletrofácies. Para os demais poços a coluna de litofácies foi usada apenas como um controle de qualidade para a coluna de eletrofácies gerada.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o poço 1, o qual forneceu os dados de treinamento ou, em outras palavras, de geração da regra discriminante. Esta figura contém cinco colunas que, da esquerda para a direita, representam as seguintes variáveis: coluna de litofácies, coluna de indicação da presença de hidrocarbonetos, coluna de indicação de cimentação, coluna de eletrofácies resultante da classificação não-supervisionada pelo algoritmo *K-means*, e coluna de probabilidade de eletrofácies resultante da classificação supervisionada pela regra discriminante gerada com os dados do poço 1.

As eletrofácies das Figuras 5 a 8, identificadas por cores, são definidas em termos das suas propriedades físicas padronizadas médias, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Média e desvio-padrão das propriedades padronizadas de perfil das eletrofácies dos quatro poços.

Fácies	GR _p	ILD _p	NPHI _p	RHOB _p
Amarela	-1,2 ± 0,2	1,9 ± 0,9	-1,7 ± 0,4	1,1 ± 0,7
Laranja	-0,6 ± 0,5	0,2 ± 0,7	-0,5 ± 0,5	0,3 ± 0,8
Vermelha	1,0 ± 0,8	-1,0 ± 0,2	1,6 ± 0,8	-3,4 ± 1,1
Verde	0,9 ± 0,7	-0,6 ± 0,5	0,8 ± 0,4	-0,4 ± 0,7

Das propriedades médias padronizadas descritas na Tabela 1, vê-se que as fácies amarela e laranja são as melhores fácies-reservatório, a fácies verde corresponde a rochas pelíticas (não-reservatório) e a fácies vermelha é, em geral, uma fácies argilosa de qualidade inferior como rocha-reservatório.

poços. Além disso, foram reconhecidas quatro eletrofácies, sendo três de rochas-reservatório e uma de rochas não-reservatório, todas definidas em termos das propriedades físicas médias registradas pelos perfis geofísicos dos poços.

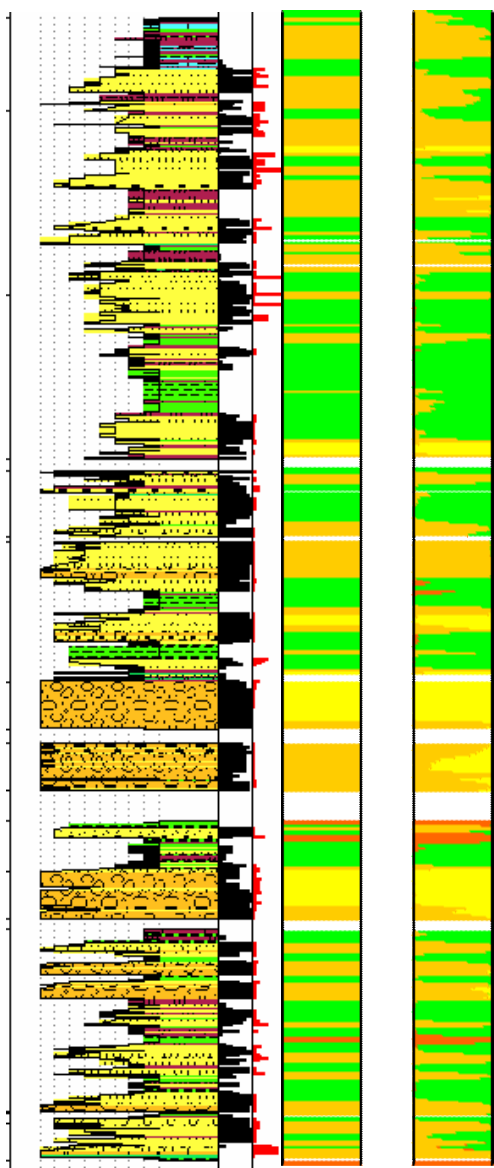


Figura 5 – Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, eletrofácies por classificação não-supervisionada e eletrofácies por classificação supervisionada para o Poço 1 (dados de treinamento).

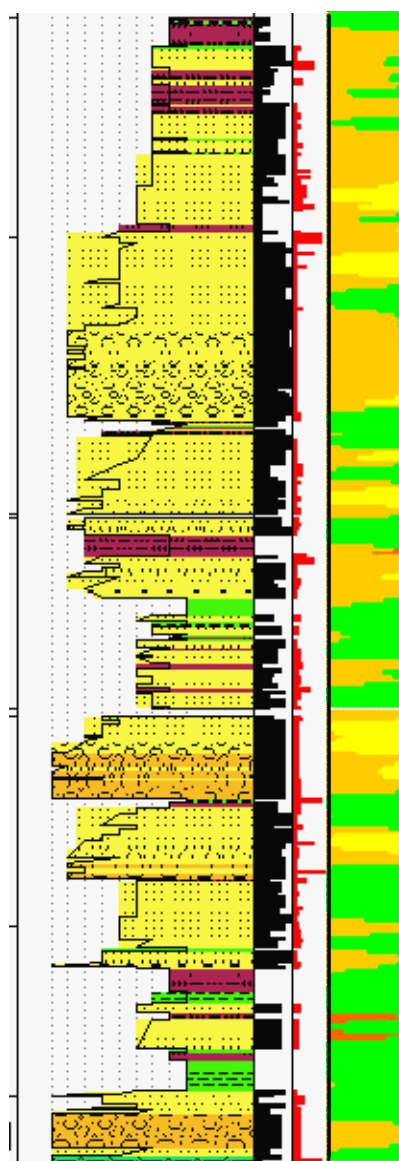


Figura 6 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 2. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

Discussão

A comparação entre a coluna de probabilidade de classificação de fácies, de cada um dos poços, com a correspondente coluna de litofácies, mostra que as eletrofácies reconhecidas nos Poços 1, 2, 3 e 4, apesar de geradas através de uma regra discriminante definida apenas com dados do Poço 1, reproduzem, na grande maioria das vezes, as litofácies de cada um desses

Deve-se abrir uma discussão a respeito da conveniência de se fazer a padronização dos perfis de modo separado para cada poço, como foi feito neste exemplo, ou se a padronização deve ser feita de uma só vez para todos os poços. Quando uma mesma fácies, em poços diferentes, possui propriedades distintas, é preferível fazer a padronização de forma separada para cada poço. Já quando há falta de alguma fácies, em algum dos poços, deve-se padronizar todos os poços de uma só vez.

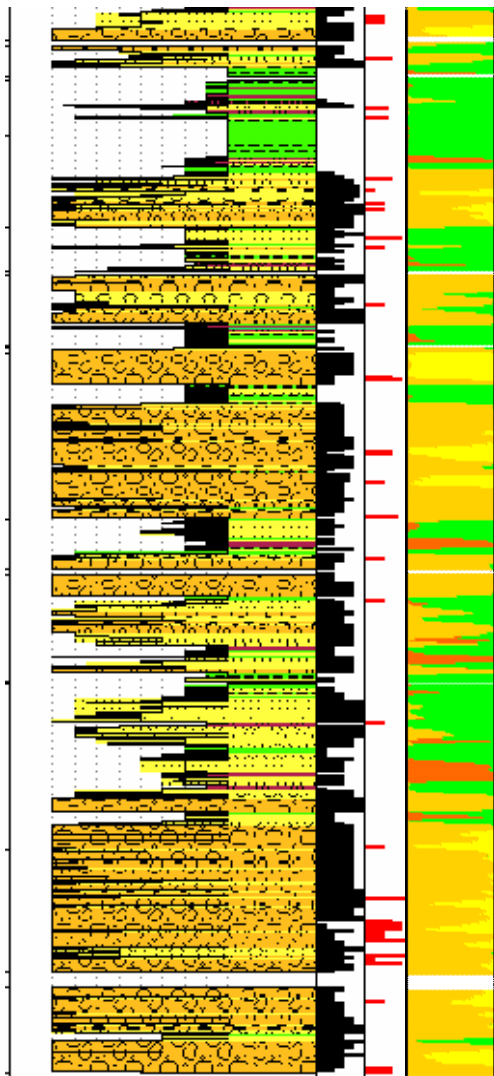


Figura 7 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 3. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

Conclusões

A modelagem de eletrofácies com entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada permite reconhecer de forma adequada as principais fácies, segundo as suas propriedades físicas. A estratégia adotada reduz, em geral, o número de fácies em comparação com o número de fácies originais. Isto funciona como uma espécie de filtro, preservando apenas as fácies mais representativas, o que, do ponto de vista da construção dos modelos geológico e de fluxo de fluidos, é uma característica desejável, pois trabalha favoravelmente ao *upscaling* exigido naquelas etapas posteriores da engenharia de reservatórios. O fluxo de trabalho proposto permite também definir o número ideal de fácies a reconhecer, qual a melhor suíte de perfis a utilizar, dentre todos os perfis disponíveis, e qual a relação entre as eletrofácies encontradas e as litofácies originais.

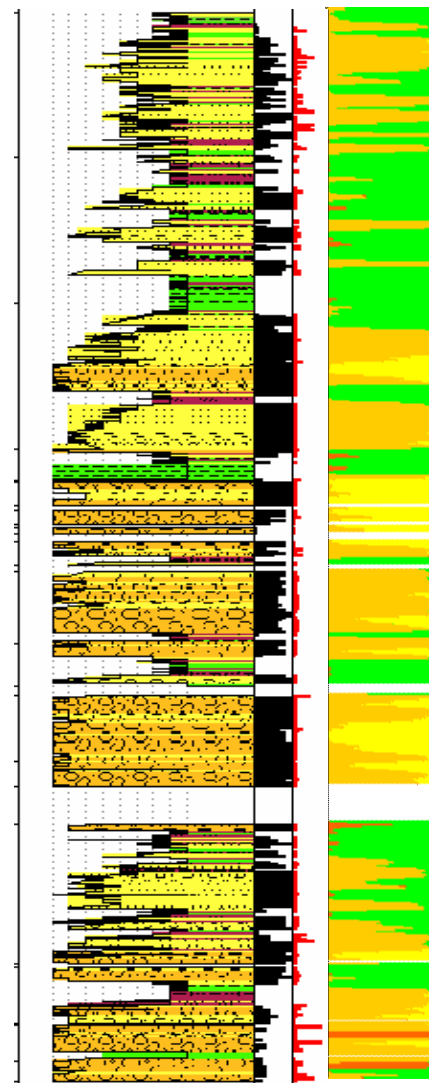


Figura 8 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 4. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

Agradecimentos

O autor agradece a PETROBRAS e FINEP pelo financiamento do Projeto CTPETRO Perfil, que possibilitou a execução deste trabalho. Agradece ainda às inúmeras colaborações dos professores Cláudio Bettini e João Ismael, da UFRJ, e da geóloga Maria do Socorro de Souza, do Centro de Pesquisas da Petrobras.

Referências

- Massart, D.L. and Kaufman, L. (1983)** *The Interpretation of Analytical Chemical Data by the Use of Cluster Analysis*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Tatsuoka, M.M. (1971)** *Multivariate Analysis*, New York: John Wiley & Sons, Inc.