



UFRJ

Guilherme Castro Martins Costa

**MODELAGEM DE ELETROFÁCIES DO INTERVALO CRETÁCEO
SUPERIOR DE UM POÇO DA BACIA DE SANTOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)**



UFRJ

Guilherme Castro Martins Costa

**MODELAGEM DE ELETROFÁCIES DO INTERVALO CRETÁCEO SUPERIOR DE
UM POÇO DA BACIA DE SANTOS**

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

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Charles George Kepinski Young

Rio de Janeiro
Outubro de 2008

Costa, Guilherme Castro Martins

Modelagem de eletrofácies do intervalo Cretáceo Superior de um poço da bacia de Santos

Guilherme Castro Martins Costa - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2008.

xiii, 27 p.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2008.

Orientadores: Leonardo Fonseca Borghi de Almeida e Charles George Kepinski Young

1. Geologia. 2. Setor da Graduação – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida (UFRJ). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências.

Guilherme Castro Martins Costa

**MODELAGEM DE ELETROFÁCIES DO INTERVALO CRETÁCEO SUPERIOR DE
UM POÇO DA BACIA DE SANTOS**

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

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Charles George Kepinski Young

Aprovada em:

Por:

Prof. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida (UFRJ)

Geól. Charles George Kepinski Young (BG E&P Brasil)

Prof. Carlos Jorge de Abreu (UFRJ)

Agradecimentos

Agradeço à minha família por todo apoio e dedicação durante os anos de faculdade;

A todos os meus colegas de turma, em especial os colegas de campo, com os quais compartilhei momentos incríveis. Com certeza foram fundamentais para manter o equilíbrio em momentos de dificuldade;

À professora e amiga Cícera, excelente orientadora acadêmica, que esteve ao meu lado em todos os momentos difíceis, desde o ingresso até a saída da universidade;

Ao Geólogo e amigo Julio Kosaka, pela paciência e boa vontade em ajudar;

Ao Professor Agnelo, pela boa vontade em me ensinar a utilizar os programas;

A todos do Lagesed, pois a troca de experiências foi fundamental para meu desenvolvimento pessoal e profissional;

Ao Professor e amigo Leonardo Borghi, por toda sabedoria transmitida durante os anos de graduação, além de todo apoio e compreensão quanto a questões pessoais e profissionais.

À BG E&P Brasil, em especial ao geólogo Charles Young, meu orientador, pela cessão dos perfis dos poços necessários para a realização do trabalho;

Ao Programa de Capacitação de Recursos Humanos em Geologia do Petróleo da UFRJ (conv. UFRJ/PRH-ANP/MCT n.18) pela concessão da bolsa e suporte financeiro durante todo o desenvolvimento do projeto.

Resumo

COSTA, Guilherme Castro Martins Costa. **Modelagem de eletrofácies do intervalo Cretáceo Superior de um poço da bacia de Santos**. 2008. xiii, 27p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Este estudo busca uma análise faciológica através de atributos petrofísicos (modelagem de eletrofácies) do intervalo neocretácico de um poço localizado na bacia de Santos. Para isso, foram utilizados diversos perfis geofísicos (RG, RHOB, ILD, DT e NPHI), além de um perfil litológico gerado a partir de dados de amostra-de-calha desse poço, igualmente disponibilizado. O intervalo envolve cerca de 2000 m de rocha correspondentes às formações Juréia e Itajaí-açu, individualizando-se, nesta última, o Membro Ilha Bela. Foram caracterizadas ao todo oito eletrofácies, que foram agrupadas em sete eletrossequências. Por fim, conhecendo-se o contexto paleoambiental do intervalo estudado (marinho profundo), segundo a literatura, as superfícies limitantes de eletrossequências foram correlacionadas com as superfícies conhecidas da Estratigrafia de Sequências. A boa correlação aparente corrobora a hipótese de que a utilização da modelagem de eletrofácies em poços como ferramenta para análise estratigráfica seja uma técnica bastante viável.

Palavras-chave: Bacia de Santos; Cretáceo; Eletrofácies.

Abstract

COSTA, Guilherme Castro Martins Costa. **Modelagem de eletrofácies do intervalo Cretáceo Superior de um poço da bacia de Santos**. 2008. xiii, 27p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

This study aimed facies analysis based on petrophysics attributes (log facies) of the Upper Cretaceous section of a well located in the Santos Basin. For that, several geophysical logs were used (GR, RHOB, ILD, DT and NPHI), besides a lithologic profile supported by well-cuttings data. The interval involves about 2000 m of rock, corresponding to the Juréia and Itajaí-açu Formations, being individualized in this last one by its Ilha Bela Member. There were characterized eight electrofacies grouped in seven electrosequences. Finally, once known the palaeoenvironmental context of the studied interval (deep marine), boundary surfaces of the electrosequences were tentatively correlated to the well established Sequence Stratigraphy surfaces. The apparently good correlation achieved corroborated the hypothesis of facies modeling usage for well-log analysis as tool for stratigraphical analysis is quite viable.

Key-Words: Santos Basin, Cretaceous, log facies

Lista de figuras

- Figura 1 – Mapa de localização da bacia de Santos, com destaque para o bloco S-M-508, onde se encontra o poço estudado 2
- Figura 2 – Diagrama estratigráfico da bacia de Santos, com destaque para o intervalo do Cretáceo Superior. (Pereira & Feijó, 2004) 4
- Figura 3 – Seção Geológica obtida a partir de linha sísmica, com destaque para o intervalo do Cretáceo Superior sob estudo. (Modificado de Modica & Brush, 2006) 4
- Figura 4 - Fluxograma de trabalho para modelagem de eletrofácies através da técnica de classificação não-supervisionada. (Adaptado de Soares, 2005) 6
- Figura 5 - Estatística Pseudo-t² contra números de grupos organizados segundo a técnica de classificação não-supervisionada Average Linkage. 8
- Figura 6 - Estatística CCC contra o número de grupos, segundo a técnica de classificação não - supervisionada Average Linkage. 8
- Figura 7 - Estatística Pseudo-F contra o número de grupos, segundo a técnica de classificação não-supervisionada Average Linkage. 9
- Figura 8 – Correlação entre perfil litológico (calha) e eletrossequências para o primeiro intervalo do poço. 15
- Figura 9 – Correlação entre perfil litológico (calha) e eletrossequências para o segundo intervalo do poço. 17
- Figura 10 – Perfil litológico (calha), curvas de Raio Gama (RG), Indução (ILD), Densidade (RHOB) e Sônico (DT). Ao fundo, modelo de eletrofácies construído a partir das curvas de RG, RHOB e ILD. TSMB (1680 – 2250m), TST (1470 – 1680m) e TSMA (1250 – 1470 m). 22
- Figura 11 - Perfil litológico (calha), curvas de Raio Gama (RG), Indução (ILD), Densidade (RHOB) e Sônico (DT). Ao fundo, modelo de eletrofácies construído a partir das curvas de RG, RHOB e ILD. TSMA (655 – 1150 m), TST (480 – 650 m) e TSMA (0 – 480 m). 25

Lista de Quadros

Quadro 1 – Síntese das eletrofácies (EF) do primeiro intervalo (0 – 1150 m)	12
Quadro 2 - Síntese das eletrofácies (EF) do segundo intervalo (1250 – 2250 m)	13
Quadro 3 – Síntese das eletrosseqüências (ES) do primeiro intervalo (0 – 1150 m)	18
Quadro 4 – Síntese das eletrosseqüências (ES) do segundo intervalo (1250 – 2250 m)	18

Sumário

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vi
<i>Abstract</i>	vii
Lista de figuras.....	viii
Lista de quadros.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto geológico.....	1
1.2 Material e método.....	3
2 RESULTADOS.....	12
2.1 Eletrofácies e eletrosequências.....	12
2.2 Estratigrafia de seqüências.....	19
3 CONCLUSÕES.....	26
Referências bibliográficas.....	27
Anexo A – Artigo de SOARES (2005)	

1 INTRODUÇÃO

A bacia de Santos vem se consolidando no cenário petrolífero nacional através da constante oferta de blocos exploratórios e de investimentos de pesquisa por parte de companhias nacionais e estrangeiras. Tradicionalmente, tais investimentos vêm sendo aplicados em fronteiras exploratórias em águas profundas e ultraprofundas, buscando-se reservatórios em arenitos de idade neocretácica (Fase Drifte); mais recentemente, a seção em “pré-sal”, aptiana (Eocretáceo, Fase Transicional), vem ganhando destaque, em termos de novos reservatórios.

Os sistemas petrolíferos Guaratiba–Juréia(!) e Guaratiba–Itajaí Açú(!) contêm diversas sucessões de arenitos do Turoniano ao Santoniano (Neocretáceo), onde se inserem campos petrolíferos em produção (*e.g.* Merluza) e blocos exploratórios (*e.g.* BM-S-52), para os quais se postula e discute-se o contexto de leques submarinos (turbidíticos). Não obstante, problemas sedimentológicos e estratigráficos diversos vêm conduzindo o questionamento da eficácia do modelo deposicional vigente para a exploração dessa área e, sobretudo, para o desenvolvimento de campos já descobertos.

Entre as principais motivações para a realização do trabalho em um bloco exploratório da bacia, contendo a seção Neocretácea, está a possibilidade de utilização da técnica de modelagem de eletrofácies, fundamental para a abordagem faciológica (análise de fácies e correlação estratigráfica) de poços não testemunhados ou que não de considerem as descrições de calha. Esta técnica, pouco utilizada na exploração com essa finalidade, pode mostrar-se eficaz. Assim, a proposta de construção de modelos geológicos a partir da técnica, vem testar essa eficácia.

1.1 Contexto geológico

A bacia de Santos está localizada na porção sudeste da Margem Continental Brasileira, compreendendo o alto mar do Estado do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e o norte de Santa Catarina. Limita-se ao norte pelo arco de Cabo Frio com a bacia de Campos, e ao sul, com a bacia de Pelotas pela plataforma de Florianópolis (Figura 1). Sua área é de 130.000 km², excluindo o setor de águas profundas do Platô de São Paulo, que se estende por cerca de 76.000 km² (Cainelli & Mohriak, 1998)

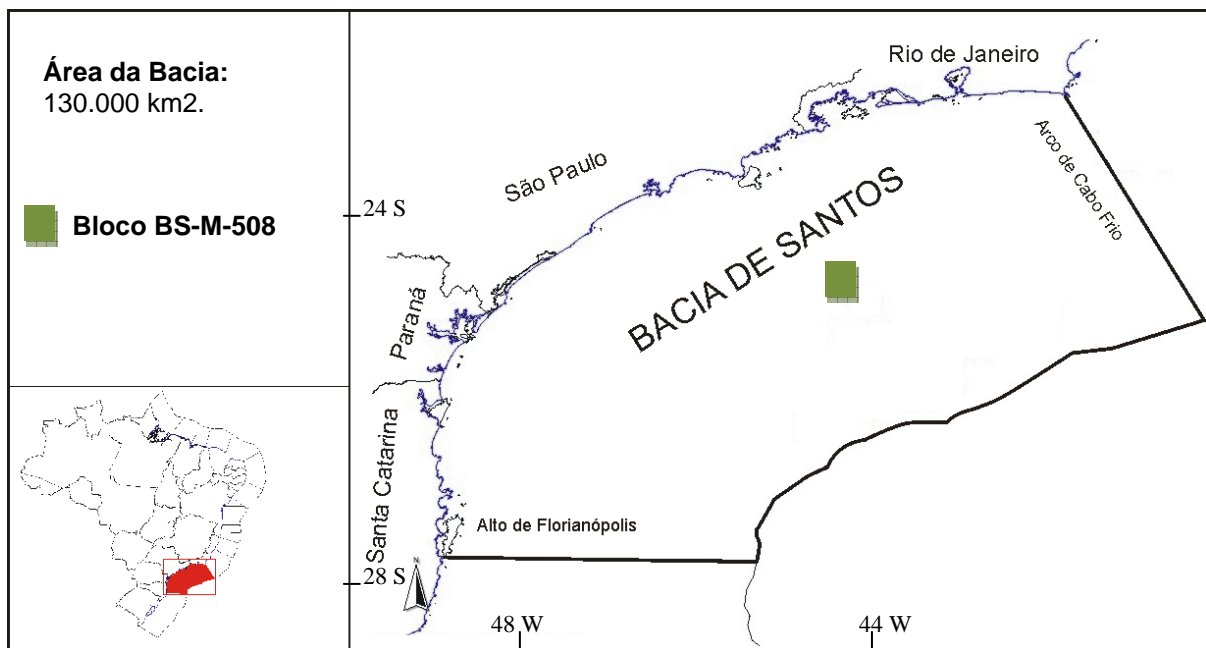


Figura 1 – Mapa de localização da bacia de Santos, com destaque para o bloco S-M-508, onde se encontra o poço estudado

Excetuando-se uma pequena espessura de sedimentos costeiros quaternários, as rochas sedimentares e ígneas da bacia de Santos não são aflorantes, e o conhecimento de sua estratigrafia advém essencialmente dos poços perfurados e das linhas sísmicas registradas. Sua cobertura sedimentar é estimada por dados geofísicos em 8.000 m de espessura, podendo chegar a 13.000 m em seus depocentros (Chang & Kowsmann, 1984). Sua origem está ligada

aos processos tectônicos que causaram a ruptura e separação do supercontinente Gondwana no fim do Jurássico e início do Cretáceo.

Durante o Neocretáceo (Figura 2), diferentemente das demais bacias marginais brasileiras, a fase eminentemente transgressiva da bacia de Santos foi interrompida, provocando a ocorrência pulsos regressivos relacionados à subida da Serra do Mar (Almeida & Carneiro, 1998). Durante tais eventos, foram depositadas as rochas que compõem as formações Santos, Juréia e Itajaí-Açu, individualizando-se nesta última o Membro Ilha Bela. Segundo Pereira & Feijó (1994), as litologias associadas a estas formações refletem a variação faciológica do proximal para o distal, em uma bacia de margem continental sob um regime de regressão marinha. A Formação Santos, mais proximal, constitui-se de conglomerados e arenitos líticos, avermelhados. A Formação Juréia, numa posição intermediária, apresenta folhelhos, siltitos, arenitos finos e calcilutitos. Característica das fácies distais, a Formação Itajaí-Açu é formada por folhelhos cinza escuros, típicos de ambiente marinho profundo (talude). Corpos arenosos de origem turbidítica, dispersos nesta seção, são individualizados sob a denominação de Membro Ilha Bela. Durante esse período, importante vulcanismo basáltico de idade 57 a 87 Ma ocorreu na bacia.

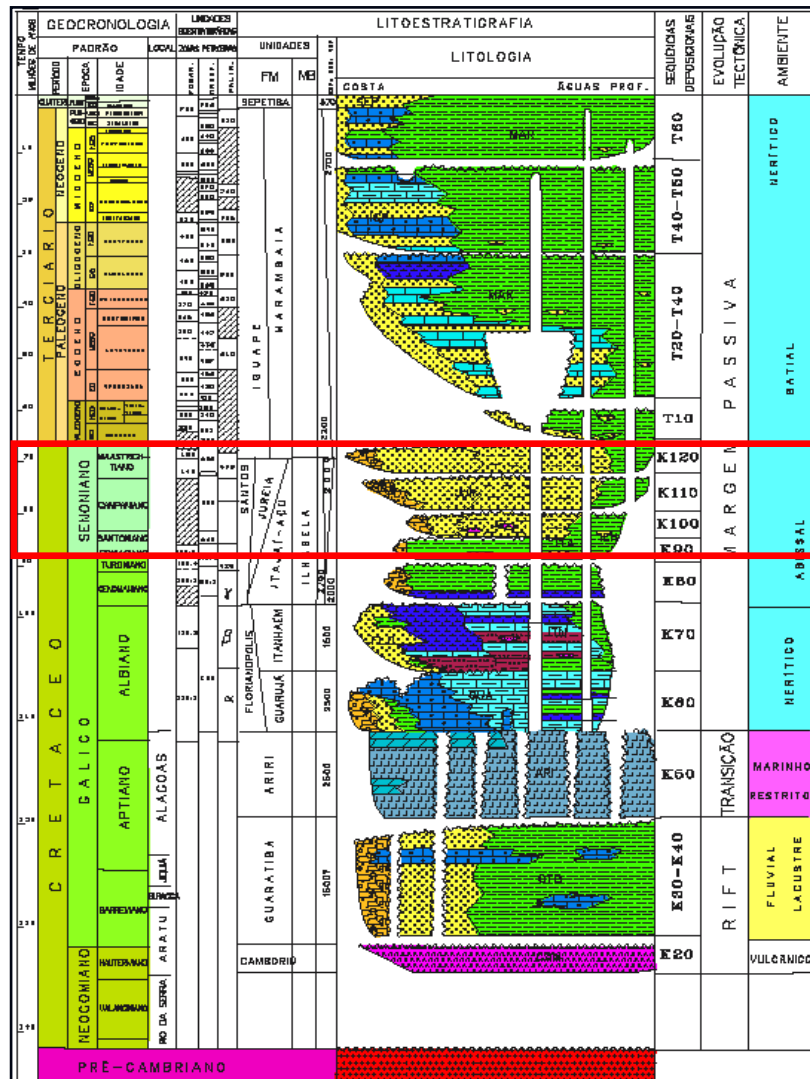


Figura 2 – Diagrama estratigráfico da bacia de Santos, com destaque para o intervalo do Cretáceo Superior. (Pereira & Feijó, 2004)

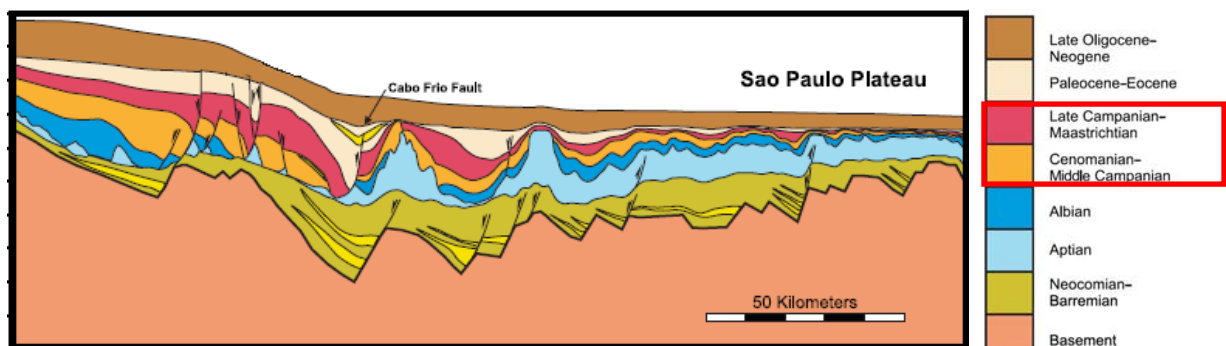


Figura 3 – Seção Geológica obtida a partir de linha sísmica, com destaque para o intervalo do Cretáceo Superior sob estudo. (Modificado de Modica & Brush, 2006)

1.2 Material e método

As áreas de exploração de petróleo têm, em geral, grande disponibilidade de dados geofísicos, que são obtidos de modo indireto, apresentando graus de incerteza e resolução variáveis. Os dados sísmicos convencionais, mais abundantes, normalmente são utilizados para se conhecer o arcabouço estratigráfico da bacia. Já os perfis elétricos de poço, usualmente são analisados a partir de curvas isoladas e são utilizados com fins de caracterização de reservatórios e análise de fluidos. Neste caso, só possuem valor numa análise estratigráfica, se “amarrados” aos dados sísmicos. A técnica utilizada no presente trabalho mostra-se como um método independente e automatizado, que difere do procedimento usual de análise das curvas geofísicas. Utiliza-se uma combinação destas variáveis (perfis), permitindo a definição de intervalos melhor caracterizados petrofisicamente. A utilização de perfis elétricos desta maneira é conhecida como modelagem de eletrofácies.

O termo eletrofácies consiste no reconhecimento indireto das rochas através de perfis geofísicos, sendo distinguidas umas das outras através do comportamento dessas curvas, tais como: resistividade, radioatividade, propriedades elásticas, etc. A interpretação de eletrofácies aqui é tomada como uma litologia (litofácies).

Para a realização do trabalho, foram utilizadas as curvas de raio gama (RG), resistividade (ILD), densidade (RHOB), sônico (DT) e neutrônico (NPHI) em formato LAS de um poço localizado em águas profundas na bacia de Santos, juntamente com um perfil litológico (calha) em formato PDF. O fluxo de trabalho para se alcançar a modelagem de eletrofácies (Figura 4) foi uma adaptação do método de entrelaçamento das técnicas supervisionadas (acompanhadas de dados de testemunho) e não-supervisionada (ausência de dados litotógicos) proposta por Soares (2005).– Anexo A

Como os dados de testemunhos do poço não foram disponibilizados, a técnica utilizada foi a não-supervisionada; ou seja, 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).

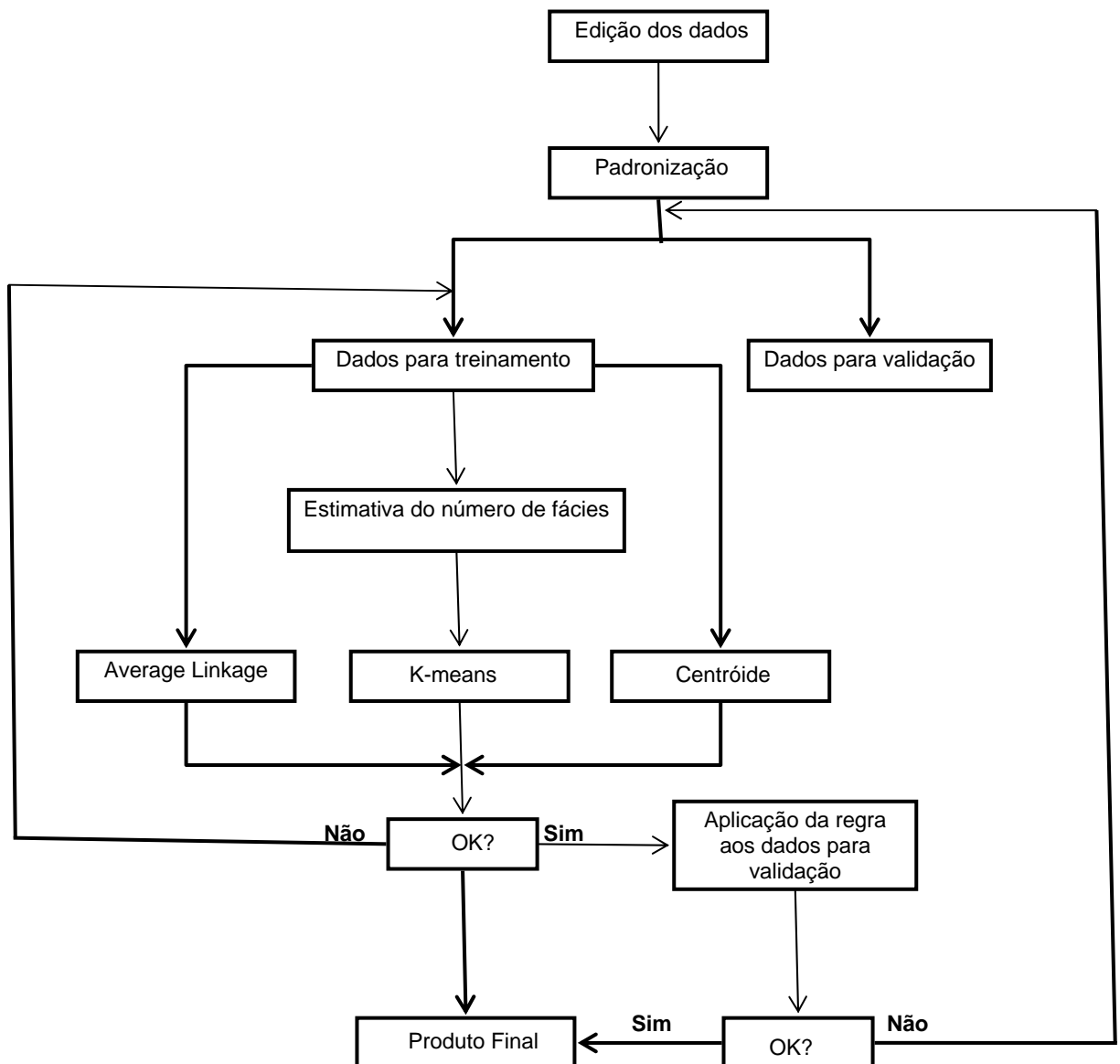


Figura 4 - Fluxograma de trabalho para modelagem de eletrofácies através da técnica de classificação não-supervisionada. (Adaptado de Soares, 2005)

Entre os métodos de classificação não-supervisionada estão o “*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. O *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. O método *K-means*, utilizado para agrupar amostras dentro de um número conhecido de grupos (K), inicialmente gera K grupos formados aleatoriamente pelas amostras dos perfis; em seguida esse método reorganiza a composição de cada grupo de modo a minimizar a variabilidade interna de cada grupo e maximizar a variabilidade entre grupos. (Cf. Soares, 2005)

Alguns procedimentos estatísticos permitem, com base nos dados disponíveis, estimar o número ideal de eletrofácies a reconhecer. Tais procedimentos foram feitos utilizando-se as funções *Pseudo-t*², *Cubic Clustering Criterion (CCC)* e *Pseudo-F*, disponíveis como ferramentas no software *Enterprise Guide 2*. (Cf. Soares, 2005)

O gráfico da estatística *Pseudo-t*² (Figura 5) apresenta valores altos para os números de fácies imediatamente anteriores aos ideais. No caso, bons números de grupos (eletrofácies) a serem reconhecidas nos dados seria quatro.

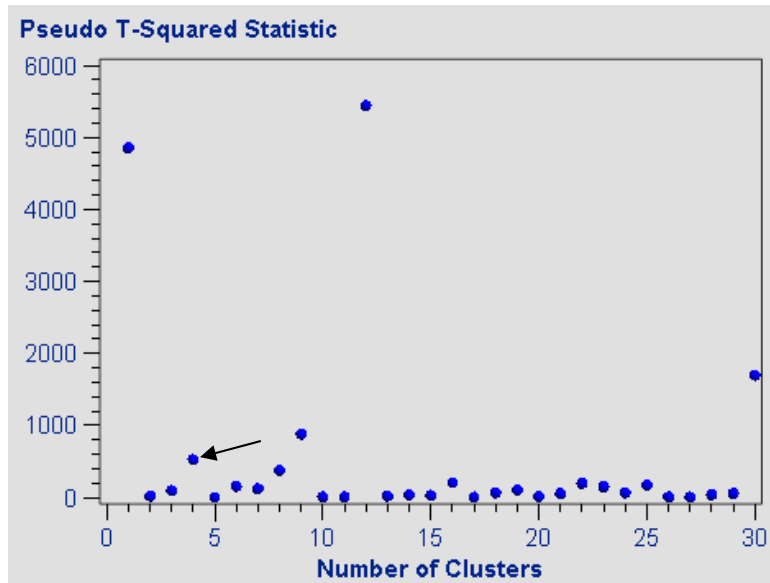


Figura 5 - Estatística $Pseudo-t^2$ contra números de grupos organizados segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*. (Gráfico obtido pelo *Enterprise Guide 2*.)

No caso da estatística *CCC* (Figura 6), valores positivos maiores que 2 ou 3 são indicativos de bons números de grupos, valores entre 0 e 2 indicam valores potenciais de número de grupos, enquanto que valores negativos elevados são indicativos da presença de valores anômalos. No caso, um bom número de grupos (eletrofácies) utilizando este método poderia ser dois.

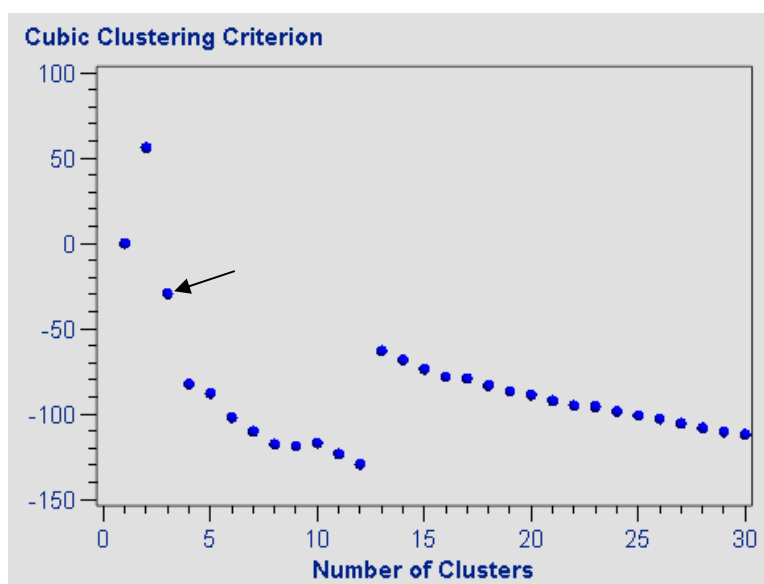


Figura 6 - Estatística *CCC* contra o número de grupos, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*. (Gráfico obtido pelo *Enterprise Guide 2*.)

O gráfico da estatística *Pseudo-F* (Figura 7) indica bons números de grupos quando essa estatística apresenta valores elevados. Assim, bons números de eletrofácies para se tentar identificar poderiam ser três. Quantidades muito altas ou muito baixas de eletrofácies não são desejáveis para a modelagem.

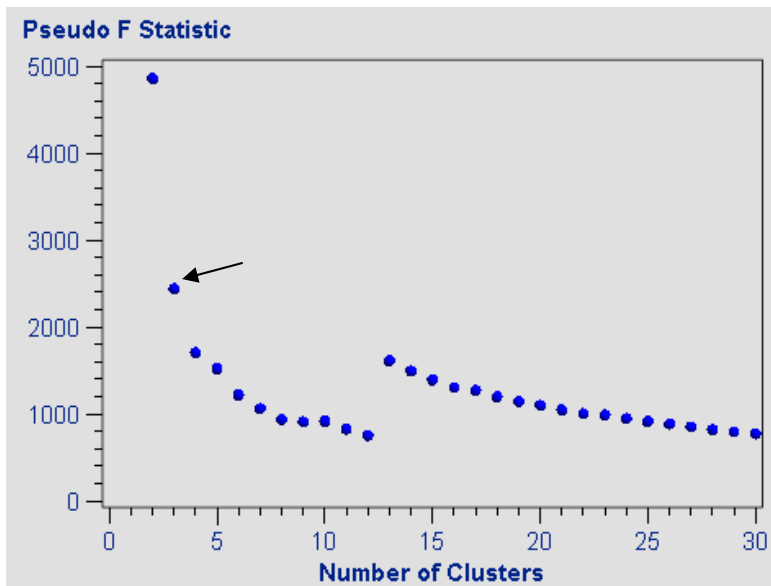


Figura 7 - Estatística *Pseudo-F* contra o número de grupos, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*. (Gráfico obtido pelo *Enterprise Guide 2*.)

Considerando a interseção entre os valores indicados pelas três estatísticas, além da quantidade de litologias descritas no perfil litológico disponível (calha) dos intervalos, a conclusão foi que o número ideal de eletrofácies a se reconhecer foi quatro.

Para uma abordagem inicial, foram utilizadas as curvas RG, ILD, RHOB, NPHI e DT. A curva de RG mede a radioatividade natural das rochas. É o perfil disponível mais adequado para determinação de litologias. O perfil ILD fornece a leitura aproximada da resistividade da rocha, através da medição de campos elétricos e magnéticos induzidos. É utilizado normalmente para identificação de fluidos e de níveis argilosos. A curva RHOB mede o total de raios gama defletidos das rochas após o bombardeamento das paredes do poço com uma

fonte colimada, o que permite a inferência de dados de densidade e porosidade. O perfil NPHI fornece uma medida confiável de átomos de hidrogênio, o que o torna bastante útil para estimar o tipo de fluido presente nos poros. O perfil DT mede a diferença de trânsito de uma onda mecânica através de um intervalo de rocha, sendo a velocidade inversamente proporcional à porosidade.

Muito cuidado deve ser tomado ao se interpretar o resultado da modelagem de eletrofácies, uma vez que é um método analítico indireto, que apresenta diversos fatores limitantes que podem causar uma leitura errônea. Fatores como presença de minerais radioativos em arenitos, produtos diagenéticos, presença de matéria orgânica e até mesmo a geometria do poço são alguns dos fatores limitantes da técnica. Devido à falta da melhor forma de normalização dos perfis, a modelagem de eletrofácies foi feita em dois intervalos distintos do poço, pois devido à variação de diâmetro do poço, os valores dos perfis se comportaram de forma muito diferente. Os intervalos foram 0 – 1150 m (intervalo I) e 1250 – 2250 m (intervalo II).

Foram utilizados quatro diferentes arranjos de perfis para cada intervalo. Tais arranjos foram simulações feitas com o uso de combinações entre os perfis. Na primeira simulação, as eletrofácies foram definidas com base nos perfis RG, RHOB e ILD; em outra, foram utilizadas as curvas RG, RHOB e DT; na seguinte os perfis foram RG, RHOB, ILD e DT, e por fim, foram utilizadas as curvas RG, RHOB, ILD, DT e NPHI (Figura 4). Para a elaboração da parte gráfica da modelagem de eletrofácies, foi utilizado o programa Grapher 4.0.

A partir da caracterização das eletrofácies e organização dos dados em forma de perfil, foram definidas eletrossequências. Estas podem ser definidas como intervalos estratigráficos discriminados a partir de conjuntos de eletrofácies que sejam consistentes e com características suficientemente distintas para separá-las. (Rider, 2000). Em geral as

eletrosseqüências correspondem a sucessões sedimentológicas de litofácies (ciclos de fácies); daí a associação, neste estudo, com a análise estratigráfica de seqüências (Posamentier & Vail, 1998).

No presente trabalho, as eletrosseqüências foram definidas levando-se em consideração não apenas a abundância relativa de uma ou mais eletrofácies características de um intervalo, mas também a baixa ocorrência ou ausência, bem como seus ciclos.

2 RESULTADOS

2.1 Eletrofácies e eletrosseqüências

Durante a etapa de validação do método, através da comparação com o perfil construído com os dados de calha, ficou constatado que o arranjo formado pelos perfis de raio-gama (RG), densidade (RHOB) e indução (ILD) são os mais adequados para o modelo; porém os outros arranjos não foram descartados, devido à utilidade, por exemplo, na definição dos limites das eletrosseqüências com maior segurança.

Ao todo foram caracterizadas oito eletrofácies (quadros 1 e 2), sendo quatro correspondentes ao primeiro intervalo do poço (0 – 1150 m) e quatro, ao segundo (1250 – 2250 m).

Quadro 1 – Síntese das eletrofácies (EF) do primeiro intervalo (0 m – 1150 m)

EF	Diagnose	Interpretação
EF1	RG médio / RHOB médio ILD baixo / DT médio	Arenito argiloso / Folhelho
EF2	RG baixo / RHOB alto ILD alto / DT baixo	Carbonato / Arenito cimentado(?)/ Siltito
EF3	RG alto / RHOB baixo ILD baixo / DT alto	Folhelho / Marga ricos em matéria orgânica
EF4	RG baixo / RHOB alto ILD médio / DT baixo	Siltito / Arenito pouco argiloso

Quadro 2 - Síntese das eletrofácies (EF) do segundo intervalo (1250 m – 2250 m)

EF	Diagnose	Interpretação
EF5	RG alto / RHOB baixo ILD baixo / DT alto	Folhelho
EF6	RG alto / RHOB alto ILD alto / DT baixo	Siltito / Folhelho
EF7	RG baixo / RHOB alto ILD alto / DT baixo	Carbonato / Arenito cimentado
EF8	RG baixo / RHOB baixo ILD médio / DT médio	Arenito / Siltito

Diferentes sucessões de eletrofácies foram observadas e a partir destas, três eletrossequências puderam ser identificadas no primeiro intervalo do poço (Figura 8) e quatro no segundo (Figura 9).

Eletrossequência 5 (Quadro 3, Figura 8) – Compreende o intervalo entre 665 m e 1150 m. Caracteriza-se pela predominância da Evda, com ocorrência de níveis bem marcados onde predomina a Eama. A assinatura geofísica é marcada por valores médios a baixos de RG, ILD e RHOB. Pode ser interpretada como uma sucessão de rochas pelíticas intercaladas com areníticas.

Eletrossequência 6 (Quadro 3, Figura 8) – Ocorre no intervalo entre 540 m e 665 m. Caracteriza-se por apresentar abundância relativa da Eama e Evma, e baixa ocorrência da Eaza; ou seja, é um intervalo onde a assinatura geofísica das rochas é marcada por valores relativamente baixos de RG e relativamente altos de ILD. Pode ser interpretado como um pacote de siltitos ou arenitos com argilosidade moderada.

Eletroseqüência 7 (Quadro 3, Figura 8) – Ocorre no primeiro intervalo do poço, entre 0 m e 540 m. Reconhece-se pela predominância da Eaza e, de forma restrita, por Evda; ou seja, possui uma assinatura geofísica marcada principalmente por altos valores de RG. Pelo contexto paleoambiental do intervalo, segundo a literatura (Pereira & Feijó, 1994), a seqüência pode ser interpretada como um pacote espesso de sedimentos pelágicos intercalados por lentes delgadas de arenitos, ambos depositados em fundo oceânico.

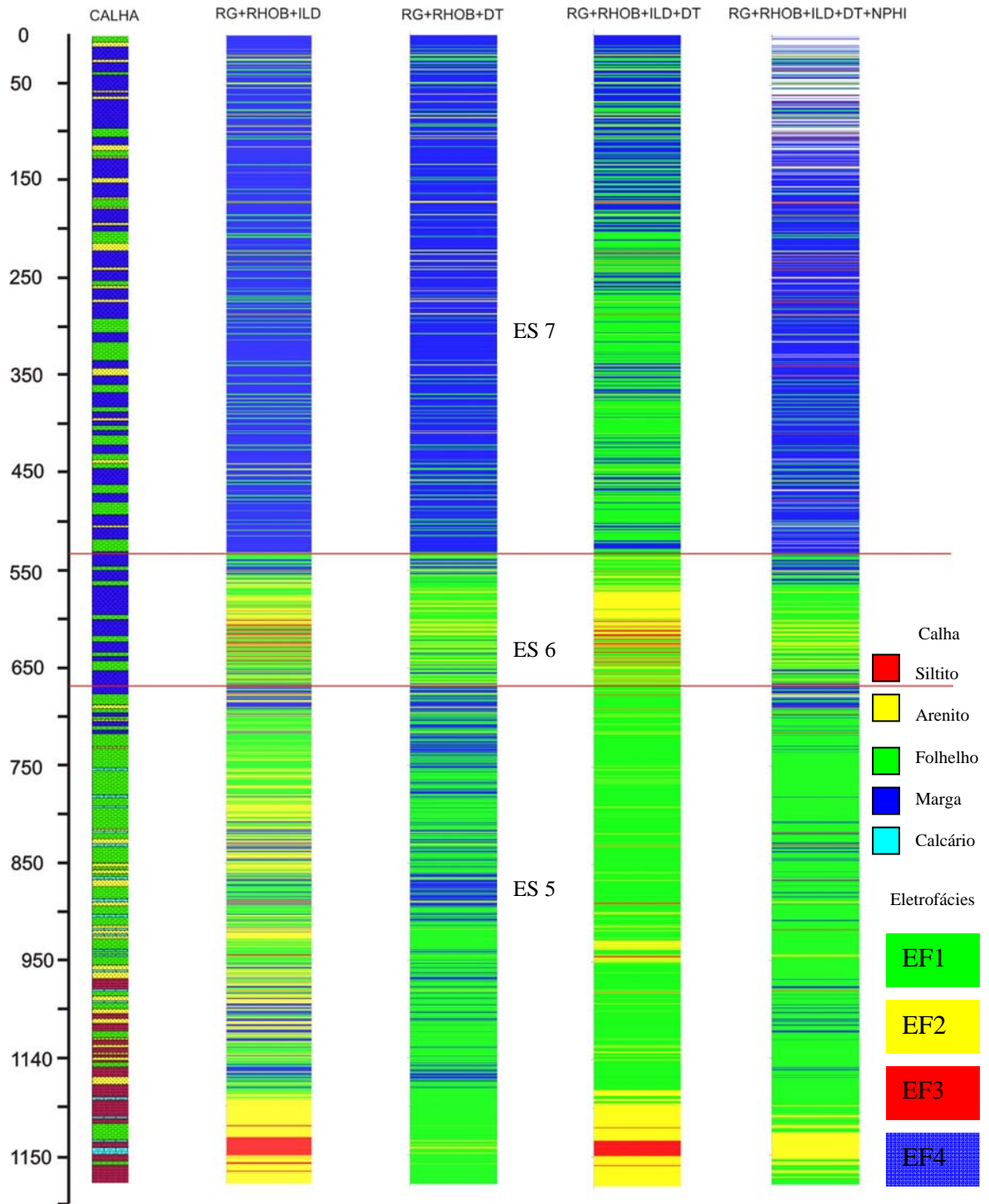


Figura 8 – Correlação entre perfil litológico (calha) e eletrossequências (ES5, ES6 e ES7) para o primeiro intervalo do poço.

Eletrosseqüência 1 (Quadro 4, Figura 9) – Ocorre entre 1935 – 2225 m. Caracteriza-se pela predominância da Evmb, com níveis bem marcados da Eamb; ou seja, reflete uma alternância de pacotes com assinatura geofísica de rochas pelíticas intercaladas com outros com assinatura de arenitos e calcários.

Eletrosseqüência 2 (Quadro 4, Figura 9) – É observada entre 1680 e 1935 m. caracteriza-se pelo predomínio da Eamb, ou seja, um pacote rochoso com assinatura geofísica marcada principalmente por valores de RG baixos. A assinatura geofísica da eletrosseqüência sugere que se trata de um pacote de arenitos e siltitos intercalados por finas camadas de folhelhos.

Eletrosseqüência 3 (Quadro 4, Figura 9) – Ocorre entre 1470 e 1680 m. Reconhe-se por apresentar predominantemente a Evmb e ocorrência restrita da Evdb; ou seja, trata-se de uma seqüência marcada por altos valores de RG, ILD e RHOB. Pelo contexto paleoambiental do intervalo, segundo a literatura (Pereira & Feijó, 1994), a seqüência pode ser interpretada como representante da deposição pelítica em águas profundas.

Eletrosseqüência 4 (Quadro 4, Figura 9) – Ocorre no segundo intervalo do poço, entre 1250 e 1470 m. É principiamente reconhecida por apresentar predominantemente a Evdb, ou seja, representa uma sucessão com altos valores de RG, baixos valores de ILD e RHOB. Pelo contexto paleoambiental do intervalo, segundo a literatura (Pereira & Feijó, 1994), a seqüência pode ser interpretada como depósitos pelágicos de águas profundas.

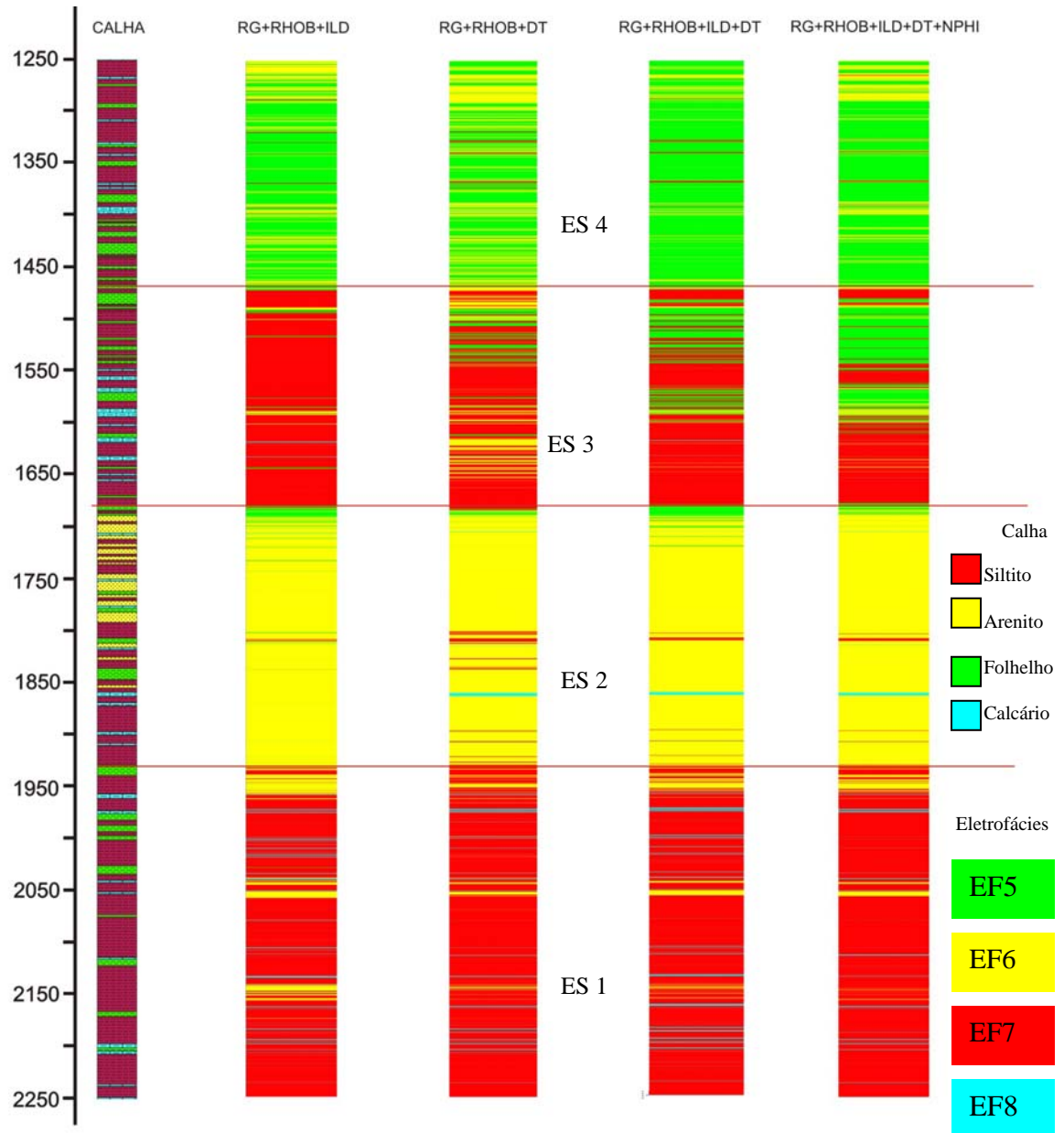


Figura 9 – Correlação entre perfil litológico (calha) e eletrossequências (ES1, ES2, ES3 e ES4) para o segundo intervalo do poço.

Quadro 3 – Síntese das eletrosseqüências (ES) do primeiro intervalo (0 – 1150 m)

ES	Sucessão de Eletrofácies	Interpretação
5	Predominância da Evda, com presença da Eama e Evma	Sucessão de rochas pelíticas intercaladas com areníticas
6	Abundância relativa da Eama e Evma, e baixa ocorrência da Eaza	Siltitos e arenitos com argilosidade moderada
7	Predominância da Eaza e ocorrência restrita da Evda	Pacote sedimentar pelágico rico em matéria orgânica

Quadro 4 – Síntese das eletrosseqüências (ES) do segundo intervalo (1250 – 2250 m)

ES	Sucessão de Eletrofácies	Interpretação
1	Predominância da Evmb e ausência da Evdb	Rochas pelíticas intercaladas com arenitos e calcários
2	Predominância da Eamb	Pacotes de arenitos e siltitos intercalados com finas camadas de folhelho
3	Predominância da Evmb e baixa ocorrência da Evdb	Pacote com intercalação entre siltito e folhelho
4	Predominância da Evdb	Pacote de folhelho rico em matéria orgânica

2.3 Estratigrafia de Seqüências

A Estratigrafia de Seqüências trata da moderna base conceitual da análise estratigráfica, fundamentada na organização cronoestratigráfica do registro sedimentar. Nela, compreende-se por seqüência o conjunto de estratos geneticamente relacionados por processos e ambientes deposicionais, limitados no topo e na base por discordâncias e concordâncias relativas, que são superfícies limite de seqüências. (Posamentier & Vail, 1998).

A seqüência constitui-se por uma associação de tratos de sistemas deposicionais de mar baixo (TSMB), subdividido em inicial (TSMBi) e final (TSMBf), transgressivo (TST) e mar alto (TSMA), acumulados entre dois pontos de inflexão de uma queda eustática (Posamentier & Vail, 1998). Os tratos de sistemas são limitados por superfícies específicas e possuem geometrias, assinaturas geofísicas, litofácies e conteúdo paleontológico peculiares, podendo ser identificados em linhas sísmicas, poços e afloramentos, bem como as próprias seqüências deposicionais.

A SIM (Superfície de Inundação Máxima) é a superfície que separa o trato de sistemas transgressivo (TST) do trato de sistemas de mar alto (TSMA). Representa a fase de nível relativo do mar mais elevado dentro de um ciclo.

A ST (Superfície Transgressiva) é aquela que se encontra na base de um trato de sistemas transgressivo e registra uma significativa superfície de inundação marinha, a qual registra a aproximação de um ponto de inflexão de subida eustática (Posamentier & Vail, 1998).

Neste trabalho, uma vez que se reconhecem os contextos paleoambientais mais amplos que os poços contêm, busca-se correlacionar superfícies limitantes de eletroseqüências com as superfícies conhecidas da Estratigrafia de Seqüências. Parte-se do princípio que as mudanças faciológicas na sucessão estudada, cujas respostas petrofísicas são fornecidas em

termos de comportamento das curvas geofísicas, são associáveis à evolução dos tratos de sistema em uma seqüência deposicional.

O conjunto de eletroseqüências observadas no segundo intervalo do poço (1250 – 2250 m) pode ser entendido como parte de um sistema deposicional, em que está presente um TSMB, subdividido em TSMBi e TSMBf, um TST e por fim um TSMA, reconhecidos através da associação e ciclos de eletrofácies, bem como pelas superfícies que limitam as eletroseqüências.

A ES 1 (1890 – 2250 m) (Figura 11) registra pelo menos três ciclos de eletrofácies, que representam variações de rochas mais argilosas, representadas pela eletrofácies Evmb, passando para arenosas (Eamb). Os ciclos representam pequenos pulsos de maior aporte sedimentar em contexto deposicional marinho profundo, portanto, podem ser entendidos como representantes do TSMBi (leques submarinos).

A ES 2 (1680 – 1890 m) (Figura 11) apresenta uma predominância da Eamb, com baixa ocorrência das eletrofácies relacionadas às rochas mais argilosas, o que indica que o intervalo apresenta quase exclusivamente rochas arenosas. Seu limite inferior foi definido com base apenas na associação de eletrofácies, uma vez que a correlação com o perfil litológico não foi alcançada. De acordo com o contexto deposicional, a eletroseqüência representa o TSMBf no poço; ou seja, a cunha de talude, e os pacotes arenosos são relacionados aos depósitos turbidíticos (Membro Ilha Bela). O topo da eletroseqüência, bem caracterizado, registra uma passagem abrupta de rochas arenosas, representadas pela Eamb, para rochas pelíticas (Evmb) (afogamento súbito da bacia), representando a superfície transgressiva (ST), que marca o fim do TSMB e início do TST.

A fase inicial do TST é representada pela ES 3 (1470 – 1680 m) (Figura 11), que apresenta uma sucessão de eletrofácies características de rochas pelíticas (Evmb) intercaladas com pequenos intervalos de eletrofácies relacionadas às rochas mais arenosas (Eamb).

Seguindo a lógica do contexto deposicional da bacia, o intervalo evidencia um aumento progressivo da lâmina d'água e uma diminuição progressiva do volume de depósitos arenosos ao longo do tempo. A SIM, superfície que marca a passagem do TST para o TSMA, está representada próximo ao topo da ES 3 (1490 m), e registra os valores mais elevados de raio-gama, indicando que se trata de um intervalo bastante argiloso.

O TSMA é representado, portanto, pelas rochas relacionadas ao topo da ES 3 e por toda a ES 4 (1250 – 1470 m). O intervalo caracteriza-se por ciclos de eletrofácies associadas às rochas pelíticas ricas em matéria orgânica (Evdb), intercaladas com aquelas relacionadas às litofácies arenosas (Eamb). Tais ciclos, segundo o modelo deposicional proposto para o poço, são interpretados como parasseqüências, que associadas, caracterizam um padrão de empilhamento progradacional; ou seja, representam uma fase em que a taxa de deposição superou a taxa de acomodação.

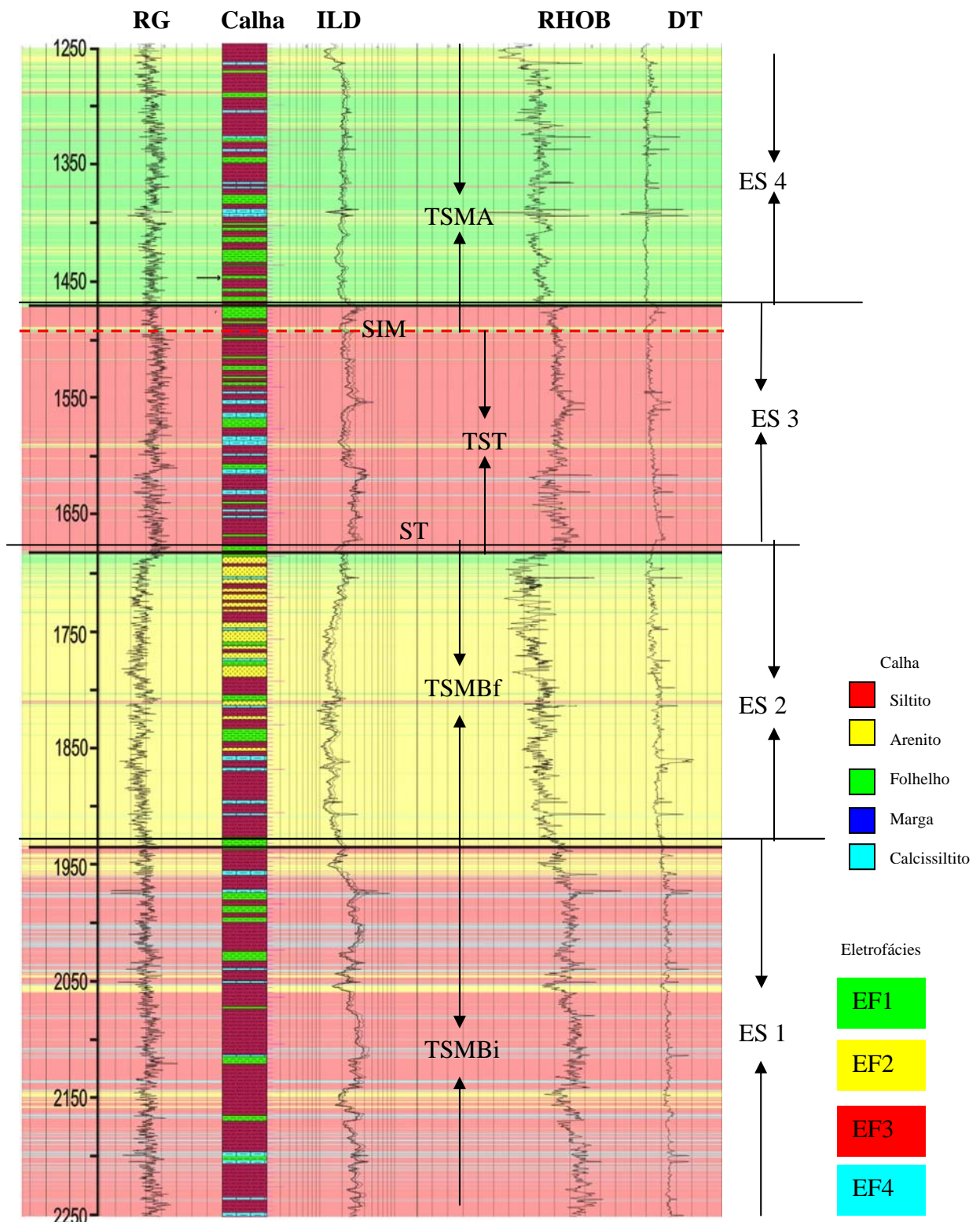


Figura 10 - Perfil litológico (calha), curvas de Raio Gama (RG), Indução (ILD), Densidade (RHOB) e Sônico (DT). Ao fundo, modelo de eletrofácies construído a partir das curvas de RG, RHOB e ILD. TSMB (1680 – 2250m), TST (1470 – 1680m) e TSMA (1250 – 1470 m).

O conjunto de eletroseqüências observadas no primeiro intervalo do poço (0– 1150 m) (Figura 11) representa, dentro do contexto deposicional proposto para o poço, parte de um TSMA limitado no topo por um limite de seqüências (LS), um TST e um segundo TSMA. Assim como na análise feita para o segundo intervalo do poço (1250 – 2250 m), os tratos de sistema e superfícies foram definidos a partir dos limites de eletroseqüências e ciclos de eletrofácies.

O TSMA definido na parte inferior do intervalo (655 – 1150 m) está representado pela ES 5. O intervalo possui continuidade com o TSMA definido anteriormente para o segundo intervalo do poço, no entanto a proporção de rochas arenosas é bem maior. Caracteriza-se por ciclos (parasseqüências), que associadas, caracterizam um padrão de empilhamento progradacional.

A superfície transgressiva, que limita na base o TST, também é uma superfície limite de seqüências. O TST (355 – 655m) compreende a ES 6 (540 – 655 m), com assinatura geofísica típica de arenitos e siltitos com argilosidade moderada, na base, além de parte da ES 7 (355 – 540 m), com assinatura de uma sucessão de rochas pelágicas (folhelhos e margas), ricas em matéria orgânica, no topo. Este intervalo, portanto, evidencia um aumento progressivo da lâmina d'água e uma diminuição progressiva do aporte sedimentar ao longo do tempo.

A SIM, superfície que limita o TST no topo, aparece indicada na profundidade 355 m, num intervalo formado em condições de taxa de sedimentação muito baixa, durante os máximos de transgressão (seção condensada).

O segundo TSMA (0 – 355 m) encontra-se limitado na base pela SIM, e está todo compreendido na ES 7. De acordo com o contexto deposicional, trata-se uma sucessão de rochas pelágicas (folhelhos e margas), ricas em matéria orgânica, com ocorrência restrita de pequenas lentes de material mais arenoso. O intervalo pode ser interpretado como uma ampla

seção condensada formada na porção distal da bacia. Não se observa um pronunciado padrão de empilhamento progradacional devido às altas taxas de acomodação ainda existentes.

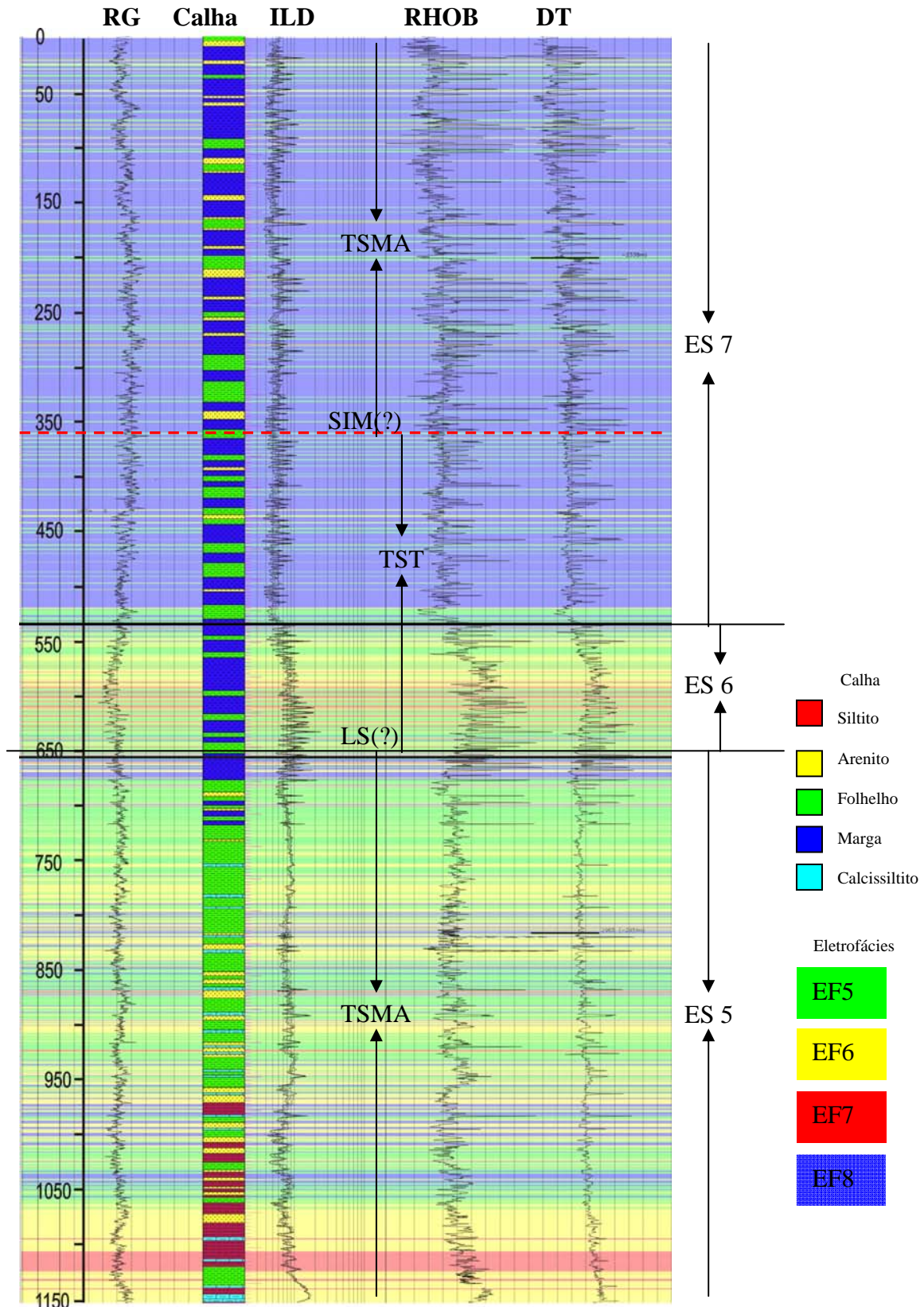


Figura 11 - Perfil litológico (calha), curvas de Raio Gama (RG), Indução (ILD), Densidade (RHOB) e Sônico (DT). Ao fundo, modelo de eletrofácies construído a partir das curvas de RG, RHOB e ILD. TSM (655 – 1150 m), TST (480 – 650 m) e TSM (0 – 480 m).

3 CONCLUSÕES

Apesar de existirem intervalos onde anomalias indesejadas nos perfis ou problemas na descrição litológica impediram uma relação confiável entre eletrofácies e litofácies, a aplicação da técnica de modelagem de eletrofácies foi considerada satisfatória.

A partir do conhecimento superficial do contexto paleoambiental do intervalo (marinho profundo), foi possível uma correlação tentativa das eletroseqüências e seus limites com tratos de sistemas (TSMB, TSMA e TST) e superfícies (LS, ST, SIM) da Estratigrafia de Seqüências. Esta aplicação do método de modelagem de eletrofácies abre caminho para novos estudos de análise estratigráfica de alta resolução em poços, através de um método relativamente simples.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, F.F.M. & CARNEIRO, C.D.R. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, 28:135-150.

CAINELLI, C. & MOHRIAK, W.U. 1998. Geology of Atlantic Eastern Brazilian basins. **In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION**, Rio de Janeiro, 1998. **Short Course...** Rio de Janeiro, Brazilian Geology–Part II, 67p.

CHANG, H.K. & KOWSMANN, R.O. 1984. Subsidência térmica e espessura crustal na Bacia de Santos. **In: Congresso Brasileiro de Geologia**, 33, Rio de Janeiro, 1984. **Anais...** Rio de Janeiro, 2:1602-1614.

MODICA, C.J. & BRUSH, E.R. 2004. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil. **AAPG Bulletin**, 88:923-945.

PEREIRA, M.J. & FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, 8:219-234.

POSAMENTIER, H.W. & VAIL, P.R. 1988. Eustatic control on clastic deposition II – sequences and system tracts. **In: WILGUS, K.C. et al. (eds.) Sea-level Changes: an Integrated Approach**. Tulsa, SEPM. p.125-154. (SEPM Spec. Publ., 42).

RIDER, M. 2000. **The Geological interpretation of well logs**. Sutherland, Whittles Publishing. 288p.

SOARES, J.A. 2005. Um fluxo de trabalho para modelagem de eletrofácies com entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada. **In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA**, Salvador, 2005. **Anais...** Salvador, 6p. (CD-ROM, pdf)

ANEXOS

A - Um fluxo de trabalho para 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 (litofácies). 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?

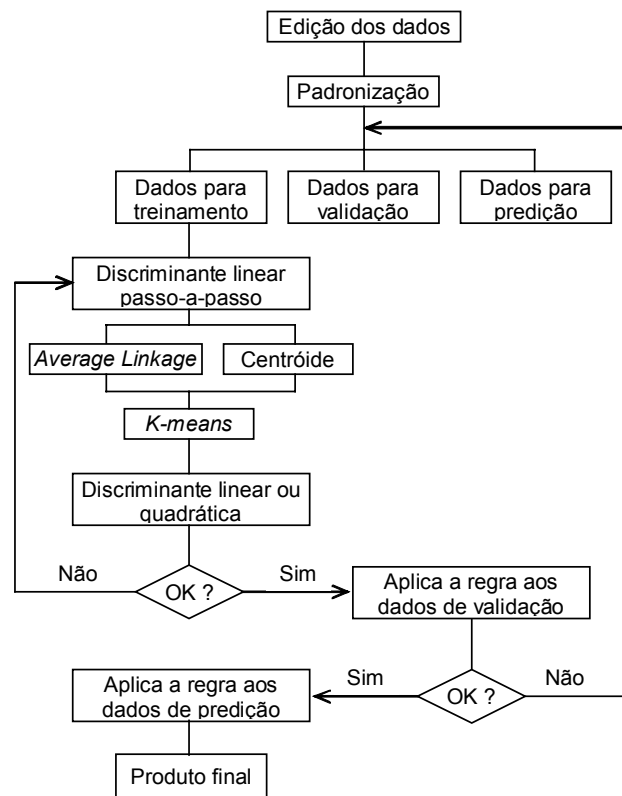


Figura 1 – Fluxograma para modelagem de eletrofácies através do uso entrelaçado de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada.

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.

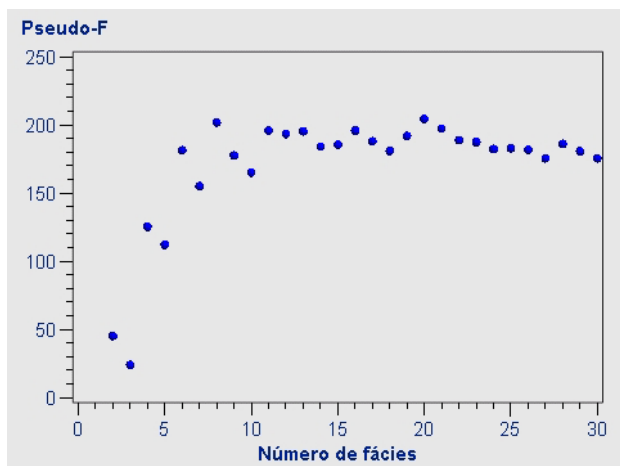


Figura 2 – Estatística *Pseudo-F* contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

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.

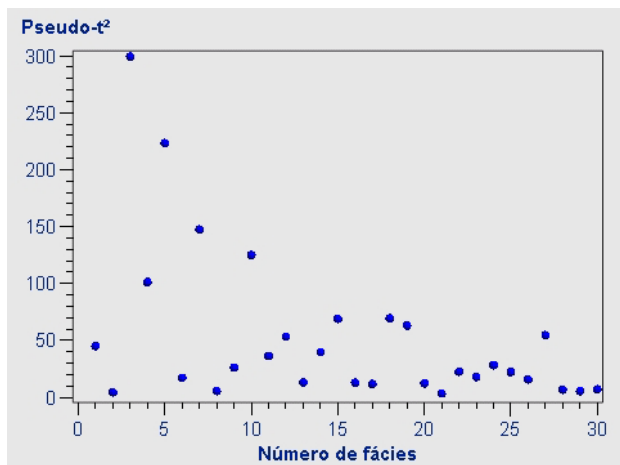


Figura 3 – Estatística *Pseudo-t²* contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

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.

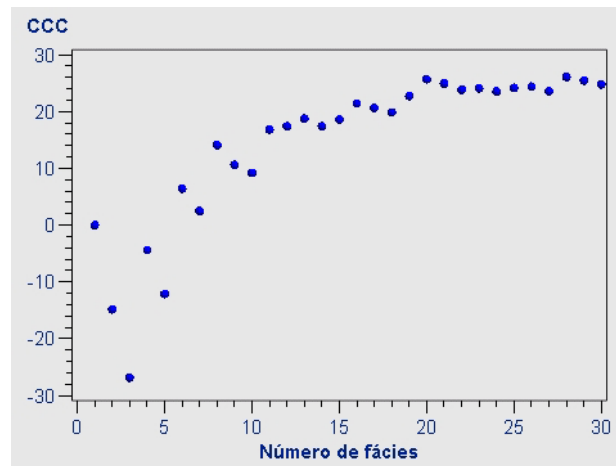


Figura 4 – Estatística CCC contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

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.

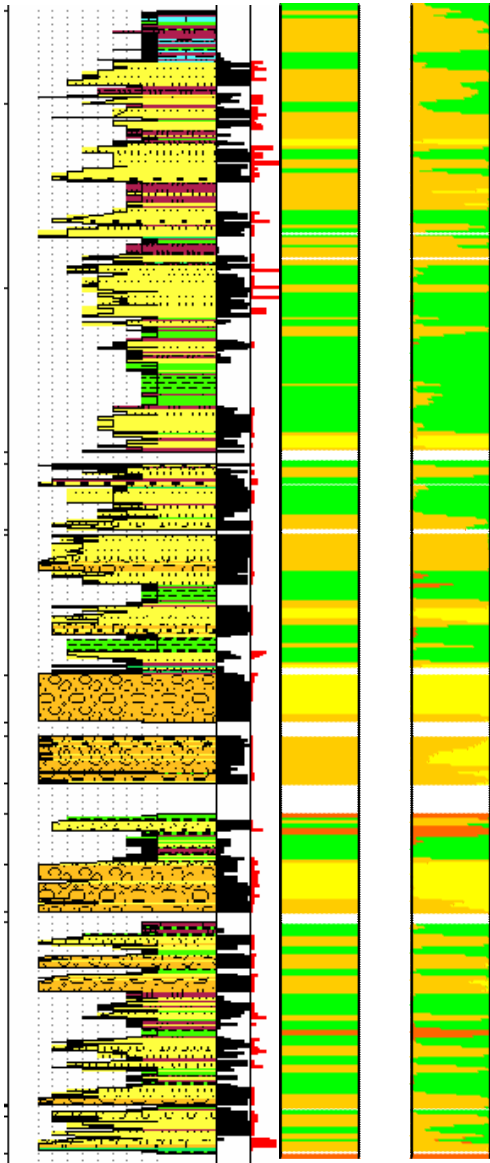


Figura 5 – Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, eletrofácies por classificação não-supervisionada e eletrofácies por classificação supervisionada para o Poço 1 (dados de treinamento).

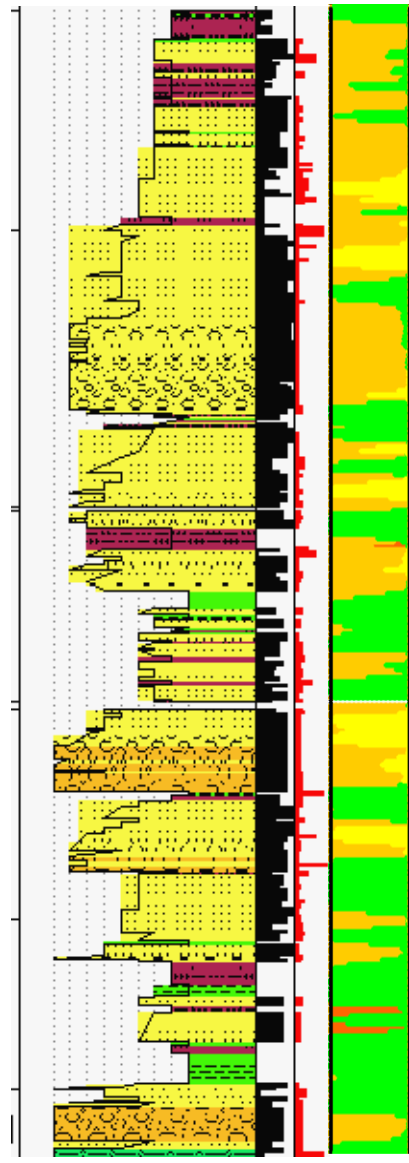


Figura 6 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 2. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

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.

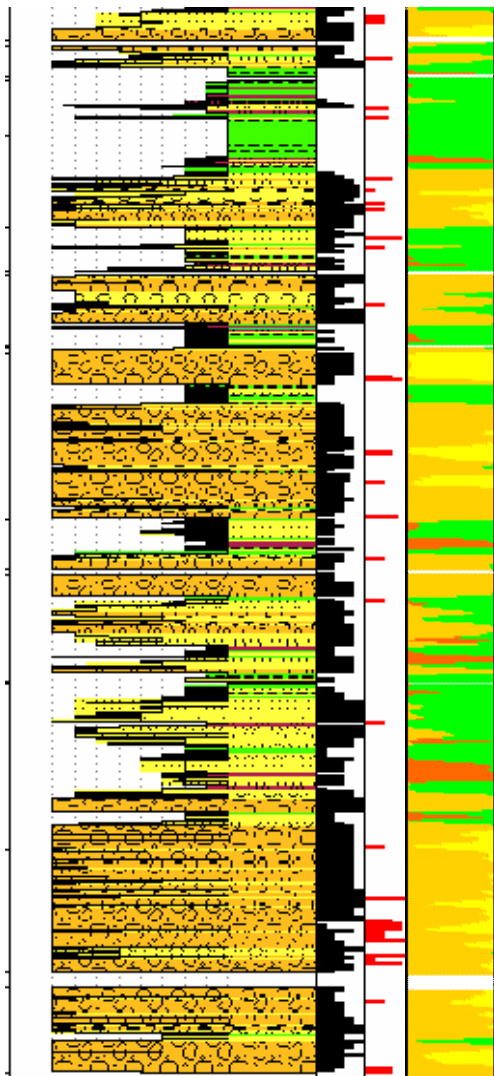


Figura 7 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 3. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

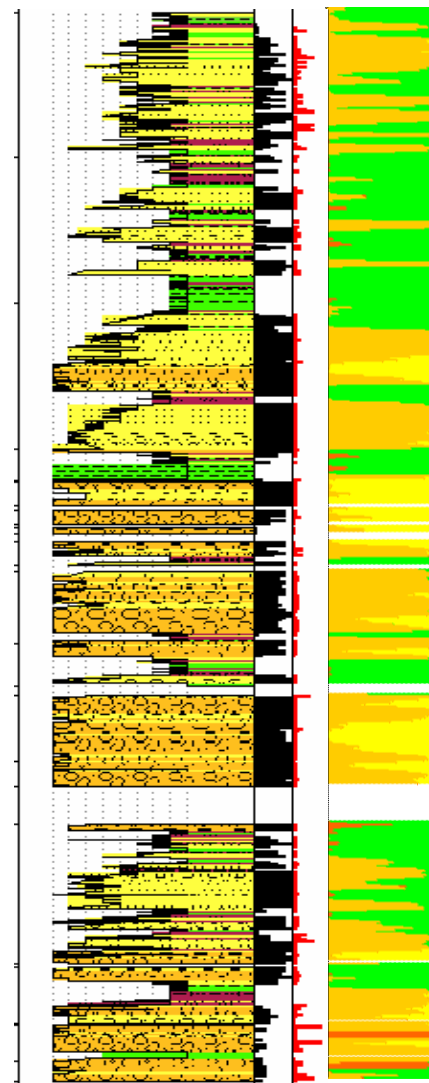


Figura 8 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 4. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

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.

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.