



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DO MÉTODO FUZZY PARA RECONHECIMENTO DE PADRÕES
EM PERFIS DE POÇOS DO CAMPO DE NAMORADO – BACIA DE CAMPOS**

ANA CAROLINA GONÇALVES TAVARES MAGALHÃES

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “TRABALHO FINAL DE CURSO”

*TEMA VINCULADO AO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM
GEOLOGIA DO PETRÓLEO (CONVÊNIO PRH-ANP/MCT Nº 18)*

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL
JULHO DE 2004

APLICAÇÃO DO MÉTODO FUZZY PARA RECONHECIMENTO DE PADRÕES
EM PERFIS DE POÇOS DO CAMPO DE NAMORADO – BACIA DE CAMPOS

ANA CAROLINA GONÇALVES TAVARES MAGALHÃES

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO
OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “TRABALHO FINAL DE CURSO”.

SETOR: GEOFÍSICA

ORIENTADOR: PROF. DR. JADIR DA CONCEIÇÃO DA SILVA

APROVADA POR:

Prof. Dr. Jadir da Conceição da Silva. UFRJ

Prof. Msc. José Agnelo Soares, UFRJ

Prof. Dr. Klaus Cozzolino, UFPA

FICHA CATALOGRÁFICA

Magalhães, Ana Carolina G.T.

Aplicação do método fuzzy para reconhecimento de padrões em perfis de poços do Campo de Namorado – Bacia de Campos/ Ana Carolina G.T. Magalhães- Rio de Janeiro,2004.

Este trabalho é dedicado a minha mãe Eliane, ao meu irmão Maximiliano, ao meu marido Luiz Sergio e a todos os meus amigos e professores que tanto contribuíram para minha formação.

SUMÁRIO

Agradecimentos	VII
Resumo	VIII
Abstract	IX
Lista de figuras	X
Lista de gráficos e tabelas	XII
1- Introdução	1
1.1- Objetivos	2
2- A Indústria do Petróleo	3
2.1- A Indústria do petróleo no Brasil	3
2.2- O modelo de negócio da indústria do petróleo e a contribuição do presente trabalho.	5
3- O Campo de Namorado	8
3.1- A Bacia de Campos	8
3.2- O Campo de Namorado	12
4- Perfilagem de poço	15
4.1- Geofísica de poço	15
4.2- O ambiente do poço	19
4.3- Perfis utilizados	21
4.3.1- <i>Perfil de raios gama naturais</i>	21
4.3.2- <i>Perfil de resistividade</i>	22
4.3.3- <i>Perfil de densidade</i>	25
4.3.4- <i>Perfil de Nêutrons</i>	26
4.3.5- <i>Perfil Sônico</i>	27
4.4- Eletrofácies	27
5- Lógica Fuzzy	29
5.1- Histórico	29
5.2- Introdução aos conjuntos fuzzy	30

5.3- Aplicação	32
6- Metodologia	38
6.1- Rotina para aplicação da lógica fuzzy na identificação de um padrão	39
6.2- O algoritmo ISODATA	41
6.3- Definição dos padrões	43
6.3.1- Padrão “reservatório com gás”	43
6.3.1.1- Perfil GR	43
6.3.1.2- Perfil ILD	44
6.3.1.3- Perfil de nêutrons	44
6.3.1.4- Perfil de densidade	44
6.3.1.5- Cross over	44
6.3.1.6- Perfil sônico	46
6.3.2- Padrão “folhelho”	46
6.3.2.1- Perfil GR	46
6.3.2.2- Perfil ILD	47
6.3.2.3- Perfil de nêutrons	47
6.3.2.4- Perfil de densidade e sônico	47
6.3.3- Padrão “reservatório com óleo e “reservatório com água””	47
6.3.3.1- Perfil GR	48
6.3.3.2- Perfil ILD	48
6.3.3.3- Perfil de nêutrons	48
6.3.3.4- Perfil de densidade	49
6.3.3.5- Perfil sônico	49
7- Resultados	50
7.1- Perfis sintéticos	50
7.1.1- Sintético 1	51
7.1.2- Sintético 2	54
7.1.3- Sintético 3	57
7.2- Perfis Reais	60
7.2.1- Poço NA 1	61
7.2.2- Poço NA 2	64

<i>7.2.3- Poço NA 4</i>	66
<i>7.2.4- Poço NA 11</i>	69
<i>7.2.5- Poço NA 12</i>	71
<i>7.2.6- Poço RJS 19</i>	74
8- Conclusões	77
Referências Bibliográficas	79
Anexo I- Anasete do poço NA 1	81
Anexo II- Anasete do poço NA 2	83
Anexo III- Anasete do poço NA 4	85
Anexo IV- Anasete do poço NA 11	87
Anexo V- Anasete do poço NA 12	91
Anexo VI- Anasete do poço RJS-19	94

AGRADECIMENTOS

A Agência Nacional do Petróleo, que através do programa de recursos humanos para a indústria do petróleo, PRH-18 (Geologia do Petróleo – UFRJ), concedeu bolsa de graduação e forneceu os dados para realização deste projeto.
Ao Pro. Jadir, pela orientação e condução deste trabalho e a toda comissão do PRH-18 pelo apoio

RESUMO DA MONOGRAFIA APRESENTADA AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM
GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO
REQUISITO OBRIGATÓRIO DA DISCIPLINA “TRABALHO FINAL DE CURSO”

APLICAÇÃO DO MÉTODO FUZZY PARA RECONHECIMENTO DE PADRÕES
EM PERFIS DE POÇOS DO CAMPO DE NAMORADO – BACIA DE CAMPOS

ANA CAROLINA GONÇALVES TAVARES MAGALHÃES

RIO DE JANEIRO, JULHO DE 2004

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jadir da Conceição da Silva

SETOR: Geofísica

O método Fuzzy de reconhecimento de padrões tem sido largamente utilizado na interpretação de dados geofísicos. Estes dados são respostas físicas específicas de formações geológicas. Como os dados normalmente contêm importantes informações físicas da geologia da qual eles resultaram, eles revelam padrões significativos destas estruturas geológicas. Entre os métodos de exploração geofísica, a perfilagem de poços tem grande aplicação na localização e avaliação de recursos minerais, como o petróleo. Um grande desafio que se apresenta é a segmentação destes perfis em zonas capazes de identificar certos padrões encontrados nos reservatórios de petróleo e gás. Um exemplo típico destes padrões é um arenito permo-poroso, levemente argiloso e saturado com óleo. Sabe-se que neste caso, o perfil de raios gama indicará baixo valor de GR, o perfil de resistividade elétrica indicará alto valor de ILD devido a alta resistividade dos hidrocarbonetos, os perfis de porosidade (PHID, PHIN ou PHIS) indicarão de médio a altos valores de porosidade, entre outros. Isto se constitui em um padrão para a fácies arenito c/ óleo, salvo sinais indesejáveis que inevitavelmente contaminam os perfis. O problema aqui proposto é caracterizar os reservatórios utilizando estes padrões geofísicos de poço. Na primeira etapa do trabalho aplicou-se a regra fuzzy, com auxílio do software MATLABTM, a fim de assinalar as zonas que apresentassem os padrões folhelho, rocha reservatório com água, rocha reservatório com gás e rocha reservatório com óleo, utilizando-se a técnica de agrupamento não supervisionado dos perfis sintéticos de poços e os vínculos físicos necessários a caracterização de cada padrão. Na segunda etapa, a técnica proposta foi aplicada em perfis compostos do Campo de Namorado, Bacia de Campos. Os resultados foram coerentes com a interpretação litológica prévia esperada para os perfis sintéticos e observadas em testemunhos dos perfis reais.

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL
JULHO DE 2004

ABSTRACT OF THE MONOGRAPH PRESENTED TO THE UNDERGRADUATE COURSE OF GEOLOGY OF THE FEDERAL UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO AS OBLIGATORY FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS OF THE DISCIPLINE "TRABALHO FINAL DE CURSO"

APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO RECOGNIZE PATTERNS IN WELL LOGS, IN NAMORADO FIELD, CAMPOS BASIN

ANA CAROLINA GONÇALVES TAVARES MAGALHÃES

RIO DE JANEIRO, JULY 2004

SUPERVISOR: Prof. Dr. Jadir da Conceição da Silva

SECTOR: Geophysics

The fuzzy pattern recognition method has been used for the interpretation of some geophysical exploration data. These data are physical responses from geologic formations, and give important informations about some patterns that are found in geological sets. Amongst the geophysical exploration methodologies, borehole logging has an effective role in the location and evaluation of geological resources. A great challenge is identify some oil and gas reservoir's patterns. One exemple of these patterns is a sandstone, with high porosity and permeability saturated with oil. In this case we should have low values in the gamma ray log, great values in resistivity logs, and also high values in the porosity logs. These features characterize the pattern called "sandstone oil saturated". The main objective of this project was to develop a technique using fuzzy logic to recognize oil and gas depth intervals in Namorado oil field, Campos` Basin well logs. In the first part of this project, the fuzzy method was applied using the MATLAB™ software, to identify areas with shale, reservoir with gas, oil and water saturated intervals from synthetic logs. Used the borehole data were GR, PHIN, ILD, RHOB and DT, in them defined the standards features. In a second part, the proposed technique was applied in borehole logs from Namorado Field, Campos Basin. The results were consonant with previous lithologic interpretation.

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL
JULHO DE 2004

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Bacia de Campos	9
Figura 2: Seção geológica esquemática das bacias sedimentares Brasileiras, com ênfase na Bacia de Campos.	10
Figura 3: Carta estratigráfica da Bacia de Campos	11
Figura 4: Localização do Campo de Namorado	13
Figura 5: Seção sísmica representativa do Campo de Namorado	13
Figura 6: Esquema da perfilagem de poço	17
Figura 7: Desenho esquemático indicando a escala dos perfis de poço	17
Figura 8: Esquema comparativo da escala da perfilagem com micro escalas	18
Figura 9: Esquema comparativo da escala da perfilagem com macro escalas	18
Figura 10: Figura esquemática do ambiente do poço	20
Figura 11: Forte relação entre os perfis GR e SP	22
Figura 12: Esquema de funcionamento da ferramenta de eletrorresistividade	25
Figura 13: Conceito de eletrofácies	28
Figura 14: Grau de pertinência dos conjuntos fuzzy	33
Figura 15: Conjuntos fuzzy e variáveis lingüísticas.	33
Figura 16: Sistema de inferência fuzzy	36
Figura 17: Resolução dos diferentes tipos de sondas	51
Figura 18: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil Sintético 1.	54
Figura 19: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil Sintético 2.	57
Figura 20: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil Sintético 3.	60
Figura 21: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil NA 1.	63
Figura 22: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil NA 2.	66
Figura 23: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil NA 4.	68

Figura 24: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil NA 11.	71
Figura 25: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil NA 12.	73
Figura 26: Perfis gerados e interpretação com a lógica fuzzy para o perfil RJS 19.	76

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1: Características do Campo de Namorado	14
Tabela 2: Características, vantagens e desvantagens da lógica fuzzy	37
Tabela 3: Minerais e Fluidos considerados na elaboração dos perfis sintéticos.	50
Gráfico 1: Critério do mínimo valor da “validade fuzzy”	42
Gráfico 2: Perfil X Perfil do perfil sintético 1, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	52
Gráfico 3: Perfil X Perfil do sintético 1, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	52
Gráfico 4: Perfil X perfil do perfil sintético 1 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	53
Gráfico 5: Perfil X Perfil do perfil sintético 2, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	55
Gráfico 6: Perfil X Perfil do sintético 2, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	55
Gráfico 7: Perfil X perfil do perfil sintético 2 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	56
Gráfico 8: Perfil X Perfil do perfil sintético 3, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	58
Gráfico 9: Perfil X Perfil do sintético 3, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	58
Gráfico 10: Perfil X perfil do perfil sintético 3 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	59
Gráfico 11: Perfil X Perfil do perfil NA 1, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	62
Gráfico 12: Perfil X Perfil do NA 1, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	62
Gráfico 13: Perfil X perfil do perfil NA 1 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	63
Gráfico 14: Perfil X Perfil do perfil NA 2, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	64

Gráfico 15: Perfil X Perfil do NA 2, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	65
Gráfico 16: Perfil X perfil do perfil NA 2 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	65
Gráfico 17: Perfil X Perfil do perfil NA 4, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	67
Gráfico 18: Perfil X Perfil do NA 4, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	67
Gráfico 19: Perfil X perfil do perfil NA 4 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	68
Gráfico 20: Perfil X Perfil do perfil NA 11, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	69
Gráfico 21: Perfil X Perfil do NA 11, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	70
Gráfico 22: Perfil X perfil do perfil NA 11 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	70
Gráfico 23: Perfil X Perfil do perfil NA 12, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	72
Gráfico 24: Perfil X Perfil do NA 12, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	72
Gráfico 25: Perfil X perfil do perfil NA 12 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	73
Gráfico 26: Perfil X Perfil do perfil RJS 19, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.	74
Gráfico 27: Perfil X Perfil do RJS 19, após excluídos os pontos identificados como “reservatório com gás”	75
Gráfico 28: Perfil X perfil do perfil RJS 19 após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.	75

1 INTRODUÇÃO

A atividade de exploração de petróleo demanda altos riscos e grandes investimentos. Quanto mais ferramentas se dispuser para minimizar os riscos sem adicionar custos em demasia, melhor para a empresa interessada na exploração. A metodologia proposta neste trabalho é apresentada como uma ferramenta adicional que, juntamente com outras disponíveis, aumenta a confiabilidade da avaliação de reservatórios potenciais.

Os perfis de poços têm grande aplicação na localização e avaliação de recursos minerais, dentre eles, o petróleo. A segmentação destes perfis em zonas capazes de identificar certos padrões encontrados nos reservatórios de petróleo e gás pode ser feita, por exemplo, por análise discriminante, redes neurais ou análise de “clusters”. A metodologia fuzzy, utilizada neste trabalho, foi originalmente proposta por Zadeh (1965), como aperfeiçoamento dos métodos de agrupamento já existentes. Ela é uma técnica numérica de seleção e agrupamento de dados que apresentam certo grau de similaridade entre si. Este grau de similaridade é especificado por uma matriz de partição ou “*membership grade*”. O agrupamento se processa a partir de um número ótimo de grupos, criteriosamente selecionado. Foi adotado o critério de mínimo valor da medida de “Validade Fuzzy”, proposta por Fukuyama & Sugeno (1989). Os perfis utilizados foram: Raios Gama Naturais (GR), Resistividade (Rt), Porosidade Neutrônica (PHIN), Densidade (RHOB) e Tempo de Trânsito intervalar (DT) do perfil sônico convencional (Ellis, 1987), primeiramente em perfis sintéticos e depois em perfis reais, provenientes do Campo de Namorado, Bacia de Campos.

Embora tenham sido usados perfis compostos, vale ressaltar que a técnica empregada é de “agrupamento não supervisionado”, ou seja, não se baseia em treinamento prévio com testemunhos. Eles só foram usados para comparar os resultados via “regra fuzzy” com dados reais (testemunhos). Em substituição a este treinamento, foram usados “vínculos físicos” e os conceitos de “corte α ” e “freqüência” para definir lingüisticamente os padrões a serem reconhecidos.

Na primeira etapa deste trabalho, definiu-se os padrões folhelho, reservatório com água, reservatório com óleo e reservatório com gás, a fim de identificar os segmentos dos perfis que apresentassem estes padrões. Foram formulados perfis sintéticos, com litologias pré-definidas, para desenvolvimento da metodologia de identificação. Numa segunda etapa, a técnica elaborada foi então aplicada em dados reais do Campo de Namorado.

Os resultados obtidos foram coerentes com o que se esperava para os perfis sintéticos e reais. A técnica desenvolvida demonstrou então ser adequada para segmentação de perfis, identificando zonas de possível acumulação de hidrocarbonetos.

1.1- Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor uma técnica de reconhecimento de padrões, utilizando a lógica fuzzy em perfis de poços do campo de Namorado, Bacia de Campos, a fim de identificar, nestes perfis, padrões encontrados em rocha saturada em óleo, provendo o mercado de mais uma ferramenta que ajude a minimizar os riscos, sem incluir maiores custos adicionais, na localização e avaliação dos reservatórios de óleo e gás.

A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

2.1- A Indústria do petróleo no Brasil

Analisando a indústria brasileira de petróleo, particularmente quanto à evolução nas últimas décadas da demanda e da produção nacional de combustíveis, a situação das reservas de hidrocarbonetos e o novo marco institucional vigente, é possível estabelecer um cenário futuro onde os derivados de petróleo e o gás natural permanecem desempenhando um papel relevante na matriz energética.

Os combustíveis derivados de petróleo e o gás natural respondem por cerca de 30% da atual demanda energética no Brasil, sendo a fonte predominante no setor de transporte, onde atendem a quase 90% do consumo. Embora a produção nacional seja crescente, atingindo 1.500 mil barris diários no começo de 2002, o petróleo é o principal fator de dependência externa da matriz energética brasileira, com as importações em 2001 chegando aos 7.098 milhões de dólares, considerados os derivados, o gás natural e o óleo bruto (ANP, 2001). A indústria brasileira do petróleo e do gás natural, compreendida desde as atividades de exploração e produção até a distribuição e revenda, contribuiu no ano 2000 com 5,4% do PIB a preços básicos (deduzidos os impostos), ou seja, R\$ 52,6 bilhões (ANP,2001). Além de sua relevância econômica e enquanto fonte primária de energia, nos últimos anos tem se observado significativas mudanças no ambiente institucional e empresarial neste setor, sendo certamente oportuno discutir o futuro desses vetores energéticos no contexto brasileiro.

De todas as bacias brasileiras, oito são produtoras de óleo e gás, e delas já foi extraído cerca de 6 bilhões de boe (barril de óleo equivalente). A Petrobrás drena reservatórios sob lâmina d'água com espessura de até quase 2 km. Enquanto isso, fura poços exploratórios em lâminas d'água de 2800m, a 300km da costa. Os maiores investimentos têm ocorrido no oceano, pois é de onde se espera multiplicar as reservas brasileiras, cuja distribuição é muito assimétrica, a exemplo do que acontece no resto do mundo. A Bacia de Campos, onde estão 80% das jazidas, concentra a maior parte da produção nacional. Das reservas brasileiras, 90% se

concentram em bacias *offshore*, sendo 80% em lâminas d'água superiores a 400m. O Rio de Janeiro concentra 47% das reservas de gás natural e o Amazonas 20%.

No total o Brasil tem reservas provadas de 9,8 bilhões de barris de petróleo e condensado e um total de um pouco mais de 13 bilhões, segundo dados da ANP (2001), além de 332 bilhões de m³ de gás natural. Desde 1983, as reservas do país multiplicaram-se por quatro, colocando o Brasil na 16^a posição mundial, pouco abaixo da Argélia. Aparentemente expressivas, as reservas brasileiras de petróleo corresponde somente a 0,8% do total mundial e as de gás, a 0,2%. Estudos recentes indica que o potencial petrolífero brasileiro situa-se entre 14 e 177 bilhões de boe, com valor médio de 81 bilhões de boe.

O conhecimento da extensão e localização das reservas brasileiras de hidrocarbonetos foi incrementado de forma significativa nos últimos anos, como decorrência da Lei do Petróleo (Lei 9.478/97), que redefiniu o papel do Estado na concessão e promoção das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural no Brasil. De acordo com este novo modelo institucional, foram realizadas pela ANP até 2003, cinco rodadas de licitações para concessão de blocos para exploração de hidrocarbonetos, bem como foram regularizadas as áreas que já estavam em exploração pela Petrobrás na época da promulgação da Lei do Petróleo. Atualmente existem 37 companhias de petróleo buscando petróleo no Brasil, trabalhando em 112 blocos, sendo que 67 deles foram disputados em licitações da ANP. Vale comentar que a superfície em prospecção corresponde a menos de 10% da superfície das bacias sedimentares brasileiras.

Em decorrência deste novo quadro pode ser citado o maior esforço em levantamentos sísmicos e em poços exploratórios. As descobertas resultantes deste esforço têm confirmado que nas bacias offshore e principalmente em águas profundas é que se encontram as reservas de maior interesse. Do total de 63 descobertas de óleo em bacias offshore, informadas à ANP entre março de 98 a maio de 91, 63% ocorreram em águas profundas, de 1.000 a 3.000 m, sendo que a metade foi encontrada entre 1.500 a 2.000 m de lâmina d'água.

Com este cenário as perspectivas na área de exploração no Brasil têm atraído investimentos de grandes multinacionais da indústria do petróleo. Assim, o desenvolvimento de mais uma ferramenta que auxilie na identificação de reservatórios potenciais é de enorme interesse do mercado.

2.2 O modelo de negócio da indústria do petróleo e a relevância do presente trabalho.

Uma fórmula simples (Johann,2002) representa o modelo de negócio da indústria do petróleo (Mn_{ip}), englobando todos os pontos importantes a serem considerados e que devem balizar a análise de decisão em todos os setores indústria petrolífera. Com ela também é possível demonstrar em que fatores um trabalho como o aqui apresentado pode ser relevante.

$$Mn_{ip} = T . G . E . MA . C . R$$

onde:

T – Tecnologia

MA - Meio Ambiente

G – Geopolítica

C - Custos

E – Experiência

R -Incertezas e riscos associados ao negócio

O desenvolvimento de novas tecnologias, assim como saber utilizar as ferramentas disponíveis é de máxima importância na indústria do petróleo. Muitas vezes reservatórios com hidrocarboneto são abandonados por serem inviáveis economicamente com a tecnologia existente. As empresas e a comunidade acadêmica trabalham arduamente em projetos de desenvolvimento de novas tecnologias, para tornar os campos que já produzem ainda mais produtivos, adquirir melhor proveito de campos maduros, transformar recursos em reservas, otimizar e aumentar o sucesso nas fases de exploração e desenvolvimento. A ferramenta de identificação de padrões em perfis de poços utilizando a lógica fuzzy é mais um desenvolvimento tecnológico que pode atuar, na fase de exploração, na identificação de possíveis reservatórios. Integrada com outras ferramentas disponíveis e associada a sísmica é possível fazer uma modelagem 3D do reservatório,

umentando o conhecimento do mesmo, tornando os projetos de exploração e desenvolvimento mais consistentes. Em poços exploratórios, fazendo uso de modernas ferramentas como LWD (*logging while drilling*), em que a perfilagem é realizada durante a perfuração e os dados são enviados em tempo real para a superfície, a disponibilidade de um recurso que integra os dados da perfilagem e em poucos segundos reconhece padrões como folhelhos e reservatórios é de grande valia nas análises de decisão que têm que ser tomadas em espaços curtos de tempo.

A geopolítica é um fator crítico. O petróleo é de tal importância que por muitas vezes na história moderna da humanidade foi responsável por estados de guerra e de paz. A indústria petrolífera é um setor estratégico para qualquer país, dela depende, sobretudo, a dependência externa do país, com grande impacto na balança comercial. Quanto mais reservas o país tiver, quanto maior a sua capacidade de produção e refino de óleo, mais independente economicamente este país será. O sucesso exploratório é o que garante, em parte, esta independência. Fazendo uso de tecnologias mais avançadas, novas técnicas de exploração e produção, maior a possibilidade de sucesso.

A experiência da empresa no setor petrolífero é determinante para que a mesma seja bem sucedida. Aqui considera-se um conjunto que engloba a experiência de seus profissionais. O profissional da indústria do petróleo tem que ter um olhar crítico e abrangente, não pode ser um mero espectador dos fatos. Não adianta existir novas tecnologias, novos cenários geopolíticos se o profissional não souber utilizar estes elementos a seu favor. Mais adiante, quando for abordado o mecanismo da lógica fuzzy, será possível observar que a técnica desenvolvida permite que se inclua no processo de identificação a experiência do operador, o chamado conhecimento especialista. Sendo assim, o profissional pode reconhecer falhas, propor melhorias, identificar novos padrões e não ser apenas o operador da técnica.

O meio ambiente é cada vez mais valorizado, não só na indústria do petróleo, mas na comunidade em geral. As empresas do petróleo têm adotado um

compromisso em equilibrar questões econômicas, ambientais e sociais nas decisões de negócio.

Outro fator de extrema relevância, não só na indústria do petróleo, são os custos envolvidos nas operações da empresa. Nas etapas exploratórias os custos são muito elevados. O recurso físico que a técnica aqui proposta necessita é um computador convencional e o software MATLABTM, assim, não se tem maiores custos envolvidos para a utilização. Outra vantagem é a possibilidade de auxílio na modelagem 3D de reservatórios, juntamente com a sísmica, sobretudo em poços sem testemunhos.

Tão elevados quanto os custos são os riscos envolvidos. A exploração de petróleo é uma atividade de alto risco, muitos poços perfurados, que custam alguns milhões de dólares, são poços secos, sem hidrocarboneto. Porém, um único poço com capacidade produtiva gera dividendos capazes de suportar os insucessos exploratórios. É sabido que quanto mais conhecimento se tem, menores serão as incertezas na avaliação dos potenciais reservatórios. Assim, quanto mais ferramentas se dispuser para gerar mais conhecimento, sem adicionar maiores custos, menor será o risco envolvido. E a técnica descrita neste trabalho se propõe exatamente a aumentar o conhecimento na identificação de padrões em perfis de poços, sem adicionar custos vultuosos, ajudando então a diminuir o risco associado as atividades de exploração.

3 CAMPO DE NAMORADO

3.1- A Bacia de Campos

A Bacia de Campos, localizada no SE do Brasil é a mais importante província petrolífera do país, com cerca de 90% das reservas – $8,0 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ – com 80% da produção média do país, produzindo cerca de 1600000barris/dias (ANP 2001).

Esta bacia tem a dimensão aproximada de 100000 km², estando limitada a norte pelo alto estrutural de Vitória e ao sul, pelo alto estrutural de Cabo Frio (figura 1). Atinge a cota batimétrica de 3400m.

A Bacia de Campos pode ser classificada como do tipo *pull apart*, numa margem passiva e divergente, preenchida desde o Neocomiano por cerca de 7000m de rochas, principalmente rochas vulcânicas básicas, lamitos, calcáreos, margas, evaporitos e arenitos. O preenchimento sedimentar é dividido em cinco mega seqüências (Bruhn 1983 *apud* Johann 2002):

- Continental syn-rift (do início do Neocomiano ao início do Aptiano)
- Evaporítico transicional (Aptiano médio ao início do Albiano)
- Plataforma carbonatada (início ao meio do Albiano)
- Marinha transgressiva (fim do Albiano ao início do Terciário)
- Marinha Regressiva (início do Terciário até o presente)

As rochas geradoras são os lamitos lacustres depositados durante a fase rift. Uma fase de halocinese reativou falhas da fase rift. Os primeiros corpos de arenitos turbidíticos estão depositados nos pontos baixos definidos pelo paleo relevo ligados a *pillows* de sal Cenomanianos. A figura 2 representa uma seção esquemática da Bacia de Campos e a figura 3 é a carta estratigráfica, onde é possível localizar estas seqüências e as principais geradoras e os reservatórios.

A bacia conta com mais de 1000 poços de exploração e produção, mais de 500000km de linhas sísmicas, sendo 200000km em 2D e 300000km em 3D (Johann, 2002). A Bacia de Campos conta ainda com mais de 50 acumulações de hidrocarbonetos, das quais seis são de jazidas gigantes situados a lâminas d'água superiores a 1000m. Os arenitos turbidíficos representam mais de 85% dos reservatórios locais.

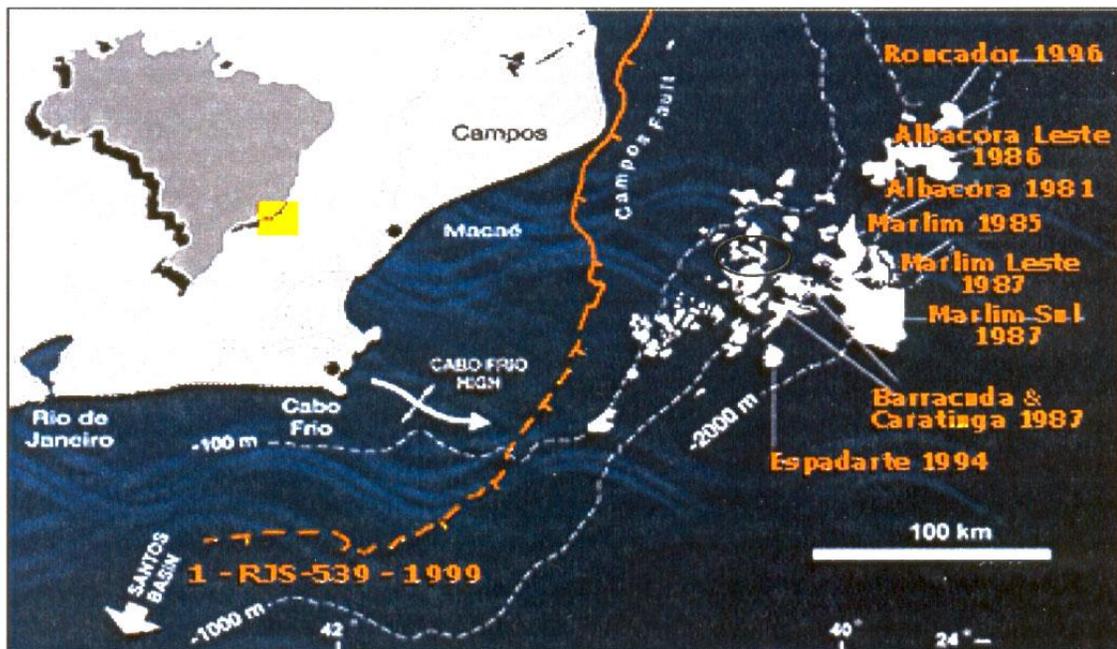


Figura 1: Localização da Bacia de Campos, com indicação dos seus limites, das cotas batimétricas e dos principais campos (Johann,2002).

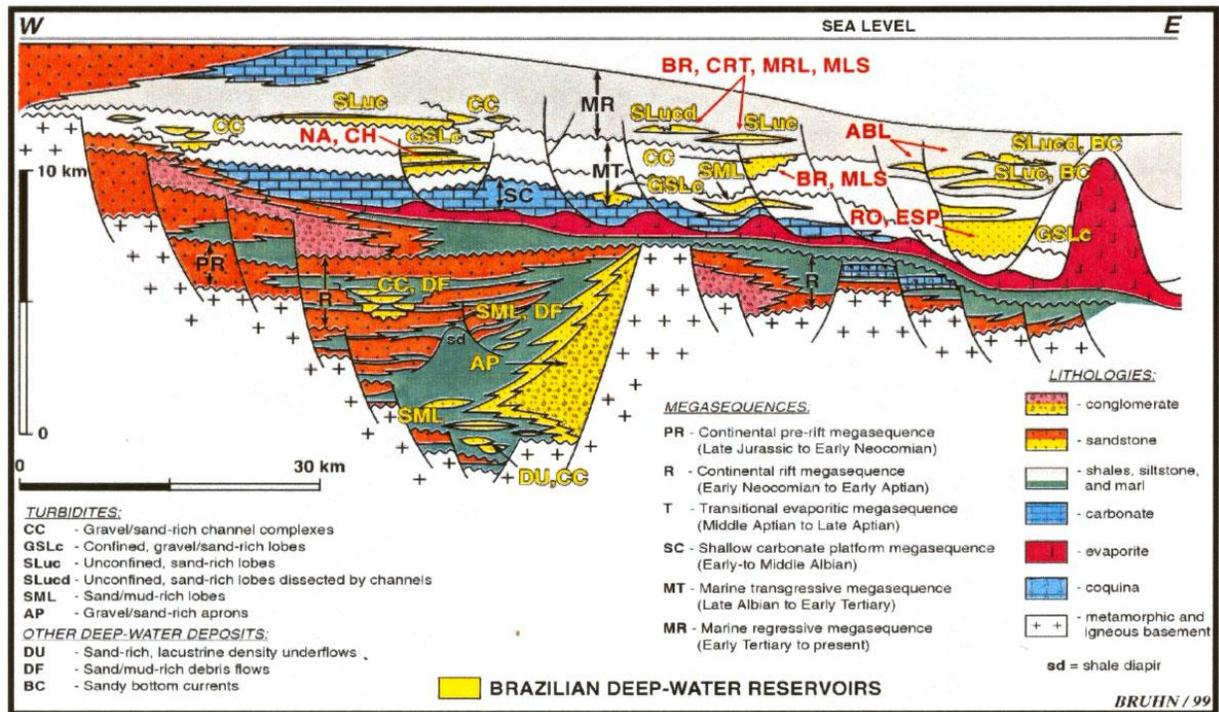


Figura 2: Seção geológica esquemática das bacias sedimentares brasileiras, com ênfase na Bacia de Campos. (Bruhn, 1998 apud Johann, 2002)

CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DE CAMPOS

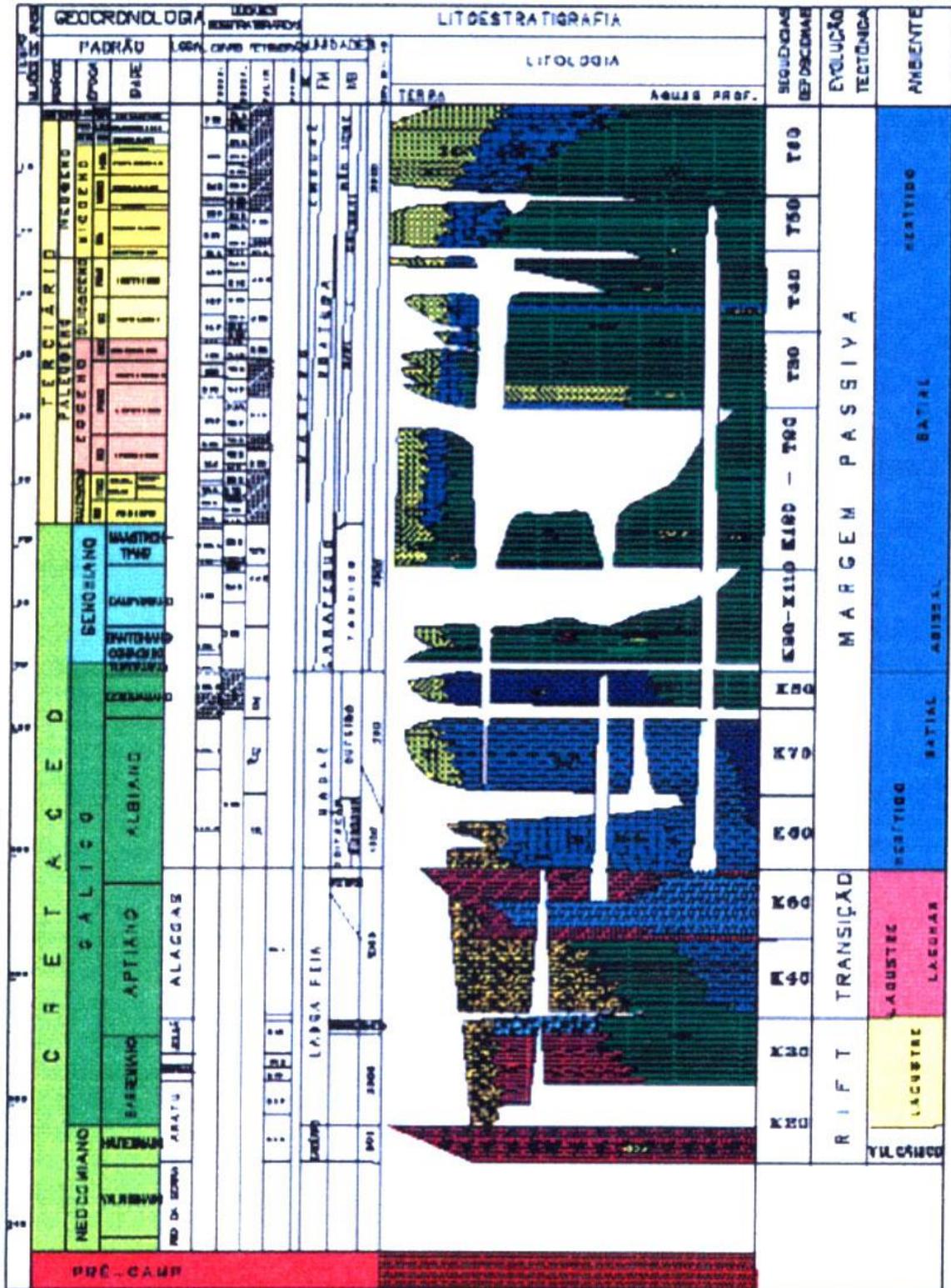


Figura 3: Carta estratigráfica da Bacia de Campos. (extraída do site da ANP, 2001)

3.2- O Campo de Namorado

O Campo de Namorado foi o primeiro campo gigante descoberto na plataforma continental brasileira, em 1975, pelo poço 1-RJS-19. Situa-se a 80km da costa, em cotas batimétricas variáveis de 110m a 150m, como pode ser visto na figura 4. Em profundidade, o reservatório situa-se entre 2900m e 3400m.

O reservatório principal do campo é constituído por arenitos turbidíticos Namorado, de idade Albiano Superior a Cenomaniano Médio/Superior. Esta unidade sedimentar compõe a porção superior da Formação Macaé (pertencendo a megasequência marinha transgressiva), se depositando nos períodos de abaixamento relativo do nível do mar. Os arenitos turbidíticos compoem corpos isolados inseridos em depósitos de baixa energia (calcilutito, margas e folhelhos), assentados diretamente sobre uma plataforma carbonática albiana (Menezes, 1990 *apud Johann 2002*). A trapa é mista, sendo estratigráfica e estrutural. O reservatório é limitado por fechamentos estratigráficos, *pinch-outs*, ao norte e ao sul. A oeste, leste, sudoeste, nordeste e sudeste, é limitado por falhas normais. O reservatório possui uma espessura que varia entre 5m e 130m, cuja porosidade e permeabilidade média são respectivamente 26% e 400mD. A figura 5 demonstra uma seção sísmica ao longo do reservatório. As principais características do Campo de Namorado estão sumarizadas na Tabela 1.

O óleo produzido neste campo é relativamente pesado (25° a 30° API), cujas rochas geradoras são os sedimentos lacustrinos da parte inferior da Formação Lagoa Feia, que alcançaram maturidade durante o Eoceno-Oligoceno. O volume original de óleo *in place* é da ordem de 103 milhões de m³ (Johann,2002).

A escolha do campo de Namorado para testar a técnica proposta neste trabalho se deveu ao fato de este campo já ter sido bastante estudando, além da disponibilidade dos dados, cedidos pela ANP, sendo reconhecidamente um campo escola. Sendo assim, foi possível avaliar a validade na utilização da lógica fuzzy no reconhecimento de padrões em uma situação real. A complexidade na caracterização deste reservatório, com muitas variações litológicas tanto verticalmente quanto

horizontalmente, torna este campo ideal para o reconhecimento da eficácia da técnica no reconhecimento dos padrões.

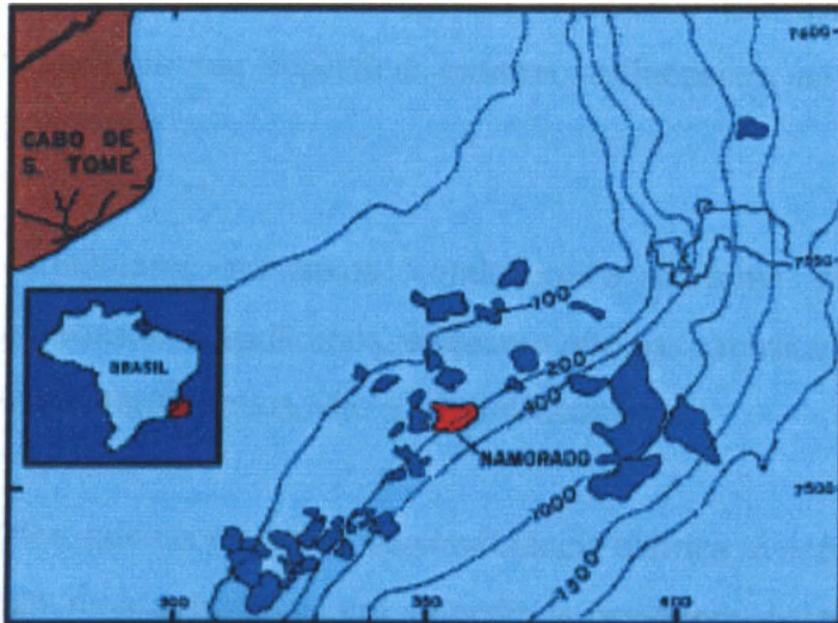


Figura 4: Localização do Campo de Namorado.(modificado de Menezes,1990 apud Johann 2002)

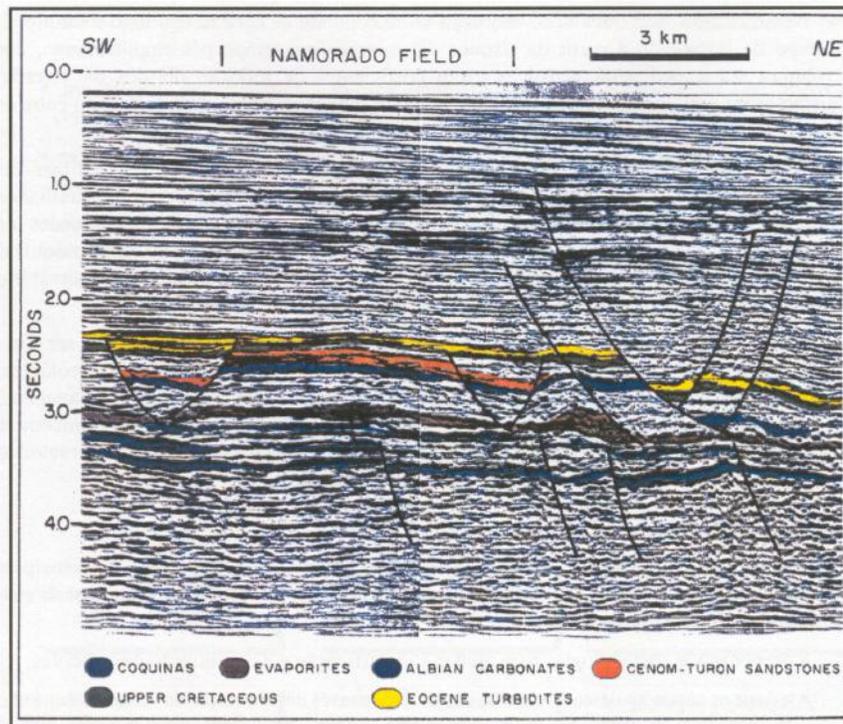


Figura 5: Seção sísmica ao longo do reservatório. Salienta-se o substrato irregular que controla os depósitos do Campo de Namorado.(Guardado *et al.*, 1990 apud Johann, 2002).

Tabela 1: Principais características do Campo de Namorado

Características	Campo de Namorado - Bacia de Campos
Reservatório principal	Arenito Namorado
Sistema de depósito	Turbiditos
Idade	Cenomaniano Inferior
Lito-estratigrafia	porção superior da Formação Macaé
Profundidade	variável entre 2.940m e 3.300m
Dimensão fechada	21 km ²
Tipo de “armadilha”	mista: estrutural e estratigráfica
Geometria externa	lenticular/tubular
Limite inferior	calcários da Formação Macaé
Limite superior	lamitos e margas da Formação Macaé
Limites norte e sul	fechamento estratigráfica - “ <i>pinchout</i> ”
Limites leste e oeste	falhas de crescimento
Espessura	média de 60m, variável de 5m à 130m
Comprimento	média de 4 km, variável de 2 km à 6 km
Extensão	entre 9 km e 14 km com comunicação de pressão
Geometria interna	heterogênea de baixo grau
Estruturas primárias	arenitos maciços dominantes
Mineralogia do reservatório	arenitos arcósicos
Textura	grãos finos à grosseiros
Classificação e granulométrica	Má seleção; variável com grau fraco de esfericidade
Porosidade	15 a 32%
Permeabilidade	60 a 2500 mD

4 PERFILAGEM DE POÇO

4.1- Geofísica de poço

O perfil de um poço é a representação, em relação a profundidade, de uma ou mais propriedades físicas aparentes das formações (rocha e fluidos) transpassadas por uma sonda em deslocamento contínuo dentro de um poço.

A obtenção de um perfil geofísico de poço, ou a medição dos parâmetros físicos da rocha (petrofísicos) *in loco*, se inicia a partir da descida ao fundo de um poço, de uma complexa aparelhagem mecânico-eletrônica, chamada sonda de perfilagem. Os perfis de poço são obtidos pelo deslocamento ascensional, constante e uniforme de uma sonda, conforme esquema da Figura 6.

A geofísica de poço é a responsável pela produção de um conjunto de medidas físicas da formação rochosa, com melhor precisão e maior rapidez de operação do que as técnicas convencionais de testemunhagem. Além disso, se considerarmos as ocorrências de formações compostas por rochas inconsolidadas, onde é impossível a obtenção de testemunhos, os perfis geofísicos de poço são a única forma de obtenção *in loco* de informação sobre a presença e, principalmente, sobre a quantificação de hidrocarbonetos nas rochas em subsuperfície.

As ferramentas de perfilagem registram diversas características e propriedades das rochas, que podem ser elétricas, nucleares ou acústicas. Com os sensores elétricos, detecta-se, por exemplo, a resistividade das rochas e a identificação das mesmas e dos fluidos se dá através de comparações dos valores obtidos na perfilagem com os valores das resistividades de diversas rochas conhecidas e determinadas em testes de laboratório. Com os sensores nucleares, detecta-se a intensidade de radioatividade das rochas e dos fluidos em seus poros, podendo-se inferir a composição mineralógica das mesmas. Com as ferramentas acústicas, ultrasons são emitidos em uma extremidade da ferramenta a intervalos regulares e detectados em sensores na outra extremidade. O tempo que o sinal sonoro levou para percorrer esta distância fixa e conhecida (chamado de tempo de trânsito) através da parede do poço (ou seja, pela rocha) é medido e gravado no perfil. O geofísico, mais tarde, compara estes tempos de trânsito com os tempos

determinados em laboratório para rochas de composições conhecidas, inferindo, desta maneira, as composições mineralógicas das rochas atravessadas pelo poço e determinando suas profundidades. São denominados genericamente de perfis elétricos, independente do processo físico de medição utilizado.

As principais utilizações para os perfis são:

- Identificação litológica.
- Identificação do ambiente geológico.
- Contato entre os fluidos nos reservatórios.
- Detecção e atitude de fraturas.
- Estimativa do volume de hidrocarboneto *in place*.
- Estimativa do volume de óleo recuperável.
- Determinação da salinidade da água.
- Determinação da pressão no reservatório.
- Determinação da porosidade/ distribuição e tamanho dos poros.
- Mapeamento da qualidade dos reservatórios.
- Probabilidade de comunicação de fluidos inter poços.
- Monitoramento da movimentação dos fluidos nos reservatórios.
- Possibilidade de fluxo de água no reservatório.
- Interação com a sísmica para integração de dados em 3D.

As Figuras 7, 8, e 9 mostram a escala de trabalho da perfilagem de poço, que corresponde a escala da formação geológica.

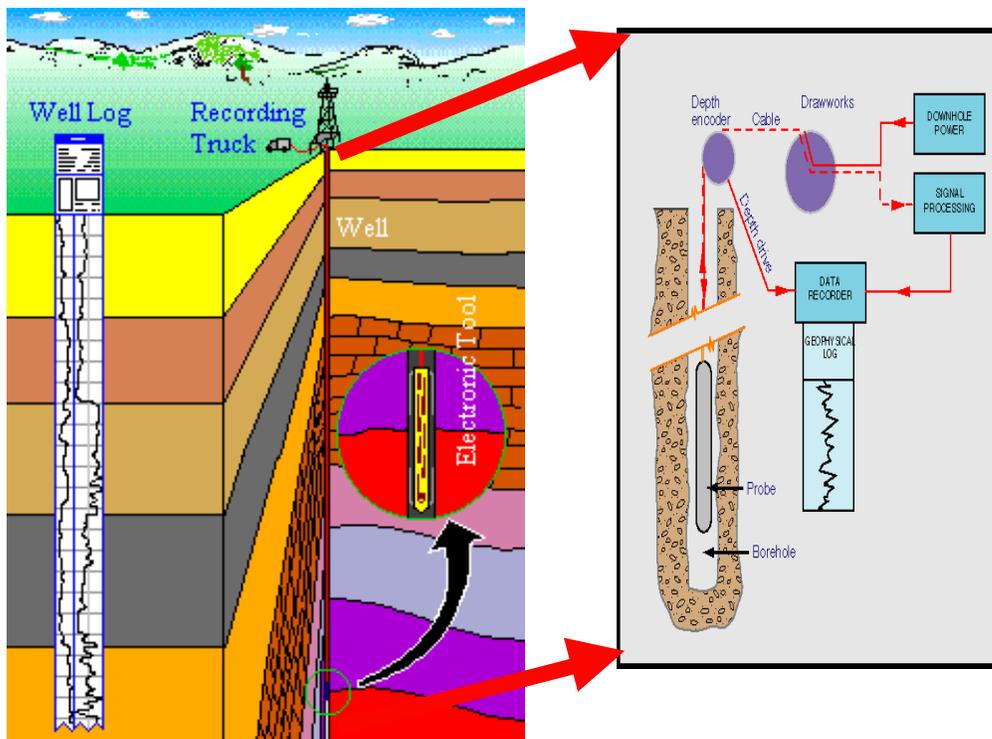


Figura 6: Esquema da perfilagem de poço onde uma sonda, em seu movimento de ascensão, registra as características físicas das formações atravessadas. (modificado do esquema do IF/UFRJ)

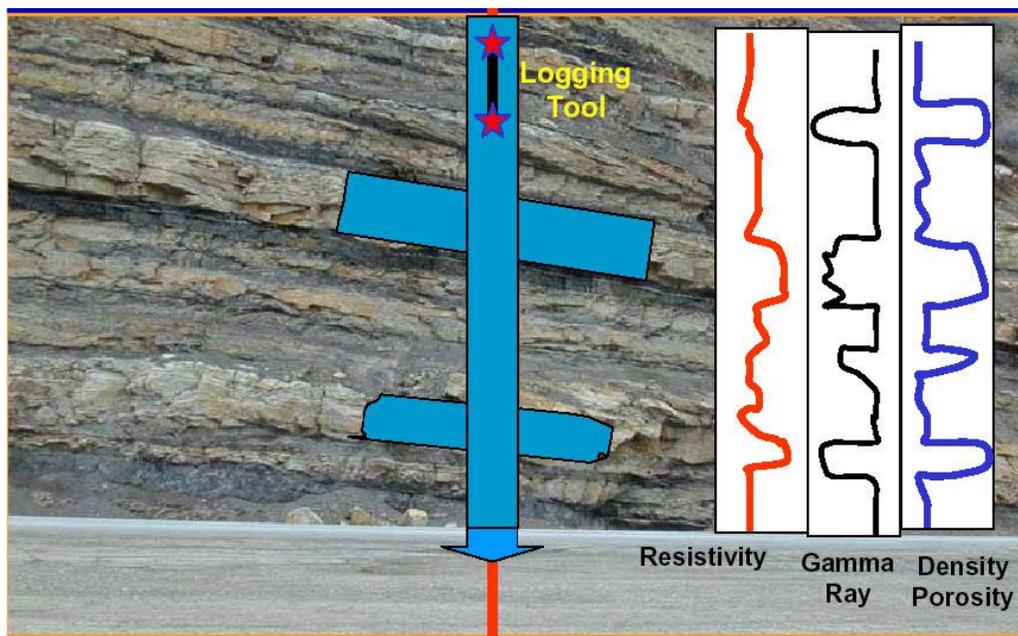


Figura 7: Desenho esquemático indicando a escala da perfilagem de poço, cujos perfis lêem as características das formações. (Extraído de Silva, 2002)

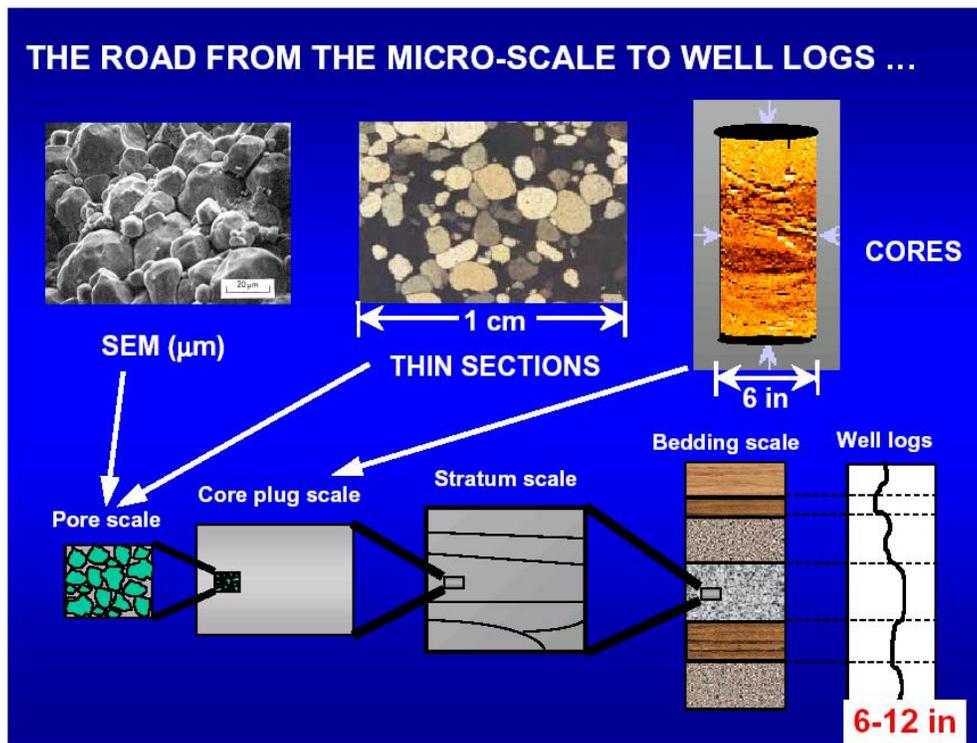


Figura 8: Os perfis de poço correspondem a escala de formação. O esquema acima mostra a evolução do nível de detalhe, desde uma micro escala até a meso escala da perfilagem de poço. (Extraído de Silva, 2002).

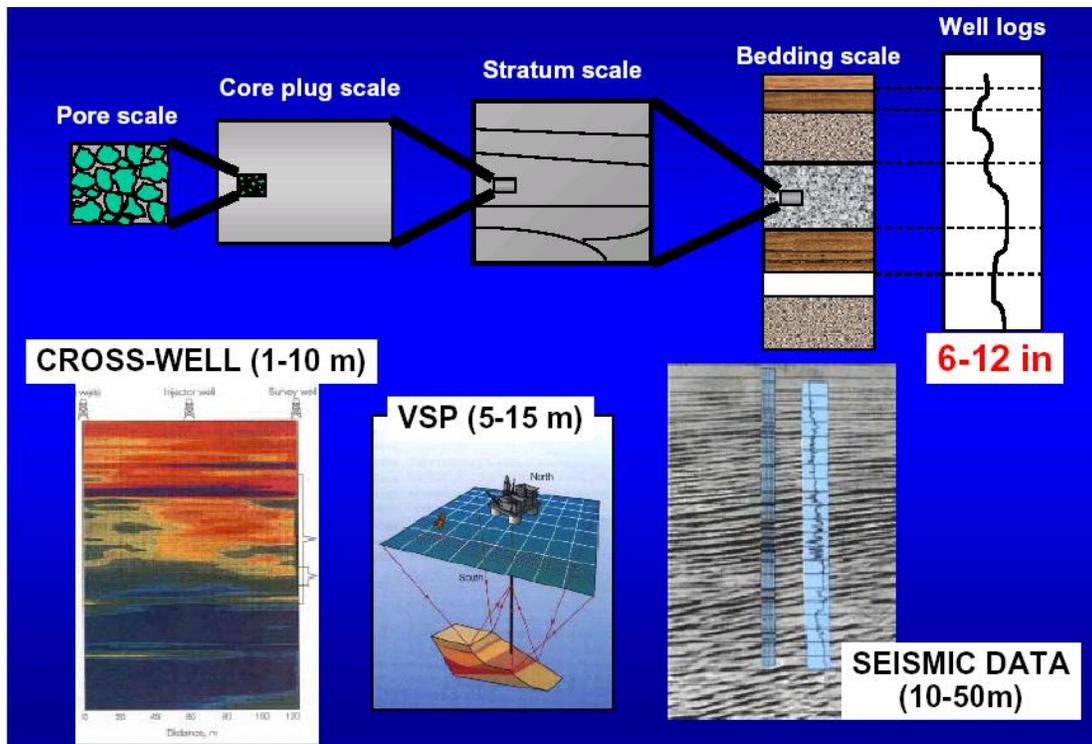


Figura 9: Continuação do esquema da figura 8, seguindo o caminho da meso escala da perfilagem a macro escala da prospecção sísmica. (Extraído de Silva, 2002).

4.2- O ambiente do poço

O ambiente do poço, onde as medidas de perfilagem são feitas, é de grande interesse do ponto de vista dos projetos para construção de sondas e na determinação das limitações da mesma. Além disso, é importante em relação a perturbação que pode causar na formação em torno, das quais se quer medir os parâmetros.

Os poços para produção de petróleo e gás atingem geralmente profundidades entre 300m e 6000m, com diâmetros variando entre 12,7cm e 38cm. É muito raro encontrar um poço realmente vertical, geralmente há um desvio entre 0° e 5° *onshore* e 20° a 40° *offshore*. A temperatura no fundo do poço varia, em geral, de 37°C a 150°C.

O fluido de perfuração possui densidade que varia de 1,078 a 1,917 g/cm³, quando é adicionado ao mesmo aditivos que aumentam o peso específico do fluido (como barita e hematita), para garantir que a pressão hidrostática no poço seja maior que a pressão dos fluidos da formação a fim de prevenir acidentes, como *blow-outs*. A salinidade do fluido de perfuração fica em geral entre 3000 e 200000 ppm de NaCl. Esta salinidade, junto com o fato do poço estar pressurizado, provoca a invasão do fluido em formações porosas e permeáveis. O resultado do processo de invasão pode ser visualizado na Figura 10. Nas zonas permeáveis, devido ao desequilíbrio na pressão hidrostática, o fluido começa a penetrar na formação, mas esta invasão dura pouco tempo devido a formação de uma camada formada pelas partículas sólidas do fluido, conhecida como *mudcake*.

Essa invasão provoca distorções nos perfis elétricos. Por isso foi desenvolvido um modelo simples de resistividades considerando esta zona invadida (zona lavada). Sendo chamado de R_t a resistividade da formação (zona não invadida), R_s a resistividade das formações adjacentes, R_{xo} a resistividade da zona invadida, a qual pode ser determinada através dos perfis de micro resistividade. Ainda é possível considerar uma zona de transição entre a zona lavada e a zona não invadida. Este ambiente está demonstrado na Figura 10.

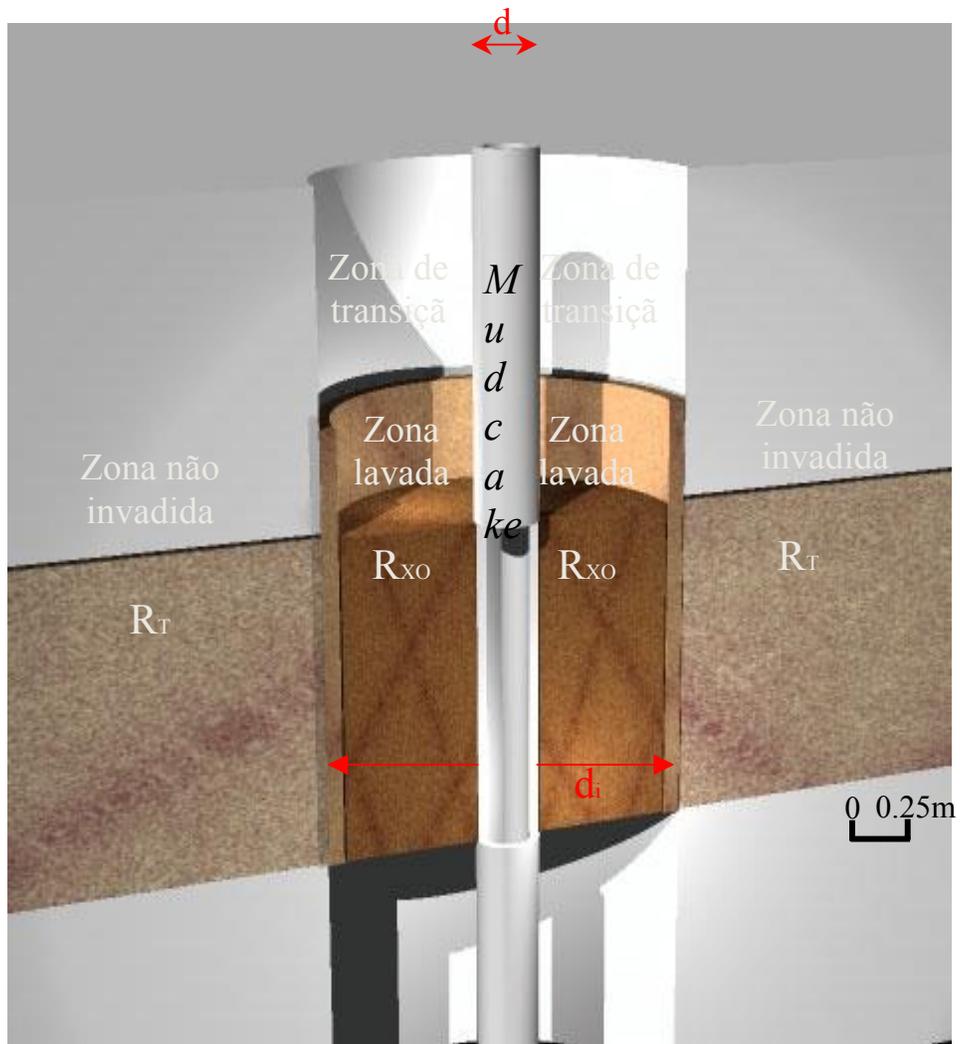


Figura 10: Figura esquemática do ambiente do poço, indicando a zona invadida pelo filtrado e a zona não invadida e as respectivas resistividades.

4.3- Perfis utilizados

Neste trabalho, devido a disponibilidade de dados da ANP para o Campo de Namorado, foram usados os perfis de raios gama naturais (GR), resistividade (ILD), tempo de trânsito do perfil sônico convencional (DT), porosidade neutrônica (PHIN) e porosidade do perfil de densidade (RHOB).

4.3.1- PERFIL DE RAIOS GAMA NATURAIS

Mede a radiação natural proveniente da desintegração de núcleos em subsuperfície. As principais séries de decaimento que contribuem para a radiação natural são: Urânio (U), Tório (Th) e Potássio (K). As medidas de perfis são expressas em unidade padrão API, que é a medida da radioatividade de uma rocha padrão com quantidades determinadas de tório, urânio e potássio (como exemplo, uma formação contendo aproximadamente 4% de K, 24ppm de Th e 12ppm de U é definida como 200° API).

A sonda é constituída de um cintilômetro que detecta a desintegração total de todas as fontes localizadas numa região radial próxima ao poço.

Este perfil, em geral, reflete o conteúdo de seqüências argilosas em virtude das concentrações de elementos radioativos presentes nos minerais argilosos dos folhelhos, funcionando como um indicador litológico. Perfis GR e SP (se a salinidade da lama for menor que a da água de formação) têm uma forte correlação, ambos defletem para a esquerda para assinalar arenito limpo e para a direita para denotar folhelhos (Figura 11). O perfil GR é mais eficaz que o SP para camadas de menor espessura e pode correr em poços revestidos, sendo usado para delinear zonas para perfuração, além de não ser afetado pela salinidade do fluido de perfuração.

O perfil de raios gama se torna pouco eficaz quando se têm arenitos com elevada radioatividade, como é o caso dos arenitos arcosianos encontrados no Campo de Namorado, devido à concentração de potássio dada pelos feldspatos

presentes na rocha. Este perfil também é prejudicado na presença de dolomitas radioativas e fosfatos.

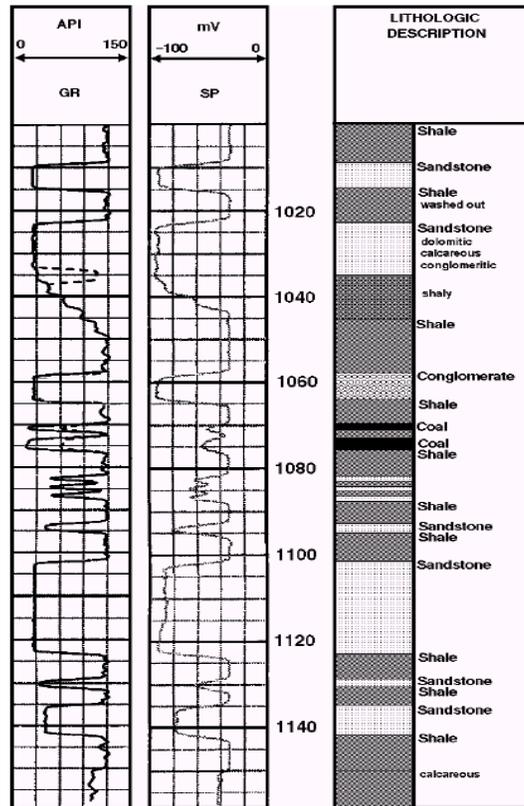


Figura 11: Perfis GR e SP (se a salinidade da lama for menor que a da água de formação) têm uma forte correlação, ambos defletem para a esquerda para assinalar arenito limpo e para a direita para denotar folhelhos.

4.3.2- PERFIL DE RESISTIVIDADE (R_t)

Para a obtenção deste perfil, utiliza-se os resultados dos perfis de indução (ILD) e perfis de resistividade. Por convenção da ANP na publicação dos dados, utiliza-se a sigla ILD para representar os dados de resistividade já processados. Assim, os dados presentes nos perfis aqui apresentados são relativos a resistividade total da formação, já processados.

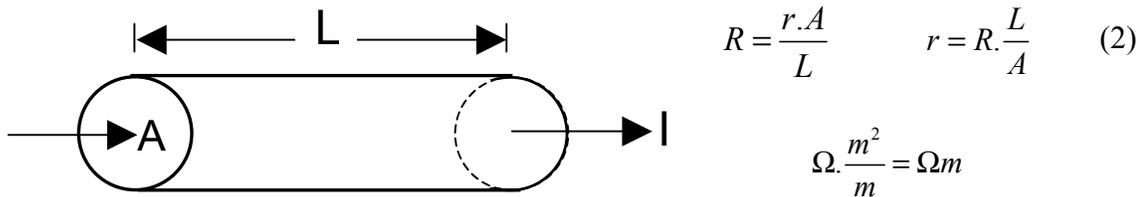
Nos perfis que medem a resistividade aparente das formações introduz-se uma corrente na rocha e estima-se a resistividade das rochas localizadas entre duas esferas equipotenciais vizinhas. Convencionalmente, chama-se de MN o par de eletrodos por meio do qual se mede a diferença de potencial, e de AB o par de eletrodos encarregado da injeção de corrente, como observado na Figura 12.

A resistividade é uma propriedade intrínseca do material. Podemos expressar a resistividade através da seguinte fórmula :

$$R = 1/ n \mu q^2 \quad (1)$$

Onde n é a densidade de íons (número de cargas, concentração), μ é a mobilidade das cargas e q é a carga em si.

No método da resistividade, obtemos o valor da tensão proveniente de uma corrente injetada. A razão entre a tensão e a corrente nos fornece a resistência (r). É necessário então relacionar a resistência (r) a resistividade (R).



Como podemos perceber, a razão A/L corresponde a uma constante geométrica. Esta constante depende do arranjo dos eletrodos.

Este perfil é usado para leitura aproximada de R_{x0} (curvas normais) e de R_T (curvas laterais).

Já o perfil de indução (ILD) mede a condutividade elétrica da formação. A ferramenta é com posta de duas bobinas, um oscilador e dois amplificadores. O oscilador gera uma corrente alternada, que é amplificada, dando origem a um campo magnético primário. Este campo gera as chamadas *Correntes de Foucault*, que dão origem a um campo magnético secundário (função da condutividade da formação). Um detector mede estes campos.

Estes perfis permitem, sobretudo, a análise qualitativa de fluidos. Os hidrocarbonetos e a água doce possuem resistividade mais elevada que a água

salgada, já que esta possui maior quantidade de íons em solução, com maior mobilidade iônica, e, segundo a equação (1), possui menor resistividade.

Os folhelhos também apresentam baixa resistividade, devido a sua elevada capacidade de troca catiônica (CEC - *cation exchange capacity*). Os minerais de argila acumulam cargas negativas na sua superfície. O excesso de cargas é neutralizado pela absorção de cátions hidratados, que são muito grandes para entrarem na rede cristalina, por isso, estes cátions ficam fracamente ligados à parede dos argilo-minerais. Nas soluções iônicas estes cátions podem ser trocados por outros íons em solução. Assim, há o aumento da mobilidade iônica e, segundo a fórmula (1), diminui a resistividade.

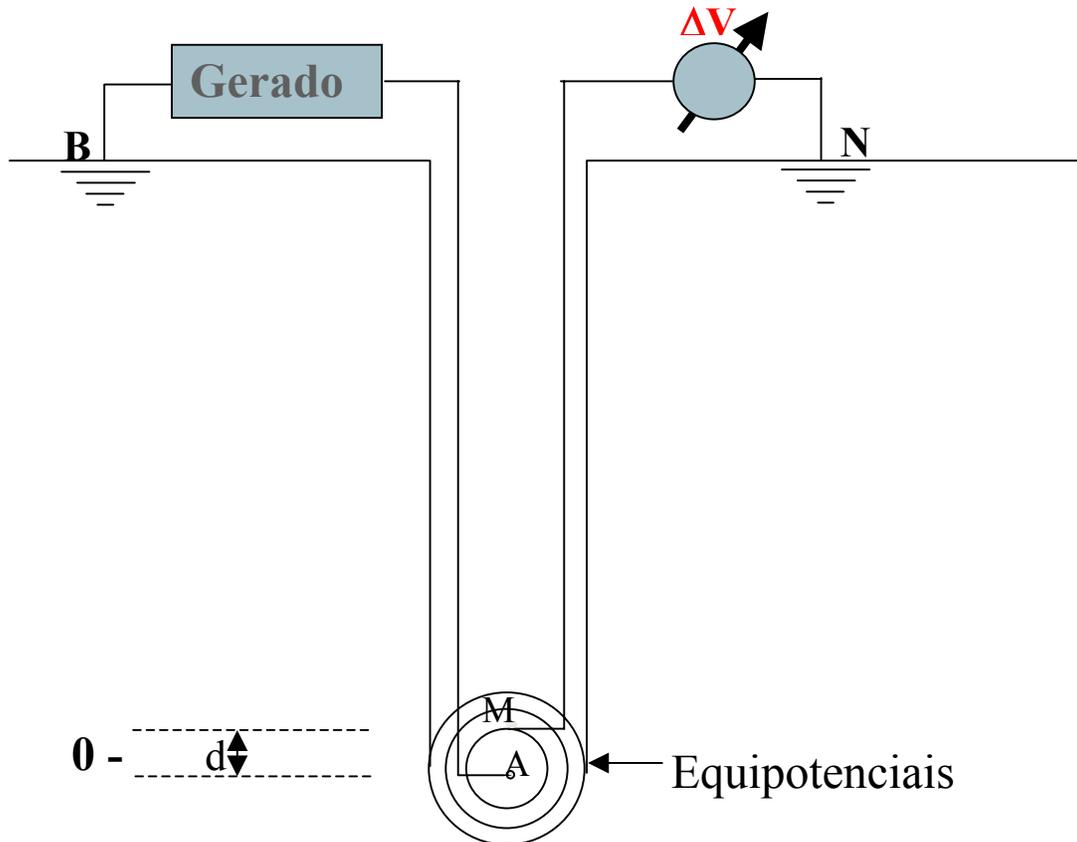


Figura 12: Esquema de funcionamento da ferramenta de eletrorresistividade, onde os eletrodos AB injetam corrente elétrica na formação e os eletrodos MN medem a voltagem resultante.

4.3.3- PERFIL DE DENSIDADE

O princípio baseia-se na detecção dos raios gama defletidos pelos elétrons orbitais dos elementos componentes das rochas (efeito Compton), após terem sido emitidos por uma fonte colimada (Cs^{137}) localizada dentro de uma sapata pressionada contra a parede do poço.

Sua principal utilização é no cálculo da porosidade, através da seguinte fórmula:

$$\Phi = (\rho_g - \rho_l) / (\rho_g - \rho_{mf})$$

Onde ρ_g é a densidade do grão, ρ_l é a densidade total (lida no perfil) e ρ_{mf} é a densidade do filtrado de lama e Φ é o valor da porosidade.

Geralmente calcula-se duas porosidades : uma utilizando a densidade do grão de quartzo (2.65 g/cm^3) e outra utilizando a densidade da calcita (2.71 g/cm^3). A ferramenta pode ser calibrada para uma destas matrizes. Se a ferramenta for calibrada para arenito e transpassar uma camada de carbonato, a porosidade será subestimada.

Em formações com gás, a porosidade calculada através do perfil de densidade indica valores anormais (elevados) já que a densidade do filtrado é 0.1 a 0.3 g/cm^3 e no cálculo da porosidade assume-se 1.0 a 1.1 g/cm^3 .

4.3.4 – PERFIL DE NÊUTRONS

Nêutrons acelerados são emitidos por uma fonte e viajam através da formação onde eles são desacelerados, sobretudo, pela colisão com átomos de hidrogênio. Estes nêutrons lentos são capturados por átomos com a emissão de raios gama.

O que se mede é o índice de hidrogênio - IH (conteúdo iônico por unidade de volume)- que tem relação com a porosidade aparente das formações. O detector pode ser, por exemplo, um contador proporcional de He^3 .

Este perfil é usado, sobretudo, para medir porosidade em poço aberto e revestido. Essa porosidade é medida devido ao fato dos mais elevados índices de hidrogênio encontrarem-se na água da formação (IH = 1) e no óleo (IH = 0,8). Porém, o gás apresenta IH = 0,00167, muito inferior ao IH dos outros fluidos. Assim, na presença de gás, a porosidade é subestimada.

Este perfil sofre influência do diâmetro do poço (mede IH só da lama), da lama/reboco (está entre a fonte e a formação) e da argilosidade (IH alto).

Este efeito da argilosidade ou *shale effect*, em que o perfil superestima a porosidade neutrônica, ocorre devido às hidroxilas associadas a estrutura dos minerais de argila. Sendo assim, há uma concentração de hidrogênio associada à matriz argilosa.

4.3.5 – *PERFIL SÔNICO*

Existem dois métodos principais: um método mede a menor diferença de tempo (Dt) que uma onda sonora (onda p) leva, saindo de um transmissor até a chegada no receptor, fornecendo a velocidade de propagação ($\mu\text{sec}/\text{ft}$) da onda, e outro método que se baseia na reflexão das ondas.

No método que mede o tempo de trânsito, a sonda possui dois conjuntos, um com transmissor e um par de receptores abaixo, e outro com o transmissor abaixo do par de receptores.

Os transmissores pulsam alternadamente e é feita a média entre as medidas alternadas. Isso reduz os efeitos causados pelas mudanças no diâmetro do poço e na inclinação da sonda (*sonde tilt*).

Utilizado para o cálculo da porosidade, correlação poço a poço, auxílio a sísmica, detecção de fraturas (preenchidas por fluidos).

4.4- Eletrofácies

Eletrofácies pode ser definida como sendo o conjunto de características de uma rocha, baseado em propriedades observadas em perfis de poços.

Um desenvolvimento deste conceito consiste em encontrar um modo de subdividir os perfis em intervalos com eletrofácies similares e então identificar estas eletrofácies em termos de fácies geológicas. A figura 13 demonstra este conceito, onde as eletrofácies segmentam os perfis e relacionam-se a uma identidade geológica. Desta definição sai o conceito dos padrões aqui mencionados. Os padrões a serem reconhecidos com a lógica fuzzy correspondem as eletrofácies, e serão correlacionados a litologia (folhelho e reservatório) e fluidos (água, óleo e gás).

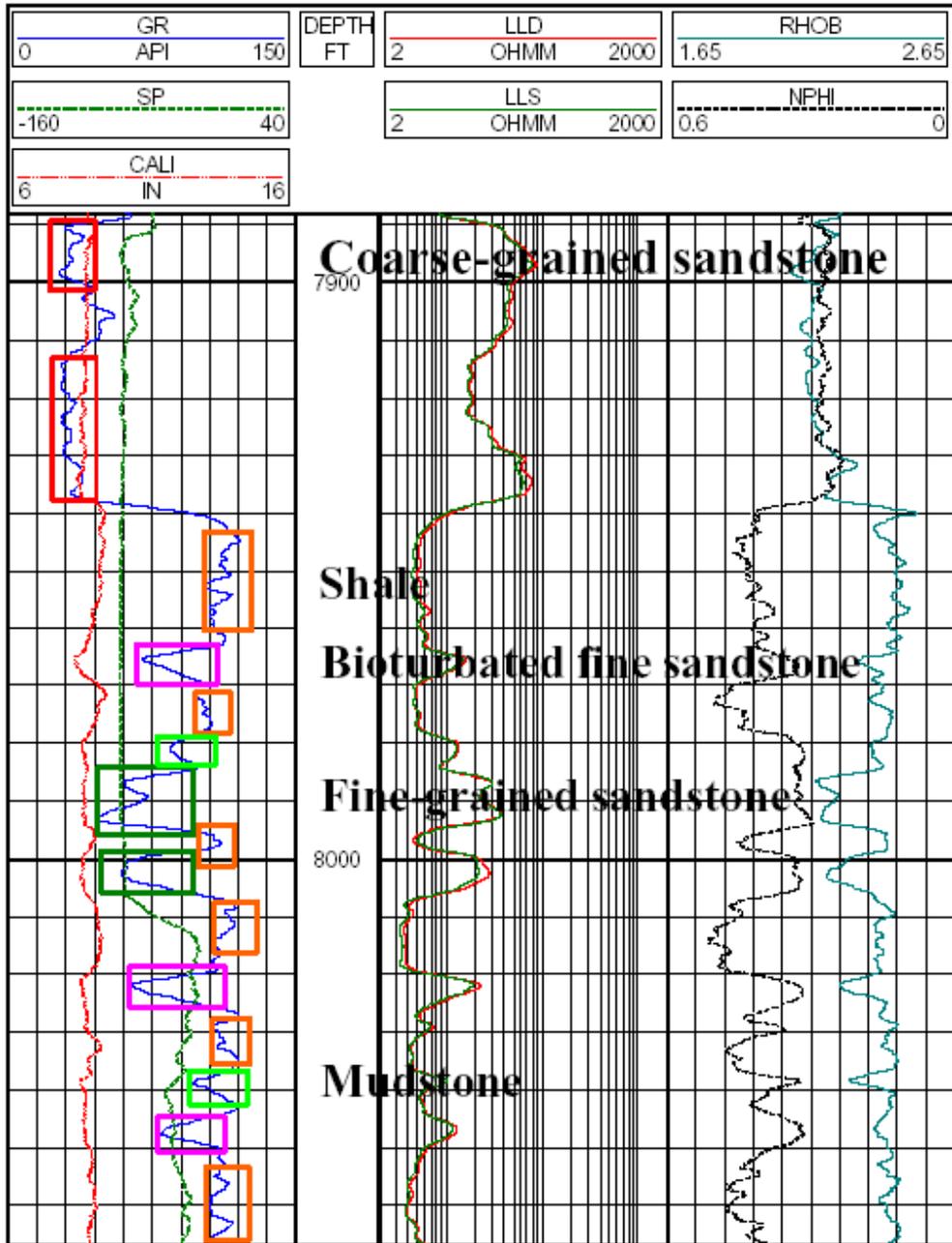


Figura 13: As diferentes eletrofácies, aqui separadas por cores, segmentam os perfis e relacionam-se a uma identidade geológica.

5 Lógica fuzzy

O poder da lógica fuzzy, também conhecida como lógica nebulosa, deriva da sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Neste aspecto, os sistemas de base fuzzy têm habilidade de “raciocinar” de forma semelhante à dos humanos. Seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção.

5.1 – Histórico

O conceito de conjunto fuzzy foi introduzido, em 1965, por Lotfi A. Zadeh (Universidade da Califórnia, Berkeley). Em meados da década de 60, Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana. Procurando solucionar esses problemas o Prof. Zadeh publicou em 1965 um artigo resumindo os conceitos dos conjuntos Fuzzy, revolucionando o assunto com a criação de sistemas fuzzy. Em 1974, o Prof. Mamdani, do Queen Mary College, Universidade de Londres, após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com tipos distintos de controladores, somente conseguiu fazê-lo através da aplicação do raciocínio fuzzy. Esse sucesso serviu de alavanca para muitas outras aplicações, como em 1980, no controle fuzzy de operação de um forno de cimento. Vieram em seguida, várias outras aplicações, destacando-se, por exemplo, os controladores fuzzy de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens.

Estimulados pelo desenvolvimento e pelas enormes possibilidades práticas de aplicações que se apresentaram, os estudos sobre sistemas fuzzy e controle de processos avançam rapidamente, culminando com a criação em 1984, da Sociedade Internacional de Sistemas Fuzzy, constituída, principalmente, por pesquisadores dos

países mais avançados tecnologicamente. A propósito disto, e apenas a título de ilustração, mais de 30% dos artigos até hoje publicados são de origem japonesa.

O desenvolvimento de técnicas de inteligência artificial (IA) nos últimos anos, ocupa cada vez mais posição de destaque em pesquisas na área de controle de processos industriais e, aos poucos, começam a ser implantadas em plantas industriais com enorme sucesso.

Da Lógica Fuzzy provêm a base para geração de técnicas poderosas para a solução de problemas, com uma vasta aplicabilidade, especialmente, nas áreas de controle e tomada de decisão.

5.2 – Introdução aos conjuntos fuzzy

Quando se raciocina com base na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Os elementos de um conjunto A em um determinado universo X simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica f_A :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

O conceito de nebulosidade (*fuzzy*) é introduzido generalizando-se a função característica de modo que ela possa assumir um número infinito de valores diferentes no intervalo $[0,1]$. Assim, um conjunto fuzzy A em X é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{ \mu_A(x)/x \} \quad x \in X$$

onde $\mu_A(x)$ é a função de pertinência de x em A e é definida como o mapeamento de X no intervalo fechado $[0,1]$:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$$

A função de pertinência indica o quanto um elemento pertence a um dado conjunto. O **conjunto suporte** de um conjunto fuzzy A é o conjunto de elementos no universo X para os quais $\mu_A(x) > 0$. Assim, um conjunto fuzzy também pode ser visto

como o mapeamento do conjunto suporte no intervalo [0,1], o que implica em expressar o conjunto fuzzy por sua função de pertinência. Por exemplo, para o conjunto fuzzy $A = \{\text{baixo}\}$, no universo dos números positivos menores ou iguais a 100, alguns valores da função de pertinência poderiam ser:

$$\begin{aligned} \mu_A(0) &= \mu_A(5) = \mu_A(10) = \mu_A(15) = \mu_A(20) = 1 \\ \mu_A(25) &= 0,9 \\ \mu_A(30) &= 0,8 \\ \mu_A(45) &= 0,1 \\ \mu_A(50) &= \mu_A(55) = \mu_A(60) = \dots\dots\dots = \mu_A(100) = 0 \end{aligned}$$

Uma **variável fuzzy** é uma variável cujos valores são rótulos de conjuntos fuzzy. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos fuzzy. Generalizando, os valores de uma variável podem ser sentenças em uma linguagem especificada. Neste caso, a variável é uma **variável lingüística**. Para ilustrar, os valores da variável fuzzy pressão poderiam ser expressos como “*alta, não alta, muito alta, bastante alta, não muito alta, alta mas não muito alta*”. Neste caso, os valores fuzzy são sentenças formadas a partir do rótulo “*alta*”, da negação “*não*”, dos conectivos “*e*” e “*mas*”, e dos modificadores *muito* e *bastante*. Nesse contexto, a variável pressão é uma variável lingüística.

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição lingüística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

A dependência de uma variável lingüística em relação à outra (independente) é descrita através de uma declaração condicional fuzzy (*fuzzy conditional statement*), da forma:

$$R: \text{SE } \Pi^1 \text{ ENTÃO } \Pi^2$$

onde Π_1 e Π_2 são frases fuzzy da forma (Π é A) e A é um subconjunto fuzzy de um universo X . Pode ser atribuído a A um significado lingüístico que define o valor de X . Por exemplo:

SE z é pequeno ENTÃO w é muito grande

SE *erro* é grande negativo ENTÃO *saída* é grande positiva.

Duas ou mais declarações condicionais podem ser combinadas, como, por exemplo:

R: SE Π^1 ENTÃO (SE Π^2 ENTÃO Π^3)

Várias declarações podem ser combinadas através do conectivo **ou**, formando assim um algoritmo fuzzy (R_N) da forma: $R_N: R_1$ ou R_2 ou R_3 ou R_n

5.3- Aplicação:

A lógica fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy descrita no item anterior. Esta é uma generalização da teoria dos conjuntos tradicionais. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na lógica fuzzy, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa, conforme pode ser visto na Figura 14.

Com a incorporação do conceito de “grau de verdade”, a teoria dos conjuntos fuzzy estende a teoria dos conjuntos tradicionais. Os grupos são rotulados qualitativamente (usando termos lingüísticos, tais como: alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc.) e os elementos deste conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto). Por exemplo, um controlador de temperatura pode considerar 35°C como quente, mas 34,9°C como frio. Em um conjunto fuzzy, diferentemente, as transições entre o membro e o não-membro estão numa faixa gradual, sendo associado um grau ao elemento entre '0' (totalmente não-membro) e '1' (totalmente membro). Naquele controlador de temperatura, 20°C pode ser 'morno' e um pouco frio ao mesmo tempo,

50°C é 'muito quente' e assim por diante. O caminho é criar os estados "fuzzy" -- que é permitir a mudança gradual de um estado para o outro, como demonstrado na Figura 15. Pode-se, assim, definir a temperatura de entrada usando funções intermediárias.

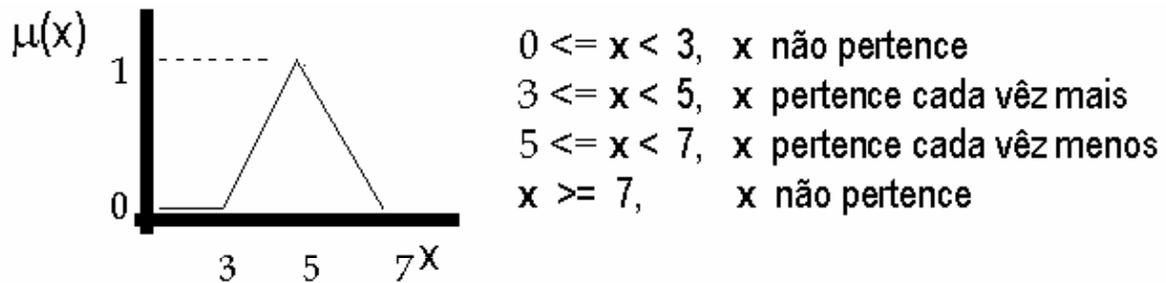


Figura 14: Nos conjuntos fuzzy os elementos recebem graus de pertinência em relação a determinado grupo(Costa et al,2004).

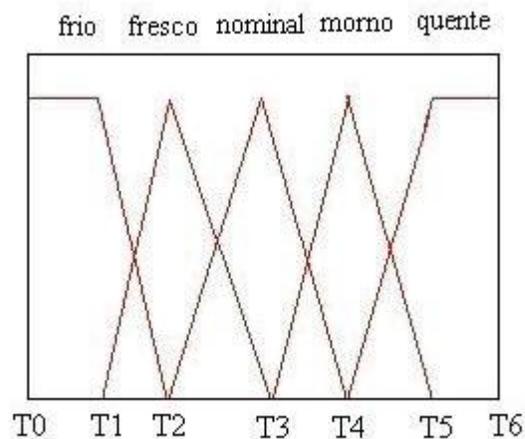


Figura 15: É possível observar o contato transicional entre os grupos, denominados com variáveis lingüísticas (Costa et al, 2004).

Desta forma, o estado da variável de entrada não mais salta abruptamente de um estado para o próximo; ao invés disso ele perde gradualmente valor em um estado enquanto vai ganhando valor no próximo estado (Figuras 14 e 15). Em um dado momento, o "valor verdadeiro" temperatura de um freio, por exemplo, será

quase sempre em algum ponto entre duas funções consecutivas: 0.6 nominal e 0.4 morno, ou 0.7 nominal e 0.3 fresco, e assim por diante.

Grau de pertinência não é probabilidade. Basicamente é uma medida da compatibilidade do objeto com o conceito representado pelo conjunto fuzzy. Probabilidade e lógica fuzzy podem ser usadas para mensurar tipos de incertezas. Uma maneira de descrever a diferença entre elas é dizendo que a teoria das probabilidades lida com a expectativa de eventos futuros, baseado em fatores conhecidos. O senso de incerteza é relativo a predição de ocorrência de um evento. O senso de incerteza representado pela lógica fuzzy é resultante da imprecisão de significado de um conceito expresso pela linguagem natural. Geralmente a lógica fuzzy trabalha com a comparação entre um indivíduo e um dado conceito impreciso

Em resumo, os conjuntos fuzzy constituem uma "ponte" no caminho de aproximar o raciocínio humano ao da lógica executada pela máquina. Na lógica Booleana, temos em um conjunto convencional limites bruscos onde a transição dos membros para não-membros é abrupta e repentina. O grau de associação do conjunto é especificado, por exemplo, por um número '1' para os membros e '0' para os não membros. Em um conjunto fuzzy, diferentemente, as transições entre o membro e o não-membro estão numa faixa gradual, sendo associado um grau ao elemento entre '0' (totalmente não-membro) e '1'(totalmente membro). Sendo assim, precisão nem sempre é necessária: por exemplo, sob o ponto de vista de conforto térmico, é indiferente se a temperatura da sala estiver a 26°C ou a 25°C. A lógica fuzzy é útil por causa de sua pequena especificidade, pois permite uma resposta mais flexível para uma dada entrada.

A estratégia de controle de um operador humano pode ser representada como um conjunto de relações condicionais fuzzy que formam um conjunto de regras de decisão. Por exemplo, uma regra típica para controle de temperatura poderia ser: "Se a temperatura está alta e aumentando lentamente, então, aumente o resfriamento um pouco". Esta regra pode ser escrita através de variáveis lingüísticas da seguinte

forma: "Se temp = GP e variação_temp = PP então variação_resfr = PP", onde os termos primários GP e PP significam "grande positivo" e "pequeno positivo". Uma coleção de regras lógicas de controle é chamada de algoritmo de controle fuzzy, ou regras de controle. A construção de um sistema de controle fuzzy é baseada na idéia de se incorporar "experiência" ou "conhecimento especialista" de um operador humano para se obter a melhor estratégia de controle. Desse modo, a forma das regras empregadas depende do processo a ser controlado.

As variáveis de entrada em um sistema de controle fuzzy são em geral mapeadas dentro de conjuntos de funções consecutivas. O processo de conversão de um valor de entrada intermediário em um valor fuzzy é chamado de "fuzzificação".

Determinando o mapeamento das variáveis de entrada dentro das funções consecutivas e valores verdadeiros, o controlador então toma decisões para que as ações sejam efetuadas segundo as regras:

IF temperatura do freio IS morna AND velocidade IS não muito rápida

THEN pressão do freio IS ligeiramente reduzida onde, neste caso, as duas variáveis de entrada são "temperatura do freio" e "velocidade". A variável de saída, "pressão do freio", é, de modo similar, gerada a partir de um conjunto fuzzy que pode ter valores como "estático", "ligeiramente reduzido", "ligeiramente acrescido", e assim por diante. A decisão é baseada em um conjunto de regras. Todas as regras que aplicamos são invocadas, usando as funções consecutivas e valores verdadeiros obtidos das entradas, para determinar o resultado da regra, que em troca será mapeada dentro da função consecutiva como valor verdadeiro controlando a variável saída. A seguir estes resultados são combinados para gerar uma resposta específica, a atual pressão do freio um procedimento conhecido como "defuzzificação".

O projeto de sistemas de controle fuzzy é baseado em métodos empíricos, basicamente uma aproximação metódica para tentativa-e-erro. Existem poucas regras pré-definidas no presente momento uma vez que a tecnologia é ainda nova; o processo em geral segue os seguintes passos:

1. Documenta-se as especificações operacionais do sistema com entradas e saídas.
2. Documenta-se os conjuntos fuzzy para as entradas.
3. Documenta-se o conjunto de regras.
4. Determina-se o método de defuzzificação.
5. Executa-o através de teste para verificação do sistema, ajustando os detalhes como requerido.

Estes passos estão esquematizados na Figura 16.

Como um resumo final, a Tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização da lógica fuzzy.

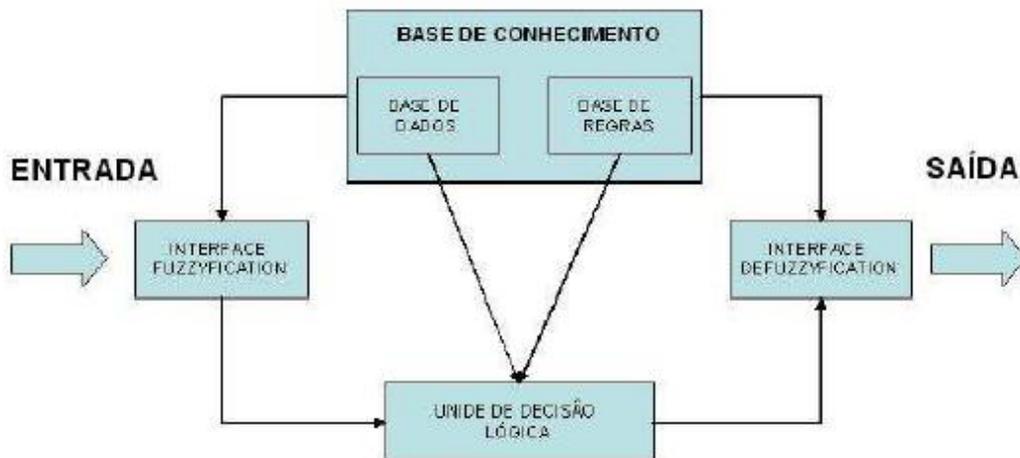


Figura 16: Sistema de inferência fuzzy(Costa et al, 2004).

Tabela 2: Características e vantagens da lógica fuzzy (Camargos, 2004).

Características	Vantagens	Desvantagens
A Lógica Nebulosa está baseada em palavras e não em números, ou seja, os valores verdades são expressos lingüisticamente. Por exemplo: quente, muito frio, verdade, longe, perto, rápido, vagaroso, médio;	O uso de variáveis lingüísticas nos deixa mais perto do pensamento humano;	Necessitam de mais simulação e testes;
Possui vários modificadores de predicado, tais como: muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio;	Requer poucas regras, valores e decisões;	Não aprendem facilmente;
Possui também um amplo conjunto de quantificadores, como: poucos, vários, em torno de, usualmente;	Simplifica a solução de problemas e a aquisição da base do conhecimento;	Dificuldades de estabelecer regras corretamente;
Faz uso das probabilidades lingüísticas (como, PE, provável e improvável) que são interpretados como números nebulosos e manipulados pela sua aritmética;	Mais variáveis observáveis podem ser valoradas;	Não há uma definição matemática precisa.
Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes, como um limite apenas.	Mais fáceis de entender, manter e testar;	
	São robustos. Operam com falta de regras ou com regras defeituosas;	
	Acumulam evidências contra e a favor.	
	Proporciona um rápido protótipo dos sistemas.	

6 Metodologia

Primeiramente escolheu-se quais padrões deveriam ser reconhecidos, sendo determinados os padrões “folhelho”, “reservatório com água”, “reservatório com óleo” e “reservatório com gás”. Uma análise preliminar definiu as respostas de perfilagem esperadas para tais padrões (eletrofácies), como, por exemplo, valores elevados no perfil de raios gama para o padrão “folhelho”. Desenvolveu-se então uma rotina no software MATLAB, para, inicialmente selecionar o número ótimo de grupos e, depois, a aplicar a lógica fuzzy a fim de reconhecer tais padrões.

Em uma primeira etapa, aplicou-se esta rotina em perfis sintéticos de poços, simulados no MATLAB. Os perfis utilizados foram Raios Gama Naturais (GR), Resistividade (ILD), Porosidade Neutrônica (PHIN), Densidade (RHOB) e Tempo de Trânsito (DT) do perfil sônico convencional, pois estes são os perfis disponíveis para posterior aplicação no Campo de Namorado, além de serem muito utilizados no mercado e propícios às definições dos padrões escolhidos. A partir dos gráficos de dispersão perfil *versus* perfil, foi analisada a distribuição dos dados e o agrupamento dos mesmos em torno dos centros dos grupos fuzzy. Essas informações auxiliaram no refino das definições dos parâmetros esperados para cada padrão. Procurou-se simular todas as possibilidades de ocorrência na natureza que pudessem prejudicar a interpretação dos perfis, tais como arenito arcoseano (valores elevados no perfil GR, confundindo-se com o padrão folhelho), água doce (elevados valores de resistividade, confundindo-se com hidrocarboneto), etc.

Depois de proposta a técnica, aplicou-se o método em perfis reais do Campo de Namorado. Analisando os gráficos perfil *versus* perfil dos dados reais, foi possível um maior refinamento dos parâmetros, a fim de se adequar a realidade.

Tanto nos perfis sintéticos e, sobretudo, nos perfis reais, ficou evidente a necessidade da utilização de vínculos físicos para a resolução de ambigüidades, como o caso do folhelho e do arenito arcoseano, e para a adequação a efeitos indesejáveis provocados pelos ruídos na perfilagem.

Como a técnica usada é de “agrupamento não supervisionado”, além dos vínculos físicos, também utilizou-se os conceitos de “corte α ” e “freqüência”.

Como explicado anteriormente, a lógica fuzzy assume graus de pertinência para cada elemento em relação a um grupo. Neste trabalho utilizou-se um vínculo de aceitação de um elemento como membro de dado grupo se o mesmo possuir um grau de pertinência superior a 0,8 que é definido como “corte α ” (Das Gupta,2001).

Para cada padrão a ser definido, também como uma técnica de controle, condicionou-se à aceitação do reconhecimento o conceito de frequência. Sendo assim, certo nível só é considerado como correspondente a dado padrão se for satisfeita a frequência mínima determinada. Por exemplo, cinco perfis foram utilizados, para o reconhecimento do padrão folhelho fixou-se uma frequência superior a dois, assim, pelo menos três perfis deveriam corresponder aos parâmetros definidos para que o dado fosse reconhecido como com padrão “folhelho”.

6.1 – Rotina para aplicação da lógica fuzzy na identificação de um padrão

A regra, em si, começa com a seleção dos valores centrais dos grupos, para cada um dos perfis. Para isso, gerou-se uma matriz de partição fuzzy aleatória, geradora dos valores iniciais dos centros dos grupos, obviamente incorretos. Com repetidas atualizações da matriz de partição fuzzy, a regra move iterativamente os centros dos grupos para os valores corretos. Esta iteração é baseada na minimização de uma função objetiva que relaciona a distância Euclidiana de cada ponto com os centros dos grupos, ponderados por cada elemento da matriz de partição. Após concluir a seleção dos centros de cada grupo, são propostas variáveis lingüísticas para caracterizá-los. Então, o padrão a ser identificado é comparado, ponto a ponto, com estes centros. As variáveis lingüísticas para os centros dos cinco grupos são: MB (Muito Baixo), B (Baixo), M (Médio), A (alto) e MA (Muito Alto).

A regra Fuzzy parte do princípio que se um grupo de dados x_k tem vários padrões dentro de si, cada grupo de padrão individual pode ser agrupado em torno de um centro. Desta forma, espera-se que a distância dos pontos naquele grupo possa ser correlacionada através de uma seqüência Fuzzy a qual descreve uma matriz de partição U ou “membership grade”, satisfazendo as seguintes condições:

$$\mu_{ik} \in [0,1] \text{ onde } 1 \leq i \leq c \text{ e } 1 \leq k \leq n; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1; \quad (4)$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^n \mu_{ik} \leq n, \quad (5)$$

onde c é o número de grupos ou fácies selecionado, e n é o número de dados. A condição dada pela equação (3) significa que os dados pertencem a várias fácies a diferentes graus. Já as condições dadas pelas equações (4) e (5) requerem apenas que o grau total da matriz de partição para cada dado seja normalizada a 1, e não podem pertencer a mais fácies do que o número existente.

A localização de uma fácies é representada pelo seu valor central $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ip}) \in \mathfrak{R}^p$ em torno do qual seus p elementos estão concentrados. O critério usado para melhorar a partição inicial é o critério da variância. Neste caso, mede-se a dissimilaridade entre os pontos em uma fácies e seu valor central pela distância Euclidiana, d_{ik} , que, de acordo com Bezdek & Pal (1992), é dada por:

$$d_{ik} = \|x_k - v_i\| = \left[\sum_{j=1}^p (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

A partição Fuzzy, de acordo com este critério, é feita minimizando o seguinte funcional ou função objetiva:

$$F(\mu, v) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m (d_{ik})^2, \quad (7)$$

O que resulta em:

$$\mu_{ik} = \left[\frac{1}{\|x_k - v_i\|^2} \right]^{\frac{1}{m-1}} \cdot \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{1}{\|x_k - v_j\|^2} \right) \right]^{-\frac{1}{m-1}}, \quad (8)$$

Tal que:

$$v_i = \frac{1}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m} \sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^m x_k, \text{ para } 1 \leq i \leq c. \quad (9)$$

O sistema descrito pelas equações (6), (7), (8) e (9) não pode ser resolvido analiticamente. A solução recai, então, na aplicação de técnicas de algoritmos iterativos que aproximam o mínimo do funcional a partir de uma dada posição. Um dos algoritmos mais conhecidos para solucionar tal problema é o algoritmo ISODATA, proposto por Bezdek (1980) onde, para cada $m \in (0, \infty)$, resolve-se iterativamente as condições necessárias dadas pelas equações (3), (4) e (5), e ao mesmo tempo converge para um ótimo local da equação (7).

6.2. O algoritmo ISODATA

O algoritmo ISODATA pode ser condensado em 6 passos básicos:

PASSO 1: Seleciona-se o número ótimo de grupos c ($2 \leq c \leq n$) para o conjunto de dados disponível e o expoente m ($1 \leq m \leq \infty$), normalmente tomado como 2. O valor ótimo de c é calculado utilizando a seguinte medida de validade Fuzzy, proposta por Fukuyama & Sugeno (1989)

$$S(c) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^m (\|x_k - v_i\|^2 - \|v_i - \bar{x}\|^2), \quad (10)$$

onde x_k é o k -ésimo vetor de dados, v_i é o vetor valor central da i -ésima fácies e \bar{x} é a média do dado. Os dois termos entre parênteses representam a variância dos dados dentro de cada grupo e a variância do próprio grupo, respectivamente. Assim, o número ótimo de grupos é determinado como o mínimo do funcional $S(c)$ quando c cresce. A Figura 17 indica a aplicação da medida de validade fuzzy neste trabalho, sendo definido o número ótimo de grupos como 5.

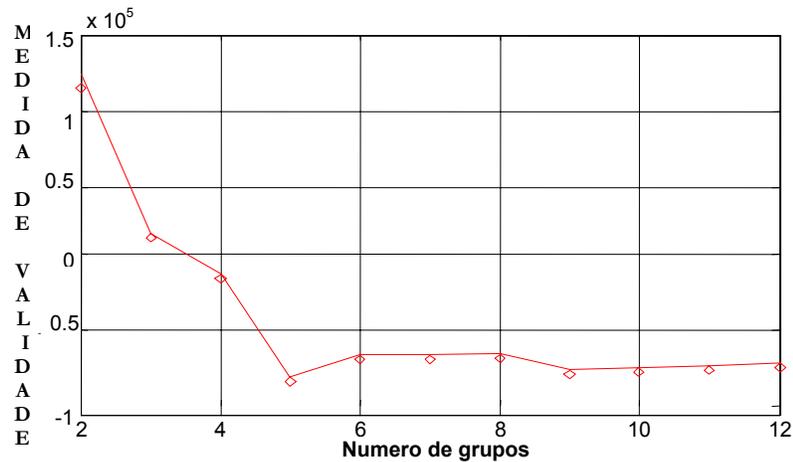


Gráfico 1 : Gráfico do critério do mínimo valor da “validade Fuzzy”, utilizado neste trabalho, segundo a qual definiu-se o número ótimo de fâcias como sendo 5.

PASSO 2: Inicializa-se a matriz de partição Fuzzy $U^{(0)}$, de forma aleatória, fazendo o índice de iteração $l = 0$;

PASSO 3: Faz-se $l = l + 1$;

PASSO 4: De posse dos valores de c , m e da matriz $\mu_{ik} = U^{(l-1)}$, calcula-se os centros de cada grupo usando a equação (9);

PASSO 5: Calcula-se a nova matriz de partição Fuzzy $U^{(l)}$ através da equação (8) e usando os valores dos centros dos grupos do PASSO 4.

PASSO 6: Escolhe-se uma norma matricial adequada e calcula-se

$$\Delta = \|U^{(l)} - U^{(l-1)}\| \text{ e adota-se um critério de parada } (\Delta \leq \varepsilon).$$

Se $\Delta > \varepsilon$ vai para o PASSO 3;

Se $\Delta \leq \varepsilon \rightarrow$ FIM

6.3- Definição dos padrões

Nos itens acima descreveu-se a rotina matemática de como a lógica fuzzy reconhece um padrão. Agora, o que será discutido é a definição de cada padrão em si. Foram determinados quatro padrões a serem reconhecidos: “folhelho”, “reservatório com água”, “reservatório com óleo” e “reservatório com gás”.

Para a identificação de cada padrão executou-se a rotina descrita. Adotou-se a estratégia de, ao ser reconhecido um dado padrão, para o reconhecimento do padrão seguinte, os níveis relativos a padrões anteriormente reconhecidos eram excluídos.

O critério adotado para a escolha da ordem em que os padrões seriam reconhecidos foi de escolher o padrão que apresentasse melhor definição no maior número de perfis possível. O primeiro padrão a ser reconhecido então foi o padrão “reservatório com gás”, que é bem definido nos cinco perfis utilizados. Em seguida o padrão “folhelho”, que é bem definido em três perfis e, por fim, os padrões “reservatório com óleo” e “reservatório com água”.

6.3.1- PADRÃO “RESERVATÓRIO COM GÁS”

Como já mencionado, este padrão é bem reconhecido nos cinco perfis utilizados.

6.3.1.1- Perfil GR

Para o padrão reservatório com gás definiu-se como parâmetro para aceitação valores de raios gama MB e B, já que, normalmente, as rochas reservatório mais comuns (arenitos e carbonatos) não apresentam valores elevados de radiação natural por não conterem muito Th-U-K. Porém, em algumas situações pode se ter valores elevados de GR em reservatórios, como nos arenitos arcoseanos encontrados no Campo de Namorado. Estes arenitos são compostos por uma fração significativa de feldspatos, que são minerais ricos em K, elevando assim o valor de GR. Esta situação faz com que se confunda o padrão “reservatório” com o padrão “folhelho”, como foi previsto nos perfis sintéticos e ocorreu nos dados reais. Esta

ambigüidade foi resolvida com a utilização de um vínculo físico no padrão “folhelho” que será explicado no item relativo a este padrão.

6.3.1.2- *Perfil de Resistividade*

Para este perfil foi adotado a variável MA para a aceitação do padrão “reservatório com gás”, devido a elevada resistividade dos hidrocarbonetos. Este perfil é que permitirá a resolução da ambigüidade observada no perfil GR, pois os hidrocarbonetos sempre apresentam resistividades elevadas, e os folhelhos, devido a sua capacidade de troca catiônica e quantidade de água associada, possuem baixos valores de resistividade.

6.3.1.3- *Perfil de Nêutrons*

Neste perfil, para a aceitação do padrão reservatório com gás utilizou-se a variável lingüística MB e B. Como visto no item 4.3.4, o gás apresenta $IH = 0,00167$, muito inferior ao IH dos outros fluidos indicando baixos valores no perfil de nêutrons. Sendo assim, a porosidade é subestimada.

6.3.1.4- *Perfil de Densidade*

A densidade do gás é inferior a dos outros fluidos, devido ao afastamento das moléculas, diminuindo a densidade eletrônica. Sendo assim, definiu-se a variável MB para este padrão.

Como já explicado no ítem 4.3.3 , na presença de gás, a porosidade calculada através do perfil de densidade indica valores anormais (elevados) já que a densidade do filtrado é $0,1$ a $0,3 \text{ g/cm}^3$ e no cálculo da porosidade assume-se $1,0$ a $1,1 \text{ g/cm}^3$. A porosidade é, então, superestimada.

6.3.1.5- *“Cross Over”*

Como pode ser observado, pode se utilizar os perfis de densidade e de nêutrons, quando expressando os valores de porosidade (PHID e PHIN),

conjuntamente, para definição do padrão “reservatório com gás”. No primeiro, a porosidade é superestimada e no segundo, é subestimada. Se não houvesse estas “anomalias” as curvas de porosidades dos dois perfis deveriam coincidir, porém, com esta situação apresentada, ocorre um cruzamento entre elas, o chamado *cross over*. Isso permitiu a adição de mais um vínculo físico para aceitação deste padrão, que PHIN seja sempre menor que PHID. Essa condição não é, entretanto, infalível. Existem duas situações em que se pode haver falsa indicação de gás e não existência de *cross over* mesmo na presença de gás.

Uma das situações que ocasiona falha no *cross over* é o chamado efeito da argilosidade. Este efeito da argilosidade ou *shale effect*, em que o perfil superestima a porosidade neutrônica, ocorre devido às hidroxilas associadas a estrutura dos minerais de argila. Sendo assim, há uma concentração de hidrogênio associada a matriz argilosa. Segundo Mallick *et al.*, (1996), se o volume de folhelho (VSH) for superior a 18%, mesmo na presença de gás, pode não ocorrer *cross over*, devido ao aumento da porosidade obtida com perfil de nêutrons. Este autor propõe uma fórmula simples para o cálculo real do distanciamento entre os perfis PHIN e PHID (magnitude do *cross over*) levando-se em consideração o efeito da argilosidade:

$$\text{Magnitude do } \textit{cross over} \text{ (Pu)} = \frac{6 - \text{VSH}(\%)}{3}$$

O VSH foi calculado nos perfis utilizados baseando-se no perfil de raios gama, com a seguinte fórmula:

$$\text{VSH} = \frac{\text{GR} - \text{GR}_{\text{MIN}}}{\text{GR}_{\text{MAX}} - \text{GR}_{\text{MIN}}}$$

Outro efeito que pode ocasionar erro ao se assumir o *cross over* como indicativo de gás é o chamado efeito de matriz. Com este efeito, ocorre o *cross over* mesmo na ausência de gás. Se o perfil de densidade está calibrado para uma matriz arenito, ao cruzar um arenito sem gás, não ocorre o *cross over*. Se a ferramenta estiver calibrada para uma matriz carbonática, ao se cruzar uma zona de reservatório carbonático sem gás, pode ocorrer um *cross over* de até 3 Pu. O problema está em se calibrar a ferramenta para uma matriz e transpassar outra. Se a ferramenta está

calibrada para uma matriz carbonática mas a litologia atravessada é um arenito, ocorrerá *cross over*, em uma falsa indicação de gás, pois a densidade do carbonato, usada no cálculo de PHID é maior que a densidade do arenito (real). Como apresentado no item 4.3.3, na fórmula do cálculo da porosidade, PHID seria superestimado, provocando o falso *cross over*.

Nos perfis sintéticos, onde o efeito de matriz foi simulado, utilizou-se então a seguinte correção proposta por Mallick *et al*, 1996:

- Se o *cross over* apresentar magnitudes constantes de 6-7 Pu, então deve-se adicionar 4 Pu a PHIN e subtrair 3 Pu de PHID.

6.3.1.6- *Perfil sônico*

No perfil sônico, devido a baixa densidade atômica do gás, o tempo de trânsito do perfil sônico convencional é mais elevado. Por isso adotou-se os parâmetros A (alto) e MA (muito alto).

O perfil sônico é um indicador confiável da presença de gás. Depois de realizados vários testes da aplicação do método, adicionou-se o vínculo de só aceitar o dado como pertencente ao padrão “reservatório com gás” se no perfil sônico ele for maior ou igual ao centro do grupo A (alto).

6.3.2- *PADRÃO “FOLHELHO”*

Os níveis que foram reconhecidos como reservatório com gás são então marcados e estes dados são excluídos para a aplicação do método na etapa seguinte, que é o reconhecimento do padrão “folhelho”. Este padrão é bem reconhecido em três perfis utilizados.

6.3.2.1- *Perfil GR*

Este perfil reflete valores elevados em virtude das concentrações de elementos radioativos presentes nos minerais argilosos dos folhelhos. Portanto, foram escolhidas as variáveis A (alto) e MA (muito alto) para caracterizar este padrão.

6.3.2.2- *Perfil Resistividade*

Para este perfil foi adotado a variável MB e B para a aceitação do padrão “folhelho”. Os folhelhos, devido a sua capacidade de troca catiônica e quantidade de água associada, possuem baixos valores de resistividade. Este perfil é o que permitiu a resolução da ambigüidade observada no perfil GR na presença de arenitos com alto grau de radioatividade, como já explicado anteriormente, com a proposta de um vínculo físico para a definição do padrão “folhelho”, de modo a só reconhecer este padrão se a resistividade for inferior ao centro do grupo M. A utilização deste vínculo, porém, poderia manter a ambigüidade no caso de se ter um arenito radioativo saturado com água salgada, o que indicaria elevados valores no perfil GR e baixos no perfil de resistividade. Com os dados disponíveis, não seria possível resolver esta ambigüidade, mas o objetivo final do trabalho é o reconhecimento do padrão reservatório com hidrocarboneto. Sendo assim, esta ambigüidade não afeta o objetivo principal.

6.3.2.3- *Perfil de Nêutrons*

Para o reconhecimento do padrão “folhelho” utilizou-se as variáveis A (alto) e MA (muito alto) para caracterizá-lo. Os folhelhos, devido as hidroxilas associadas a estrutura dos minerais de argila, possuem uma maior concentração de hidrogênio levando a elevados valores no perfil de nêutrons.

6.3.2.4- *Perfil de Densidade e Sônico*

Estes perfis não são relevantes para distinção do padrão “folhelho” em relação aos outros. Por isso foram escolhidas as variáveis B (baixo), M (médio) e A (alto).

6.3.3- *PADRÃO “RESERVATÓRIO COM ÓLEO” e “RESERVATÓRIO COM ÁGUA”*

Os níveis reconhecidos como folhelho são então excluídos da próxima etapa, em que se reconhece o padrão “reservatório com óleo”. Retirando-se os níveis de folhelho e reservatório com gás, resta apenas distinguir reservatório com óleo de reservatório com água. O padrão escolhido para se realizar a regra pela última vez

foi o padrão “reservatório com óleo”, o que restasse seria então, reservatório com água.

6.3.3.1- *Perfil GR*

Como os níveis com padrão “folhelho” não são mais considerados nesta etapa, e este perfil não influi na distinção entre óleo e água, escolheu-se as variáveis MB, B, M, A e MA.

6.3.3.2 - *Perfil Resistividade*

Este é um perfil importante na distinção óleo/água. Assumindo-se que a água em questão seja água salgada, que possui valores baixos de resistividade, consegue-se fazer a distinção já que o óleo possui elevada resistividade. Para o padrão reservatório com óleo foram escolhidas as variáveis M, A e MA. A variável M foi incluída na definição depois de terem sido realizados vários testes e ter sido observado influência dos ruídos nos perfis reais ou a presença de água residual, o que levou a inclusão desta variável para se obter melhores resultados. Para os perfis sintéticos que apresentavam bem menos ruídos, foi necessário a inclusão do vínculo que estabeleceu a aceitação do padrão “reservatório com óleo” somente a valores de resistividade MA (muito altos). Para os perfis reais o vínculo estabelecido foi a aceitação do padrão se a resistividade assumir valores superiores ao cento do grupo M (médio), assim, somente médio tendendo a alto, alto e muito alto representam reservatório com óleo.

Na presença de água doce, que possui elevada resistividade assim como o óleo, este perfil se torna ineficiente. Se já se tiver conhecimento ou suspeita que haja água doce nos reservatórios, é recomendado a utilização da sonda EPT (*eletromagnetic propagation tool*), que mede a constante dielétrica e distingue água de óleo ($\epsilon_a \cong 80$ e do óleo $\epsilon_o \cong 4$).

6.3.3.3- *Perfil de Nêutrons*

Para o reconhecimento deste padrão utilizou-se as variáveis A e MA, devido ao elevado índice de hidrogênio dos hidrocarbonetos.

6.3.3.4- *Perfil de Densidade*

O óleo possui densidade menor que a água. Foi definido então para este perfil as variáveis MB, B e M, assumindo valores de médio a baixo para reconhecimento do padrão “reservatório com óleo”.

6.3.3.5- *Perfil Sônico*

Para o perfil sônico foram atribuídos as variáveis M, A e MA para reconhecimento do padrão “reservatório com óleo”, devido ao maior tempo de propagação das ondas elásticas neste meio.

7 RESULTADOS

7.1- Perfis sintéticos

O perfil sintético representa a convolução entre a “função resposta” de cada sonda de perfilagem e os valores reais de cada parâmetro a ser medido.

Para cada perfil sintético utilizou-se diferentes proporções de minerais e fluidos e considerou-se também as características físicas da sonda. .Abaixo segue a lista dos minerais e fluidos considerados, além do ítem 14 relativo a influência da sonda:

Tabela 3: Minerais e fluidos considerados para a elaboração dos perfis sintéticos

1 - Quartzo	9 - K-Feldspato
2 - Calcita	10 - Muscovita
3 - Dolomita	11 - Biotita
4 - Anidrita	12 - Pirita
5 - Gipsita	13 - Barita
6 - Caolinita	14 - SONDA
7 - Ilita	15 - Água
8- Montmorilonita	16 - Óleo
	17 – Gás

Na definição de cada perfil sintético, fixou-se o número de camadas, e suas respectivas espessuras. Então determinou-se a quantidade de minerais presentes e que minerais eram estes (seguindo a numeração dada na lista acima) bem como suas devidas proporções. O mesmo foi feito para os fluidos, cuja soma de suas proporções constituía-se na porosidade da camada. O somatório das proporções de minerais e fluidos devia ser 1, representando toda camada. Por fim, incluía-se a calibragem das ferramentas (neutrão e densidade) como sendo arenito com água. No anexo 1, junto a representação gráfica de cada perfil sintético, está a matriz construída segundo o modelo expresso acima.

Para simular a resposta de cada ferramenta, utilizou-se valores nominais das propriedades físicas para cada mineral e fluido, respeitando-se também a resolução prevista para cada ferramenta de sondagem (Figura 17).

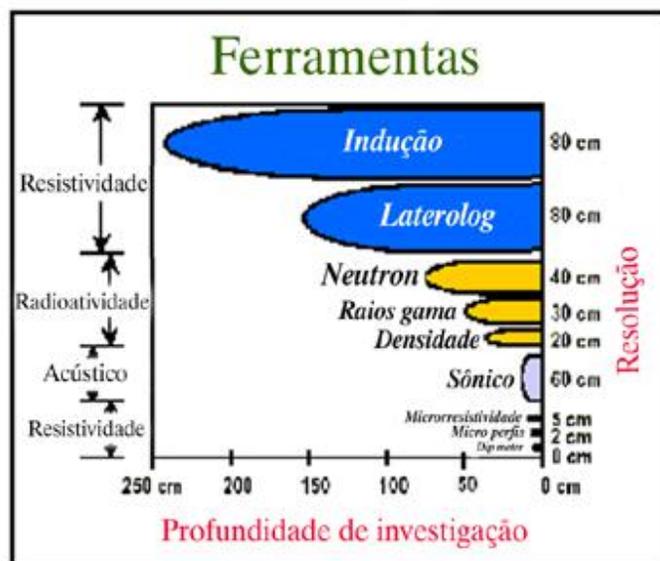


Figura 17: Resolução dos principais tipos de sonda. (Silva, 2002)

Uma função aleatória (random) foi acrescentada a rotina de cada sonda a fim de simular os ruídos presentes em uma sondagem real.

Para o perfil sintético foram definidas 4 eletrofácies: folhelho, arenito com óleo, arenito com água, arenito com gás. Foram simuladas para cada fácies litologias com composições e proporções mineralógicas diferentes, como exemplo, dentro da fácies folhelho, há folhelhos ricos em illita e folhelhos ricos em montmorilonita.

Foram utilizados três perfis sintéticos.

7.1.1- SINTÉTICO 1

Os perfis gerados correspondem à figura 18.

Nos gráficos 2, 3, 4, estão as análises perfil *versus* perfil realizados a cada etapa da identificação, sendo o gráfico 2 relativo ao reconhecimento do padrão “reservatório com gás”. No gráfico 3, os dados aceitos como padrão “reservatório com gás” são desconsiderados. No gráfico 4 são levados em consideração, então, somente os pontos não reconhecidos como dos padrões anteriores. Estes gráficos são utilizados na análise dos parâmetros adotados na definição dos padrões. Neles é possível observar valores anômalos, como no caso dos arenitos com elevado grau de radioatividade, saturados com hidrocarbonetos. Como veremos adiante, neste caso existem pontos anômalos no gráfico GR X ILD, pontos distantes de qualquer agrupamento.

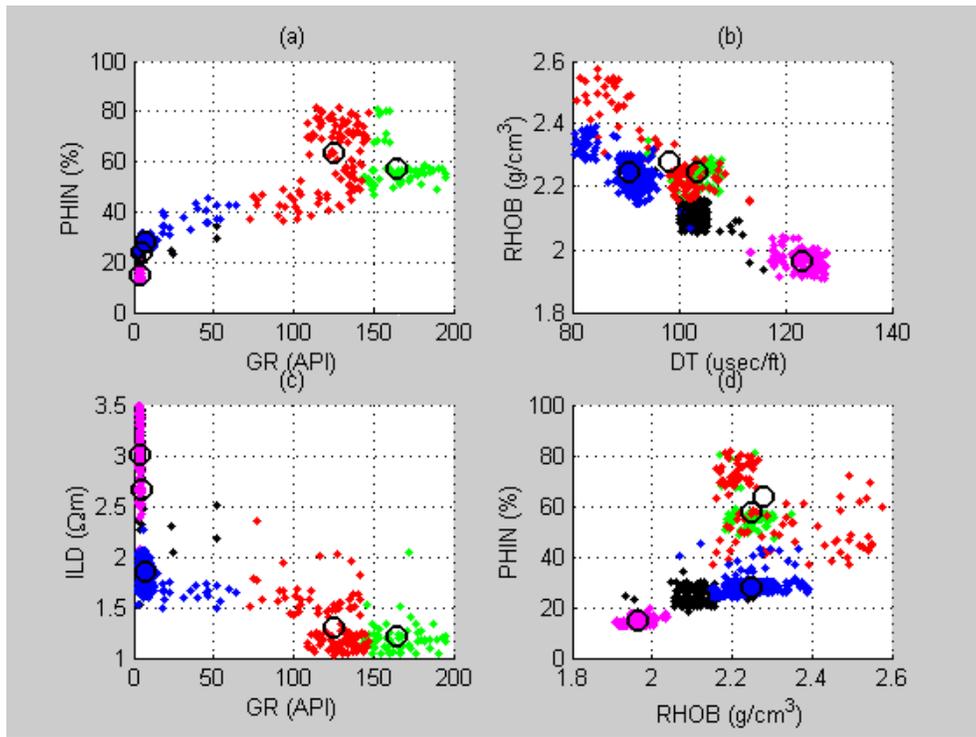


Gráfico 2: Gráficos perfil versus perfil do perfil sintético 1, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”. Os círculos pretos indicam o centro de cada grupo.

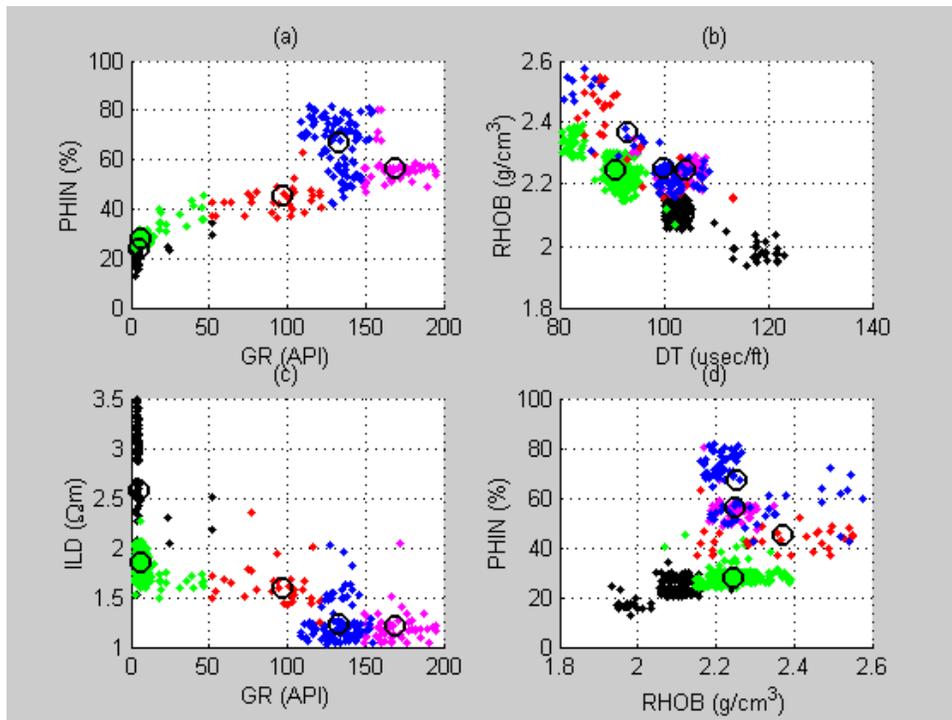


Gráfico 3: Após reconhecido o padrão “reservatório com gás”, gera-se mais uma vez os gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

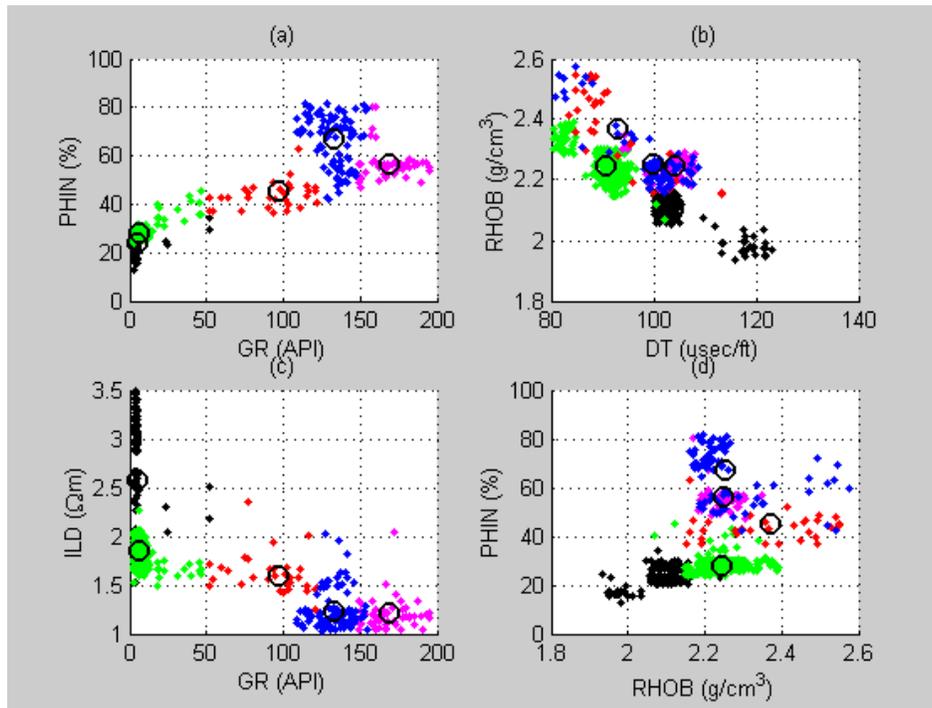


Gráfico 4: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

A Figura 18 apresenta os perfis sintéticos gerados e o reconhecimento dos padrões obtidos com a aplicação da lógica fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água.

Os dois reservatórios de hidrocarbonetos foram reconhecidos, o reservatório com gás, em torno da marcação de 5 metros e o reservatório com água, óleo e gás situado entre 23 e 30 metros. Quanto ao padrão “folhelho”, as camadas mais delgadas não foram reconhecidas.

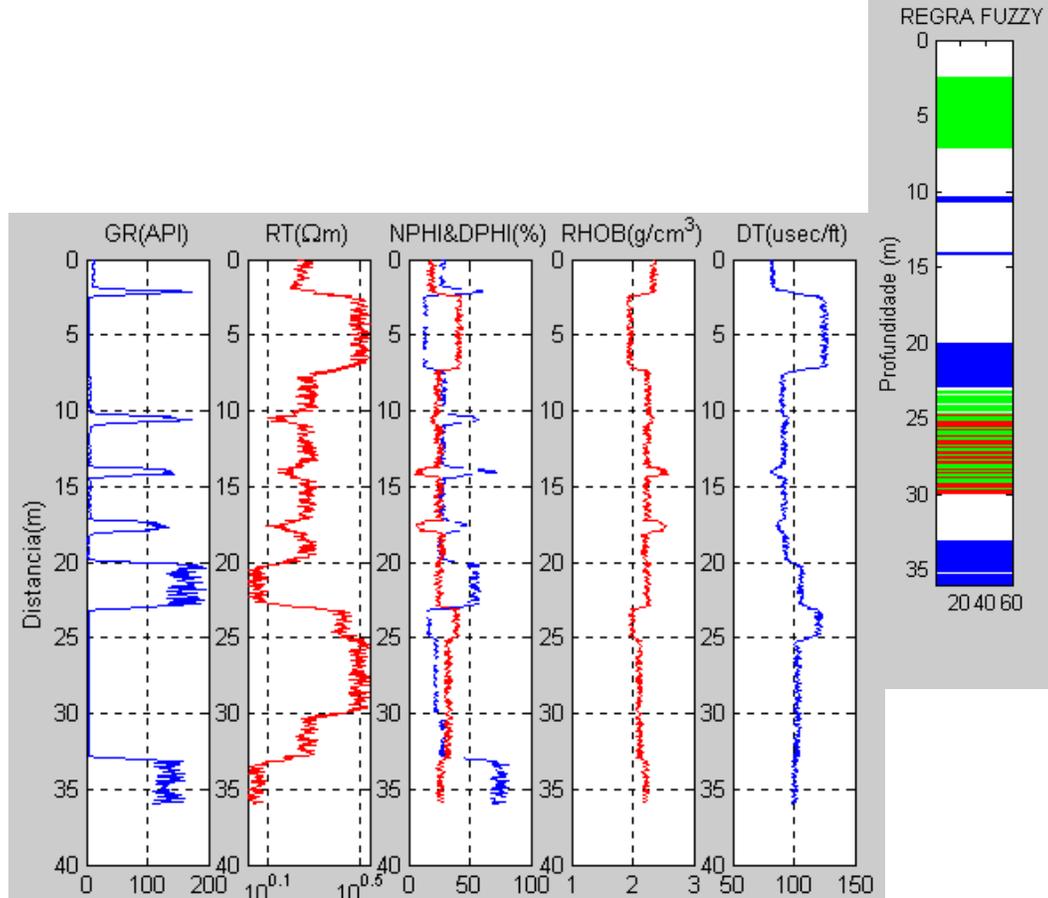


Figura 18: Perfis gerados para o perfil sintético 1 e a interpretação obtida com a regra fuzzy, importada direto do software Matlab. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água. Os reservatórios foram reconhecidos, porém, camadas muito delgadas de folhelho não foram identificadas.

7.1.2- SINTÉTICO 2

Os perfis gerados correspondem à figura 19.

Nos gráficos 5, 6, 7, estão as análises perfil *versus* perfil realizados a cada etapa da identificação, sendo o gráfico 5 relativo ao reconhecimento do padrão “reservatório com gás”. No gráfico 6, os dados aceitos como padrão “reservatório com gás” são desconsiderados. No gráfico 7 são levados em consideração, então, somente os pontos não reconhecidos como dos padrões anteriores.

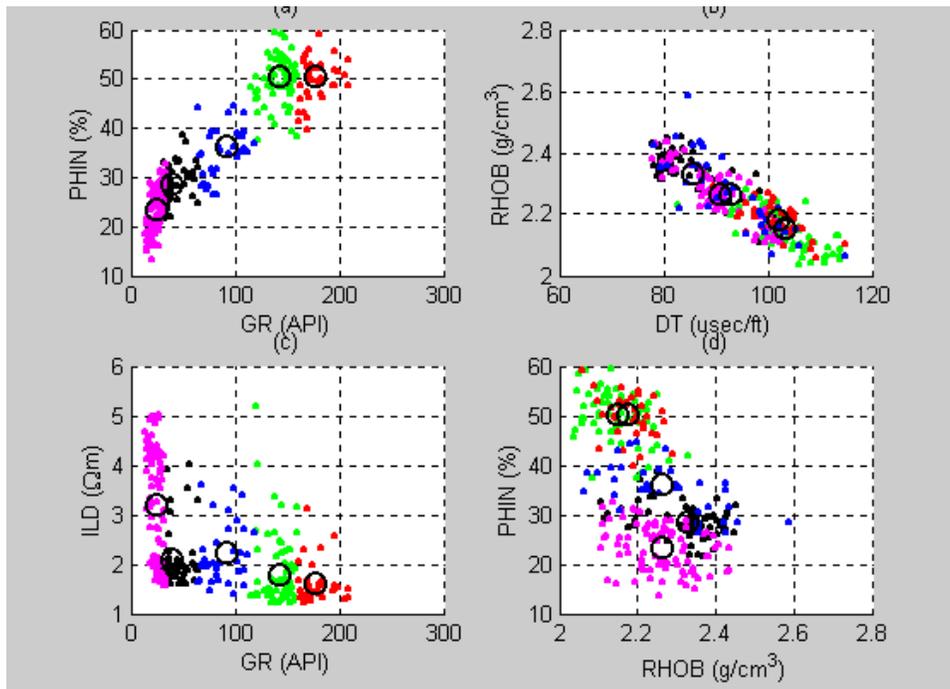


Gráfico 5: Gráficos perfil versus perfil do perfil sintético 2, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: "reservatório com gás". Os círculos pretos indicam o centro de cada grupo.

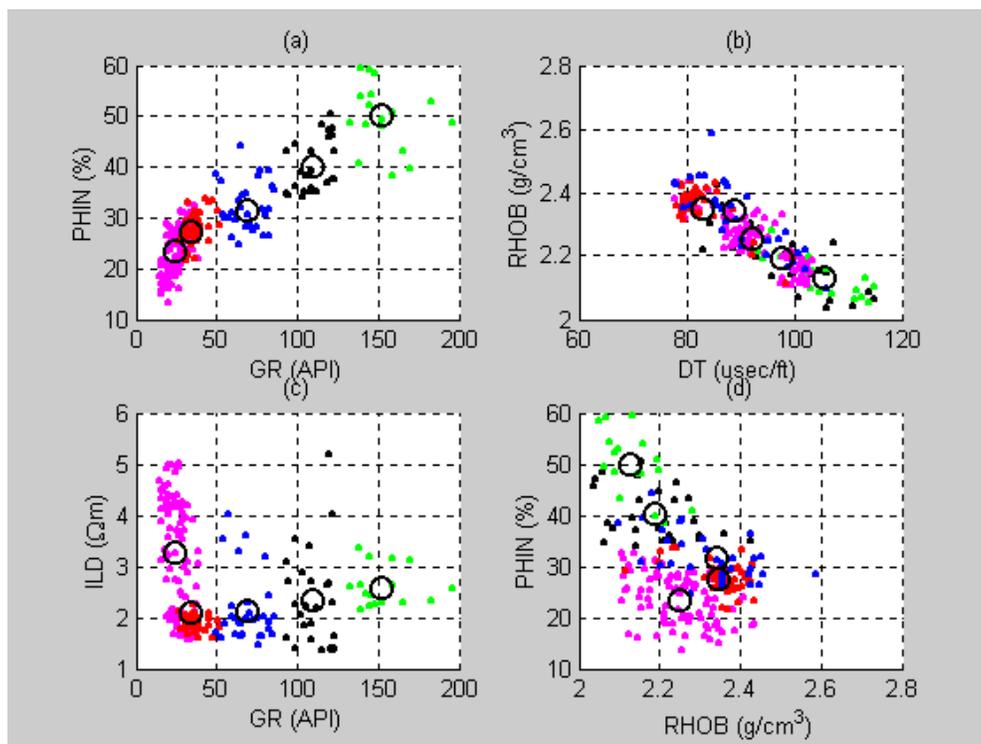


Gráfico 6: Após reconhecido o padrão "reservatório com gás", gera-se mais uma vez os gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

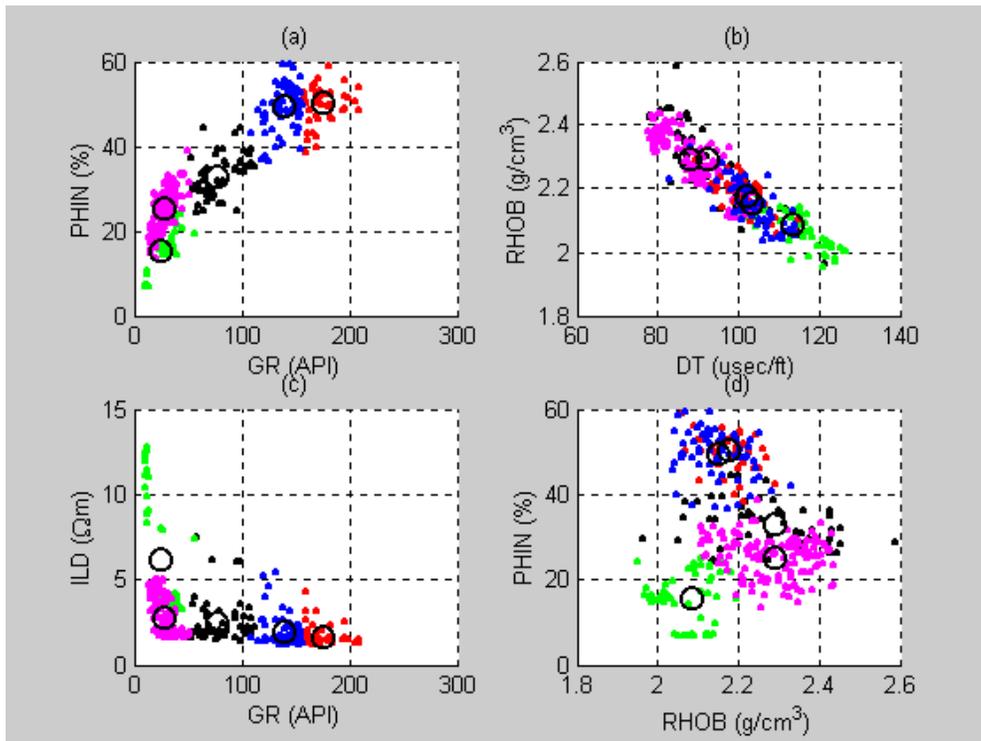


Gráfico 7: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

A Figura 19 apresenta os perfis sintéticos gerados e o reconhecimento dos padrões obtidos com a aplicação da lógica fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água.

Os três reservatórios foram reconhecidos. O primeiro reservatório aproximadamente entre 3 e 5 m, com gás, óleo e água. Os outros dois reservatórios, com gás, entre 10 e 12m e 14 e 15m. Todas as camadas de folhelho foram reconhecidas.

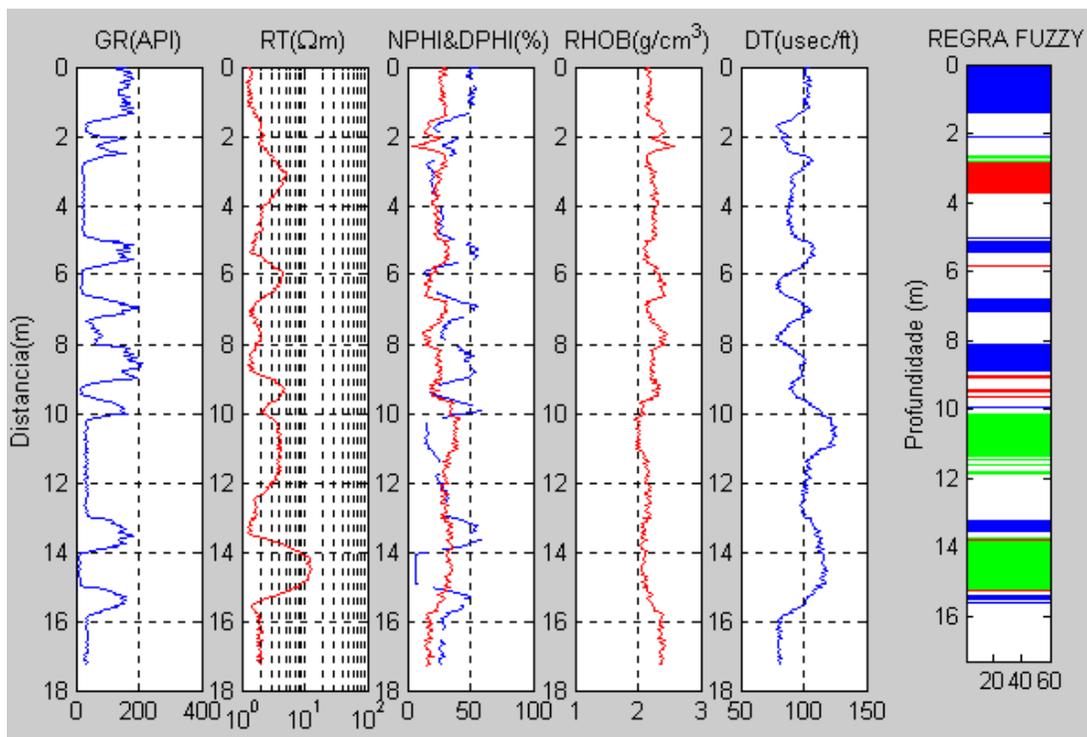


Figura 19: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy para o perfil sintético 2. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água. Os três reservatórios foram reconhecidos, bem como todas as camadas de folhelho.

7.1.3- SINTÉTICO 3

Os perfis gerados correspondem à Figura 20. Nos gráficos 8, 9, 10, estão as análises perfil *versus* perfil realizados a cada etapa da identificação, sendo o gráfico 8 relativo ao reconhecimento do padrão “reservatório com gás”. No gráfico 9, os dados aceitos como “reservatório com gás” são desconsiderados. No gráfico 10 são levados em consideração somente os pontos não identificados nos padrões anteriores.

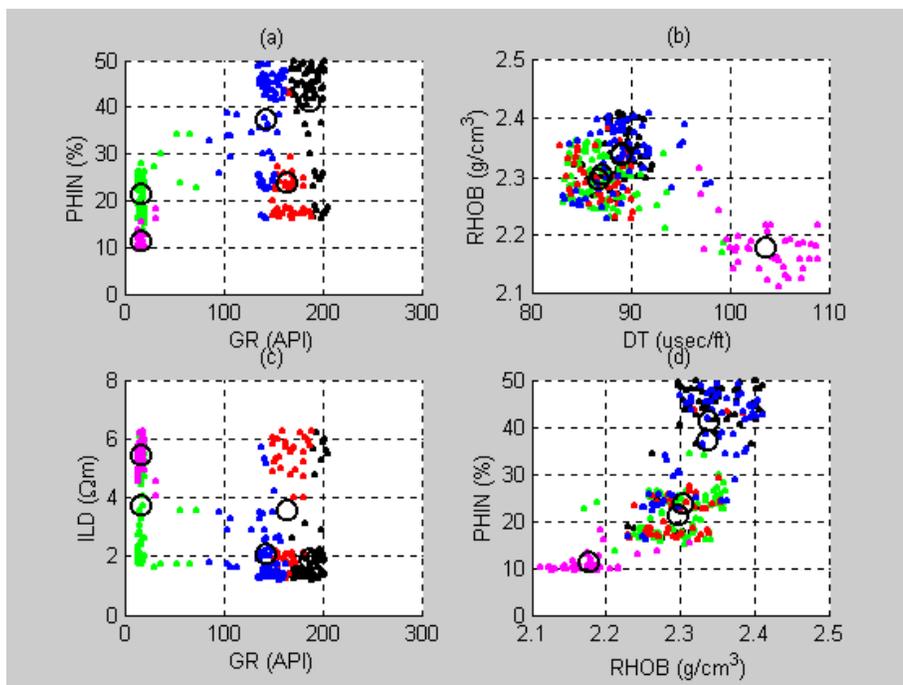


Gráfico 8: Perfil X perfil do perfil sintético 3, na identificação do padrão "reservatório com gás".

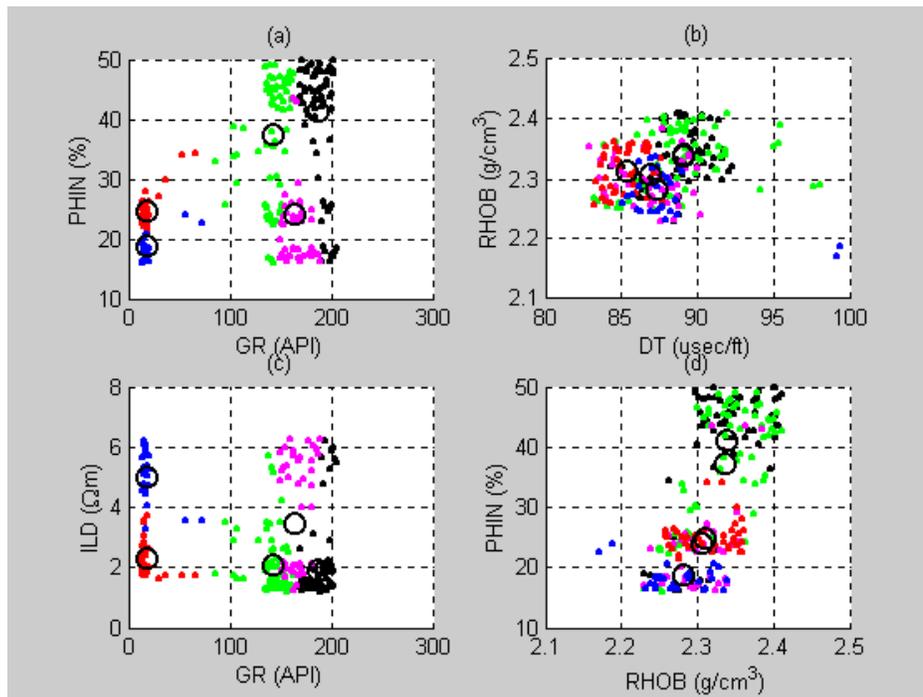


Gráfico 9: Após reconhecer o padrão "reservatório com gás", gera-se mais uma vez os gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

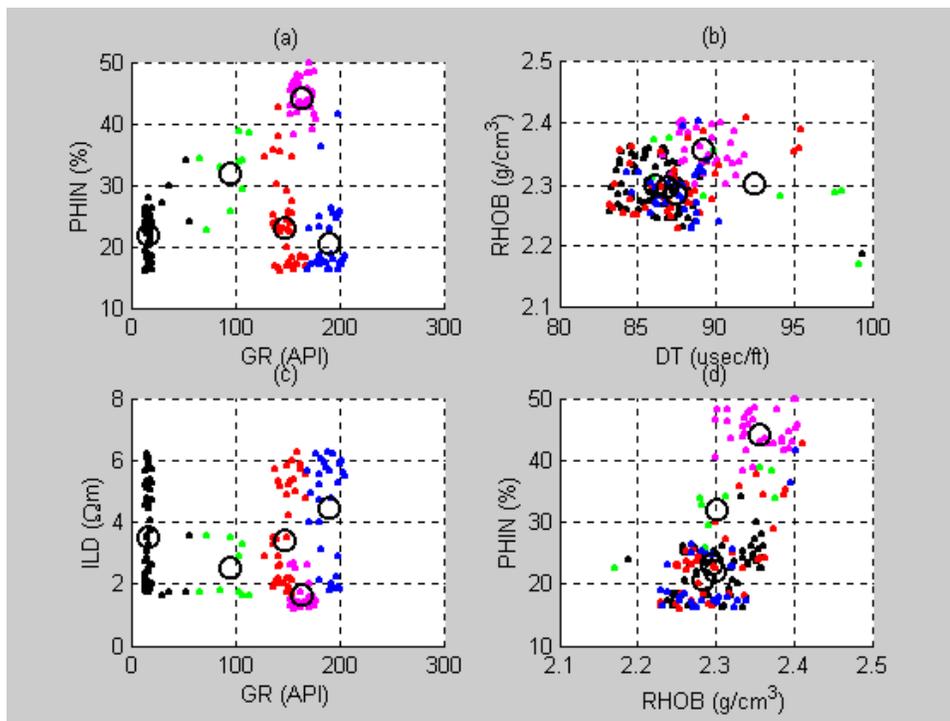


Gráfico 10: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

A figura 20 apresenta os perfis sintéticos gerados e o reconhecimento dos padrões obtidos com a aplicação da lógica fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água.

Os três reservatórios foram reconhecidos. Os dois primeiros reservatórios aproximadamente entre 1 e 4,5 m e entre 5 e 8m, com gás, óleo e água. O outro reservatório, com óleo, entre 12,5 e 13,5m. Para este último reservatório foi simulado a presença de reservatório com elevado grau de radioatividade. A introdução do vínculo com o objetivo de eliminar a ambigüidade existente entre a identificação de folhelhos e reservatórios radioativos mostrou-se eficaz pois o reservatório foi devidamente reconhecido.

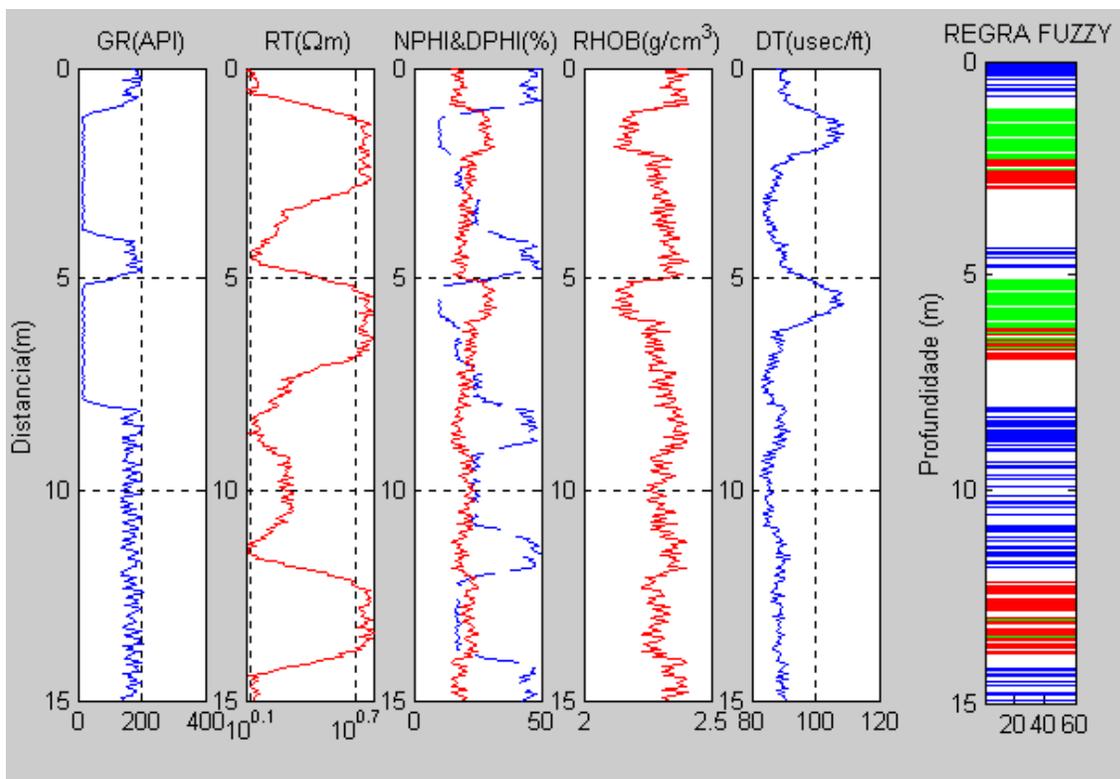


Figura 20: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy para o perfil sintético 3. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água. Os três reservatórios foram reconhecidos, bem como todas as camadas de folhelho.

7.2- Perfis reais

Perfis reais foram utilizados com o propósito de avaliar a funcionalidade da técnica proposta em dados reais.

Foram utilizados então perfis do Campo de Namorado, Bacia de Campos, disponibilizados pela ANP (Agência Nacional de Petróleo).

Para escolha dos poços levou-se em consideração os que possuíam testemunhos e que, neste trecho, apresentassem também dados de perfilagem com a utilização dos cinco perfis em boa qualidade. Com isso, chegou-se ao número de 6 poços: NA1, NA2, NA 4, NA11, NA12 e RJS 19.

A identificação obtida com a utilização da lógica fuzzy foi então comparada aos dados de testemunho observados nos ANASETES dos respectivos poços (Anexos I a VI). Vale ressaltar que deve ser observada a resolução de cada método: perfilagem – testemunhagem (Figura 8). Os dados de testemunho apresentam resolução melhor que os dados de perfilagem, sendo assim, finas camadas de folhelho, por exemplo, são detectadas em testemunhos e não o são em perfilagem devido a própria resolução das sondas (Figura 17).

Em relação aos perfis sintéticos, os perfis reais apresentam muito mais ruído, que acabam por interferir na identificação, porém, sem invalidá-la.

7.2.1- Poço Na 1

O trecho utilizado deste poço foi de 2950 a 3200m. A parte com dados de testemunho corresponde ao trecho de 3005 a 3020m. Constitui-se um pacote de arenito médio maciço gradado, diamictito areno lamoso, arenito com folhelho finamente estratificados e siltito argiloso. É possível observar indícios de hidrocarbonetos (ANEXO I).

Na Figura 21, na porção que se compara com o trecho testemunhado, nota-se a presença de hidrocarboneto, relatada também nos testemunhos. Devido a resolução do perfil, não é possível identificar as camadas mais finas, apenas um pacote como um todo de arenito. Correspondente a fácies arenito médio maciço gradado (fácies 11 do ANASETE) e arenito/folhelho finamente estratificado (fácies 8) predominantes.

Fazendo uma análise visual dos perfis, é marcante a presença de ruídos, mas, ainda assim, a avaliação feita com a lógica fuzzy demonstrou-se coerente com os parâmetros adotados e com o que se consideraria numa análise visual.

Vale ressaltar, porém, que a identificação visual neste caso é muito difícil devido à magnitude dos ruídos, sendo a técnica proposta então, mais consistente.

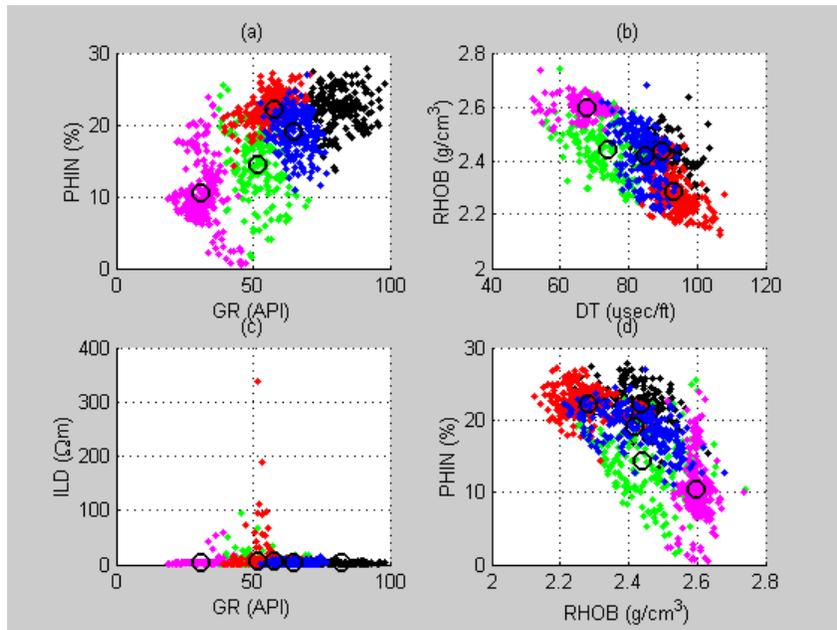


Gráfico 11: Gráficos perfil versus perfil do poço NA 1, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”. Os círculos pretos indicam o centro de cada grupo.

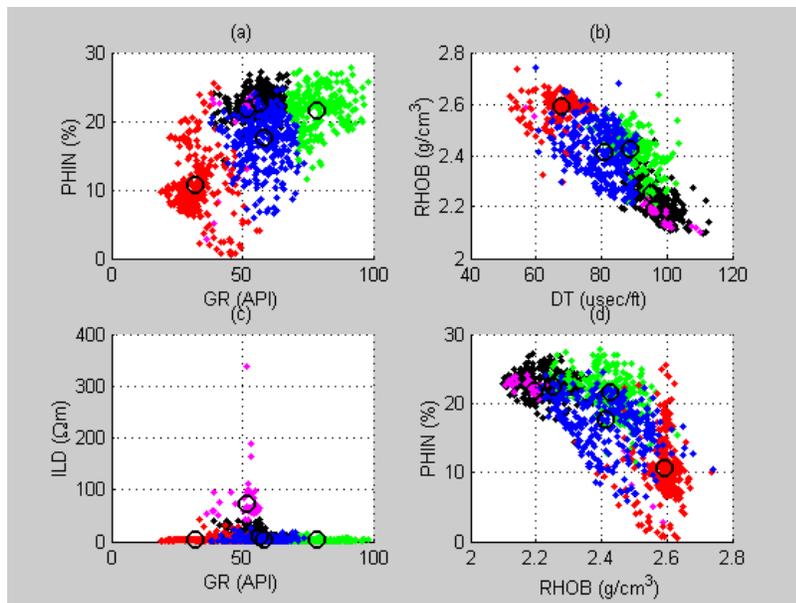


Gráfico 12: Após reconhecido o padrão “reservatório com gás”, gera-se mais uma vez os gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

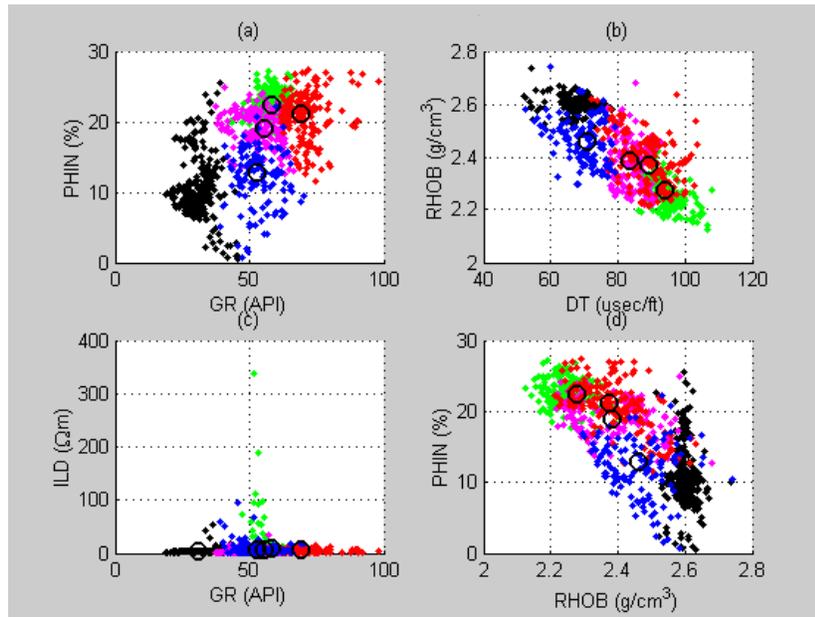


Gráfico 13: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

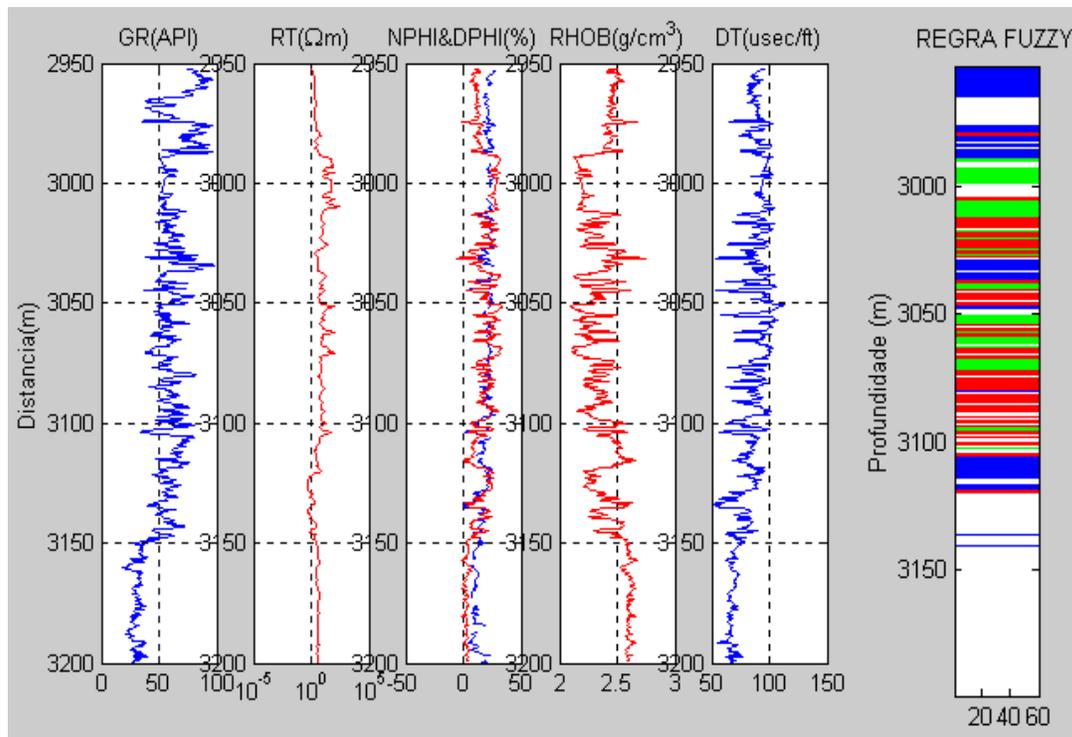


Figura 21: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão "reservatório com gás", na cor azul o padrão "folhelho", na cor vermelha, o padrão "reservatório com óleo" e em branco o reservatório com água.

7.2.2- Poço Na 2

O trecho utilizado deste poço foi de 3010 a 3055m. A parte com dados de testemunho corresponde ao trecho de 3016 a 3054m. Constitui-se um pacote de siltito argiloso estratificado, folhelho, arenito/folhelho finamente estratificado. É possível observar indícios de hidrocarbonetos (ANEXO II).

Na Figura 22, na porção que se compara com o trecho testemunhado, entre 3015m a 3030m há um grande pacote de siltito argiloso e folhelho, identificados no padrão “folhelho”. Próximo a 3032m há um indício de HC, identificado com a regra fuzzy também. De 3040m a 3055m, há a presença de um grande reservatório, reconhecido com o padrão “reservatório com óleo”. O caráter intermitente dado na interpretação com a lógica fuzzy ocorre devido à presença de ruído.

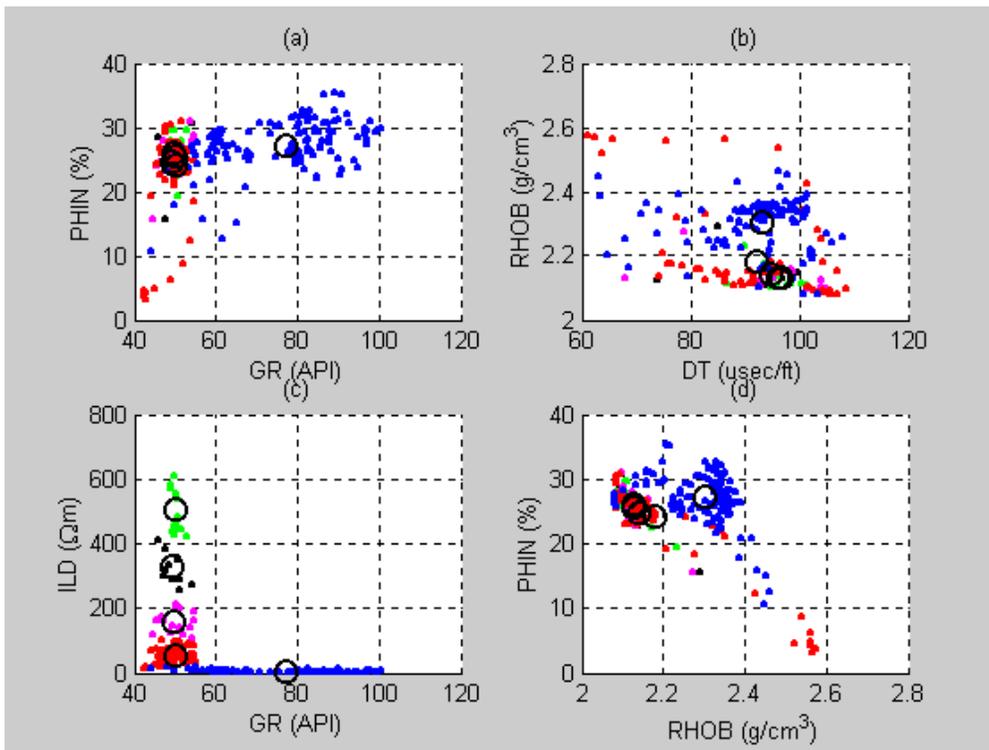


Gráfico 14: Gráficos perfil versus perfil do poço NA 2, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”. Os círculos pretos indicam o centro de cada grupo.

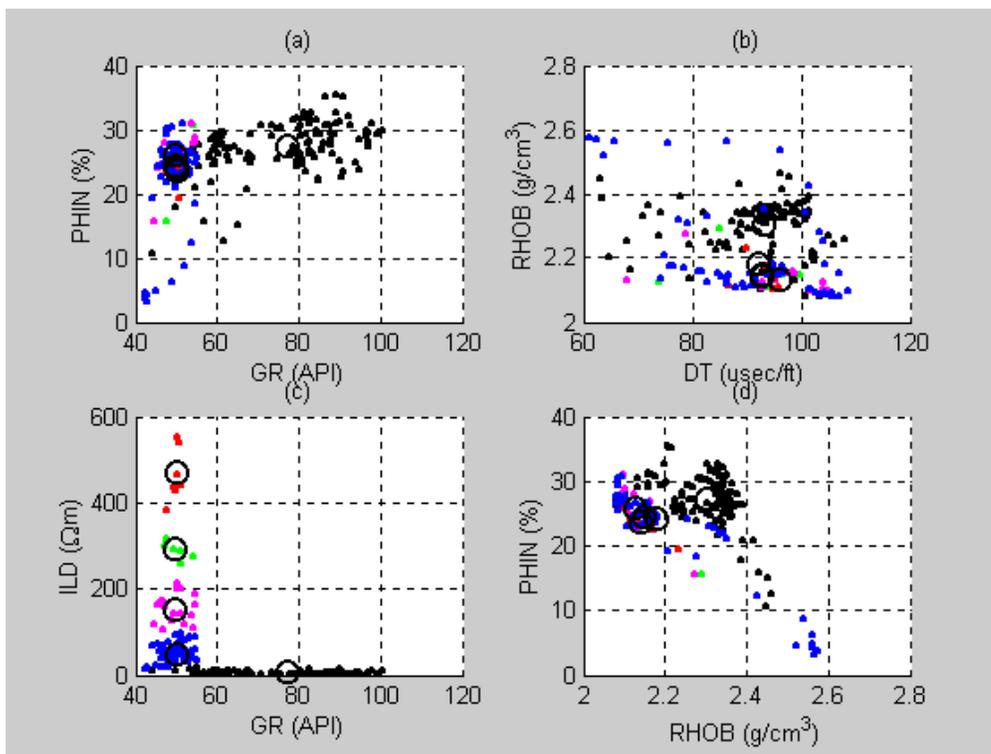


Gráfico 15: Após reconhecido o padrão “reservatório com gás”, gera-se mais uma vez os gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

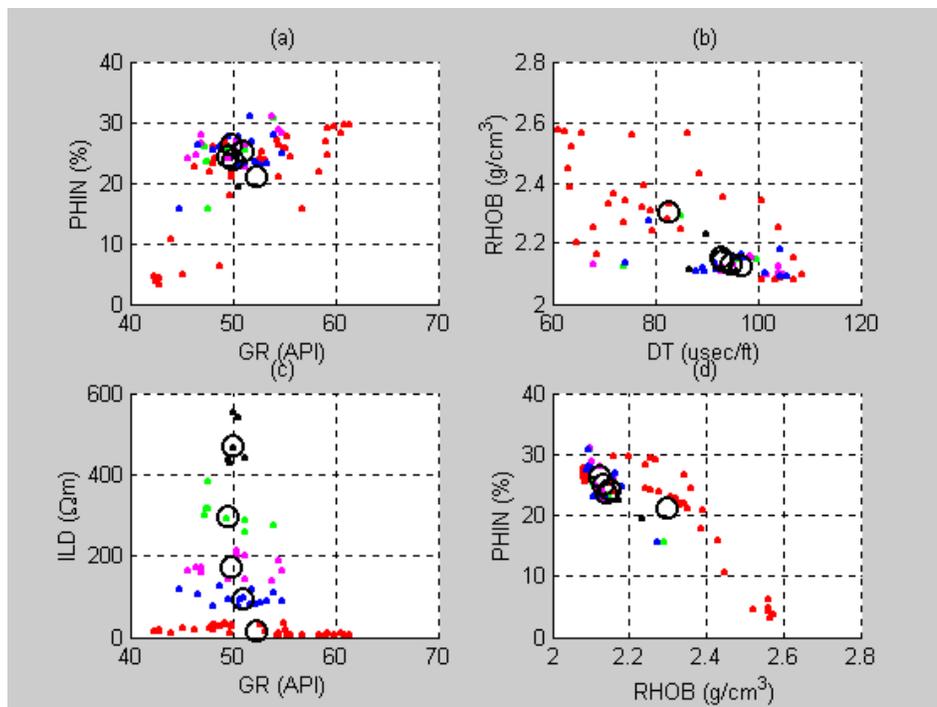


Gráfico 16: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

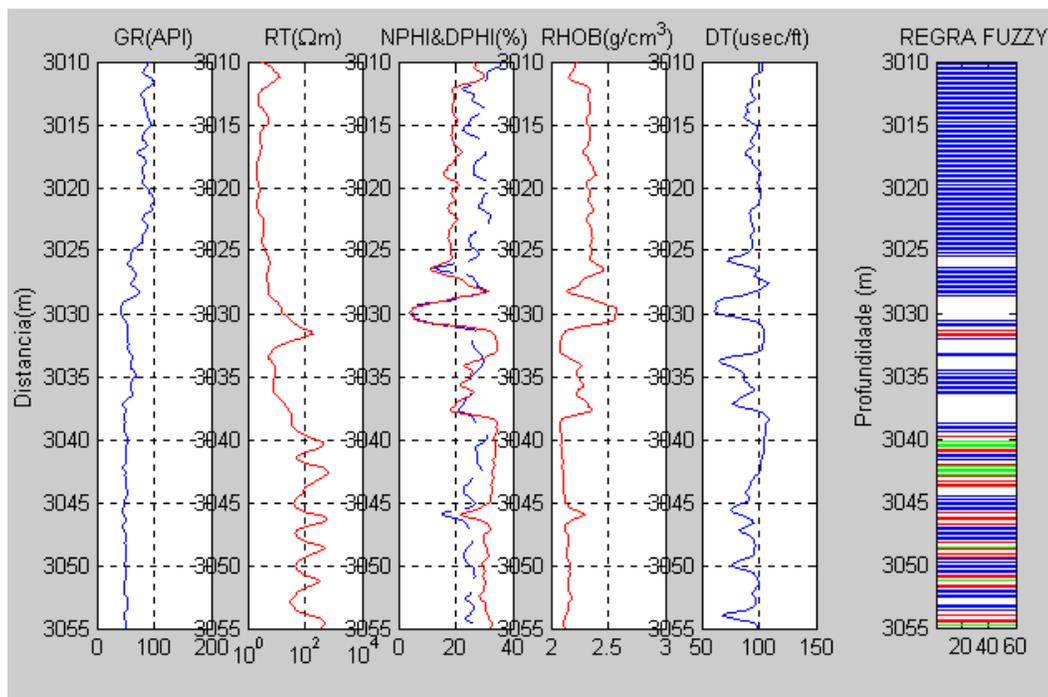


Figura 22: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água. Na porção que se compara com o trecho testemunhado, entre 3015m a 3030m há um grande pacote de siltito argiloso e folhelho, identificados no padrão “folhelho”. Próximo a 3032m há um indício de HC, identificado com a regra fuzzy também. De 3040m a 3055m, há a presença de um grande reservatório, reconhecido com o padrão “reservatório com óleo”.

7.2.3- Poço Na 4

O trecho utilizado deste poço foi de 2950 a 3150m. A parte com dados de testemunho corresponde ao trecho de 3036 a 3042m, 3048 a 3054m, 3055 a 3070m e 3086 a 3114m. Os dois primeiros trechos são compostos sobretudo por arenito médio gradado (fácies 8), o terceiro trecho de intercalações de siltito argiloso e margas (fácies 13-ANEXO III) e o quarto trecho é um grande reservatório.

Na Figura 23, na porção que se compara com o trecho testemunhado, entre 3036m a 3042m e 3048 a 3054m observa-se a presença de hidrocarboneto, reconhecido no testemunho e com a regra fuzzy. Entre 3055 e 3070 há a presença de siltito argiloso intercalado com margas, também reconhecido com a lógica fuzzy. De 3086 a 3114, há a presença de um grande reservatório, reconhecido com o padrão “reservatório com óleo”. O caráter intermitente dado na interpretação com a lógica fuzzy ocorre devido à presença de ruído.

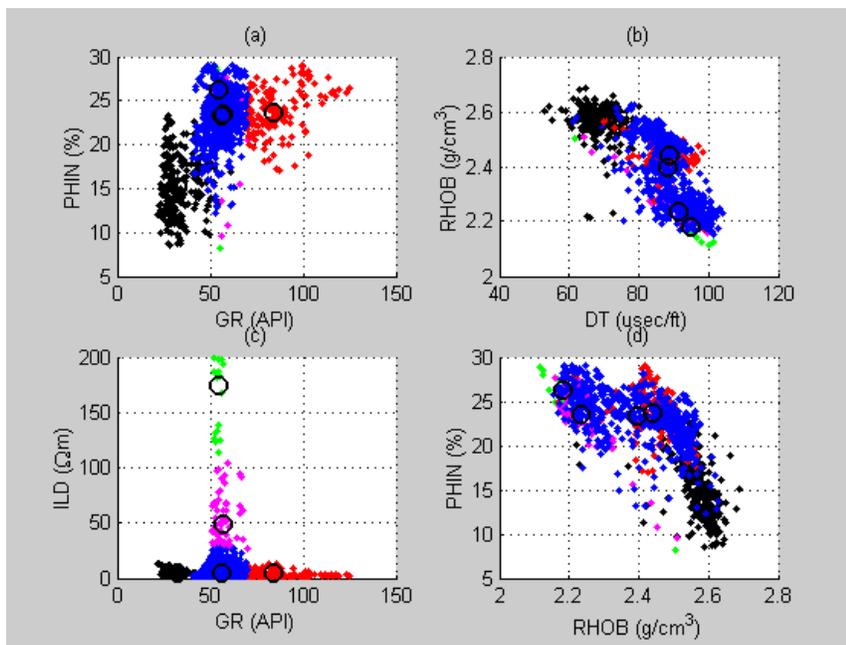


Gráfico17: Gráficos perfil versus perfil do poço NA 4, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.

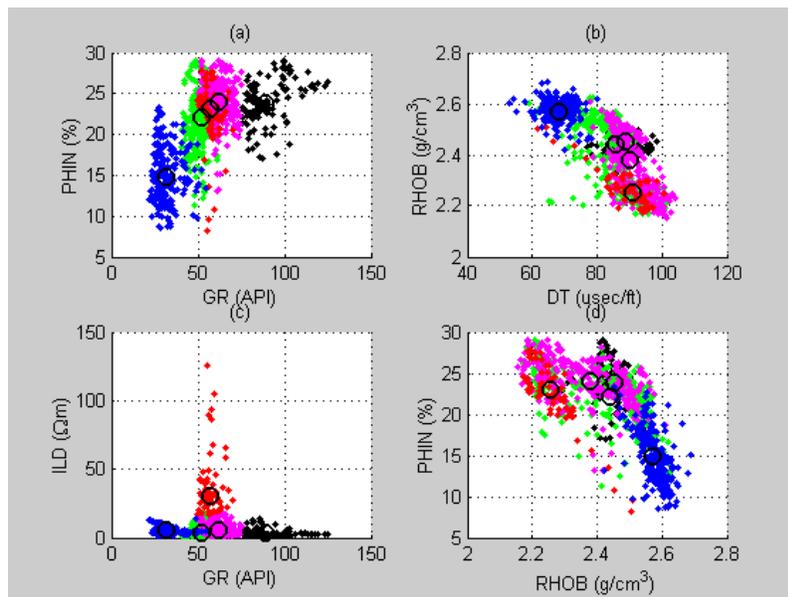


Gráfico 18: Após reconhecido o padrão “reservatório com gás” gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

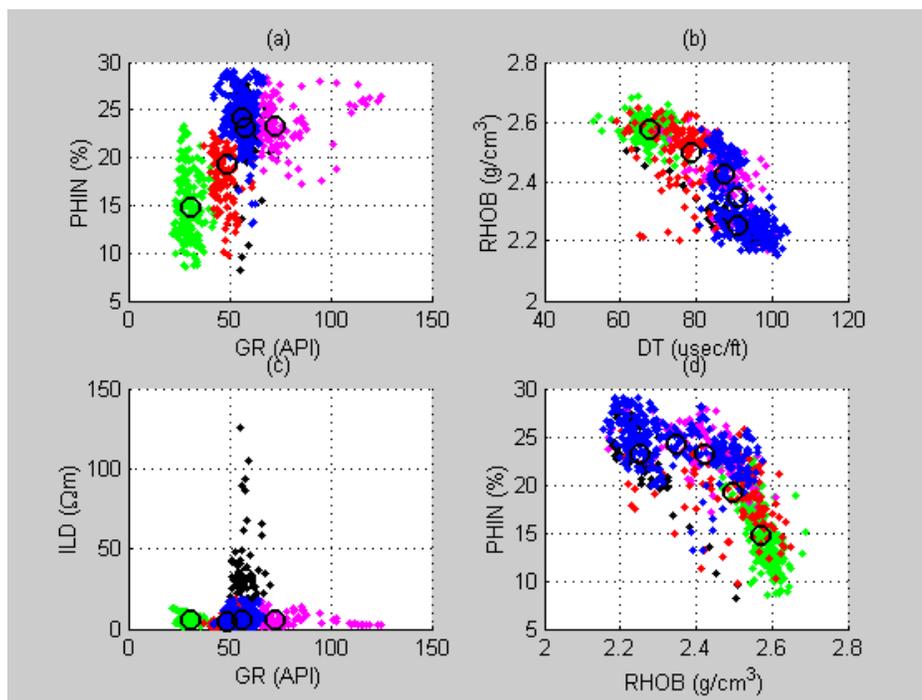


Gráfico 19: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

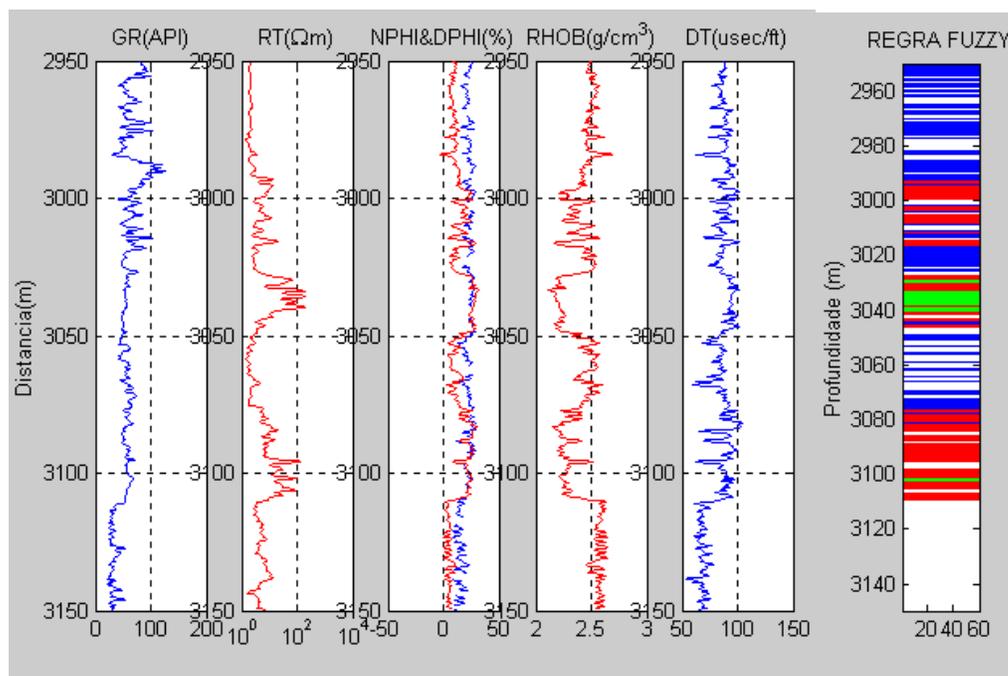


Figura 23: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água. Na porção que se compara com o trecho testemunhado, entre 3036m a 3042m e 3048 a 3054m observa-se a presença de hidrocarboneto, reconhecido no testemunho e com a regra fuzzy. Entre 3055 e 3070 há a presença de siltito argiloso intercalado com marga, também reconhecido com a lógica fuzzy. De 3086 a 3114, há a presença de um grande reservatório, reconhecido com o padrão “reservatório com óleo”.

7.2.4- Poço Na 11

O trecho utilizado deste poço foi de 3040 a 3200m. A parte com dados de testemunho corresponde ao trecho de 3060 a 3090m. A maior parte constitui-se de margas bioturbadas (fácies 17-ANEXO V), com uma pequena área com indícios de hidrocarboneto próximo a 3072m.

Na Figura 25, na porção que se compara com o trecho testemunhado, observa-se a presença de hidrocarboneto próximo a 3072m, reconhecido no testemunho e com a regra fuzzy. Entre 3060 e 3090 a lógica fuzzy reconhece a margas bioturbadas como sendo padrão folhelho. O restante da perfilagem, no trecho não testemunhado, mostra coerência na identificação dos padrões em relação a uma análise visual.

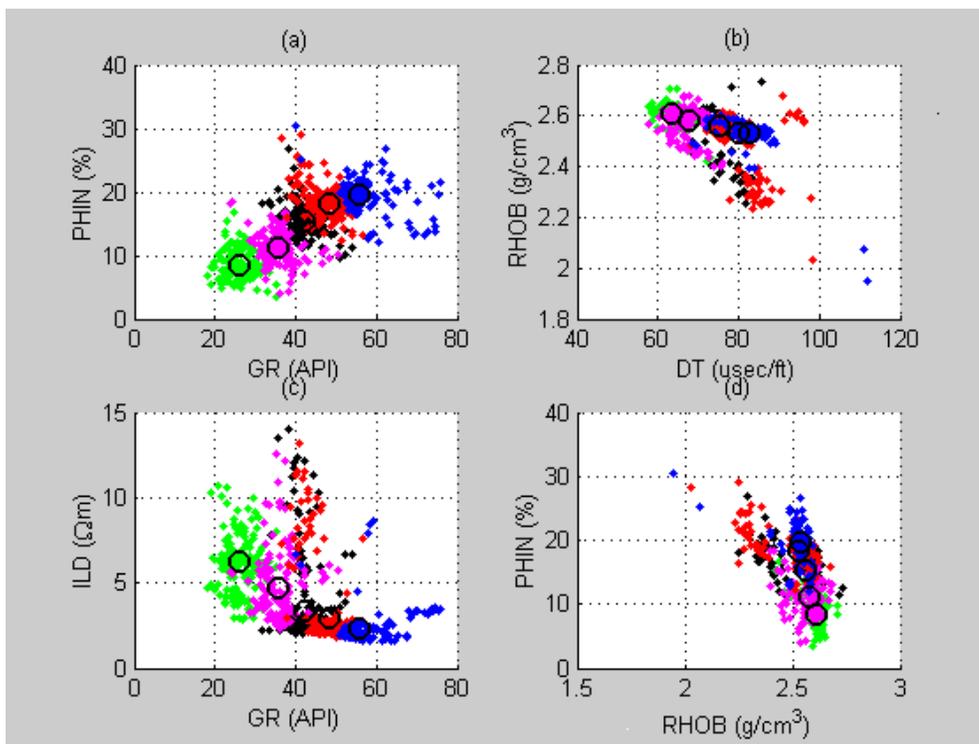


Gráfico 20: Gráficos perfil versus perfil do poço NA 11, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: "reservatório com gás". Os círculos pretos indicam o centro de cada grupo.

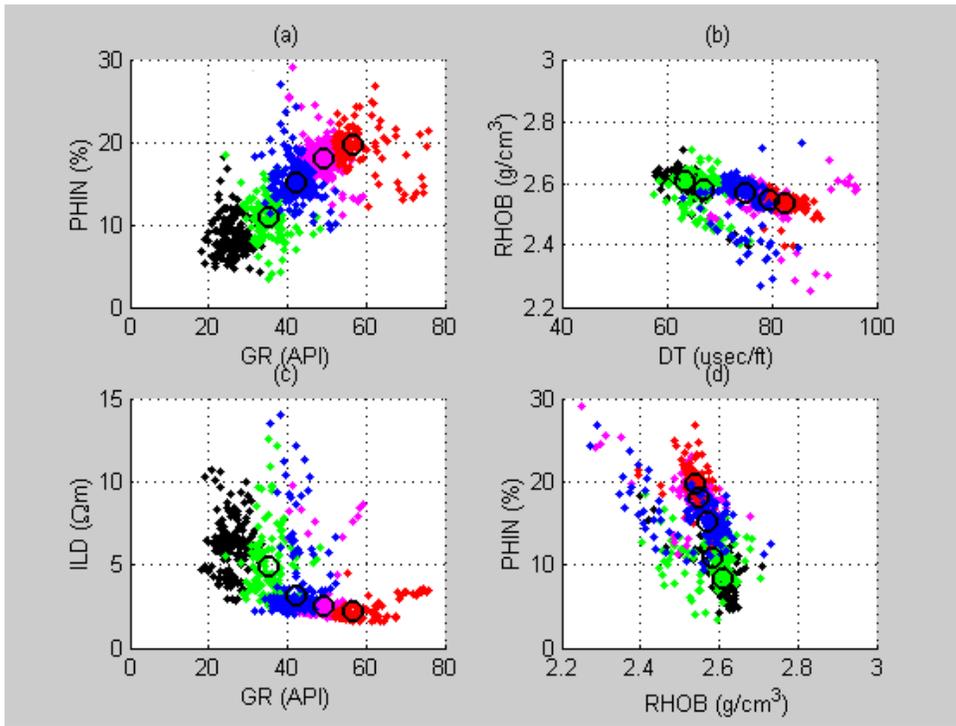


Gráfico 21: Após reconhecido o padrão "reservatório com gás", gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

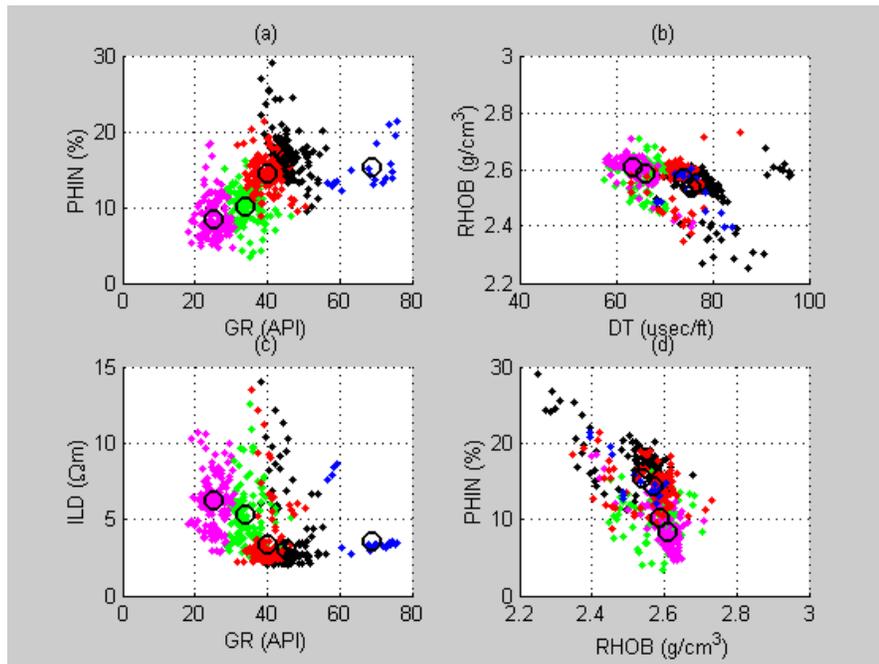


Gráfico 22: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

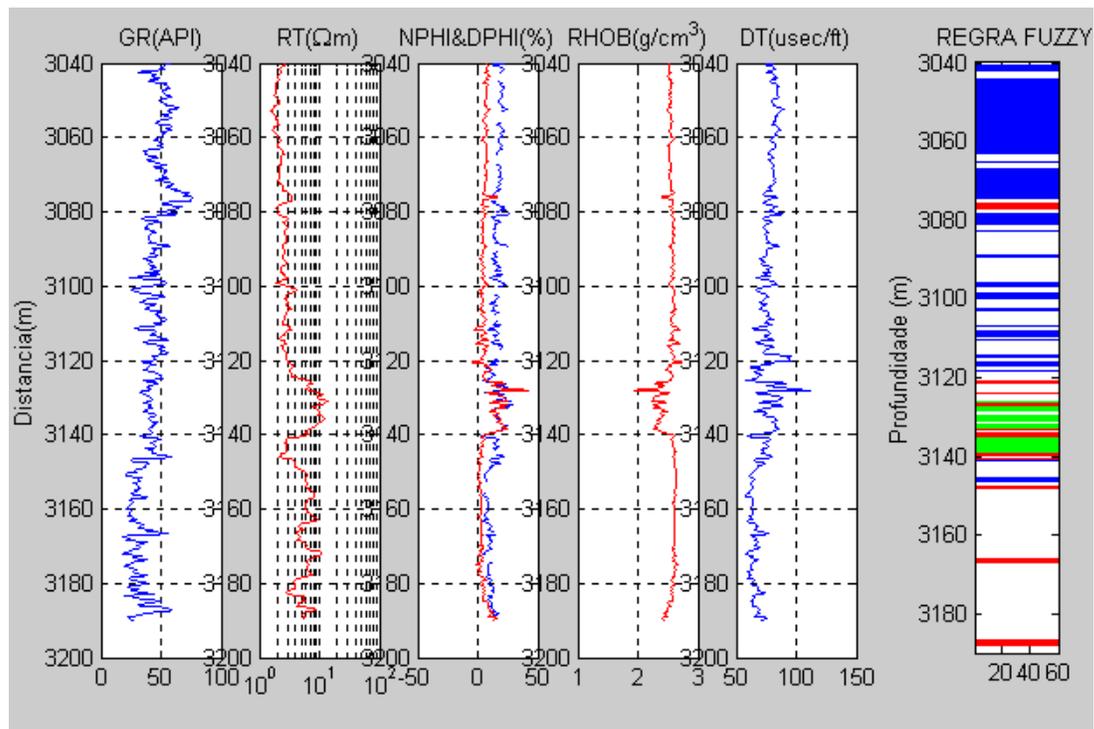


Figura 24: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão “reservatório com gás”, na cor azul o padrão “folhelho”, na cor vermelha, o padrão “reservatório com óleo” e em branco o reservatório com água. Na porção que se compara com o trecho testemunhado, observa-se a presença de hidrocarboneto próximo a 3072m, reconhecido no testemunho e com a regra fuzzy. Entre 3060 e 3090 a lógica fuzzy reconhece a marga bioturbada como sendo padrão folhelho.

7.2.5- Poço Na 12

O trecho utilizado deste poço foi de 3000 a 3160m. A parte com dados de testemunho corresponde aos trechos de 3001 a 3006m, 3010 a 3026m, 3028 a 3040, 3041 a 3048m, 3050 a 3056m, 3057 a 3074m, 3076 a 3105m, 3108 a 3115m e 3120 a 3137m.

Na Figura 25, na porção que se compara com o trecho testemunhado, observa-se a presença de hidrocarboneto nos trechos 3001 a 3026m, sendo que a partir de aproximadamente 3016m o arenito passa a ser intercalado com material fino (padrão “folhelho”), sendo estes padrões reconhecidos com a regra fuzzy. Entre 3060 e 3080 a lógica fuzzy reconheceu o outro grande reservatório do poço, como indicado nos dados de testemunho.

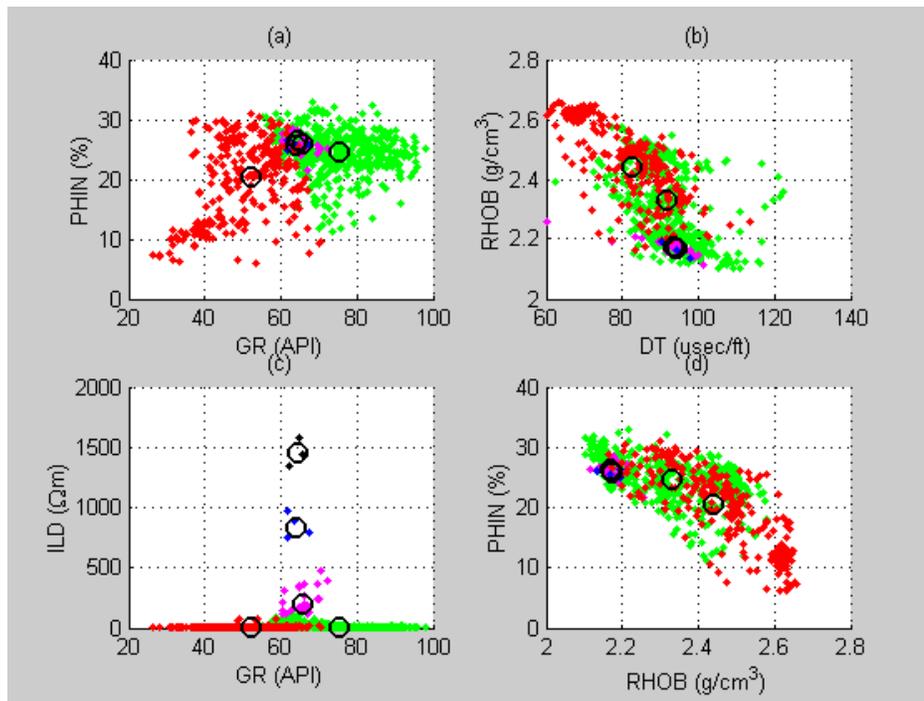


Gráfico 23: Gráficos perfil versus perfil do poço NA 12, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.

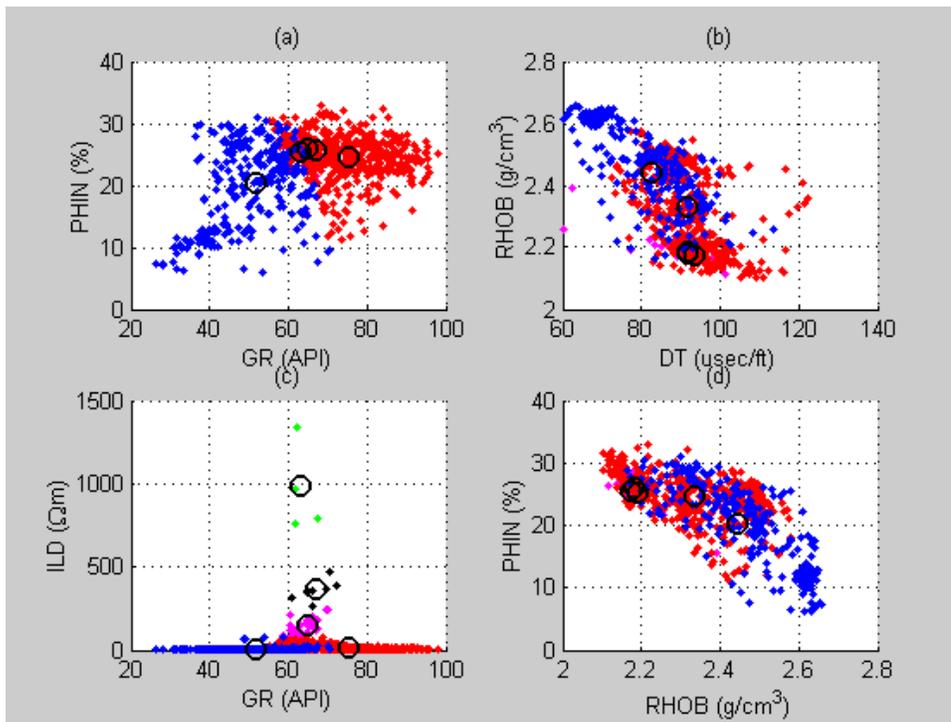


Gráfico 24: Após reconhecido o padrão “reservatório com gás”, gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.

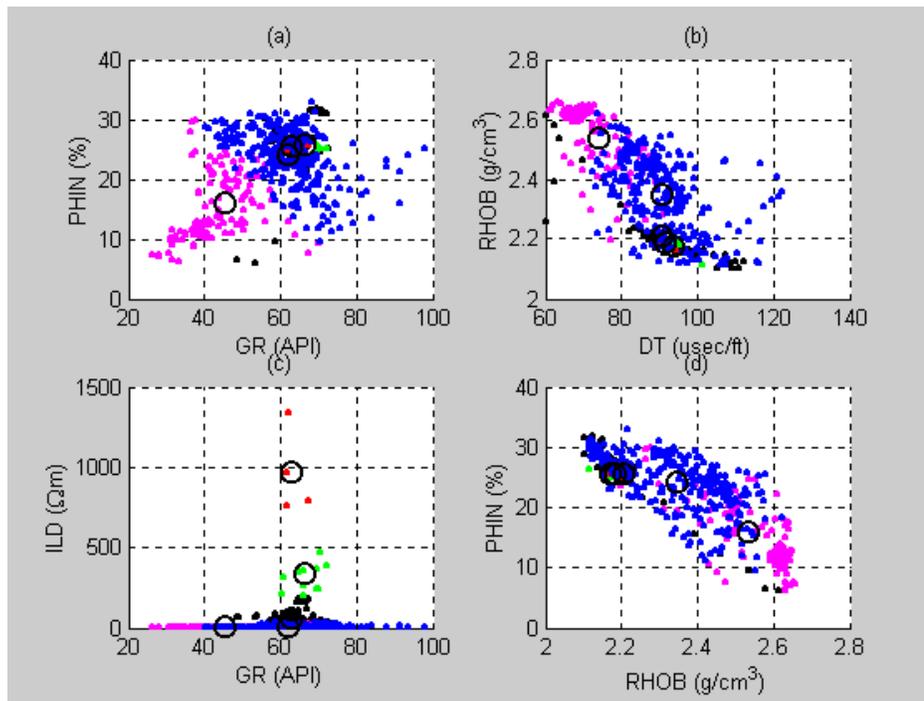


Gráfico 25: Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

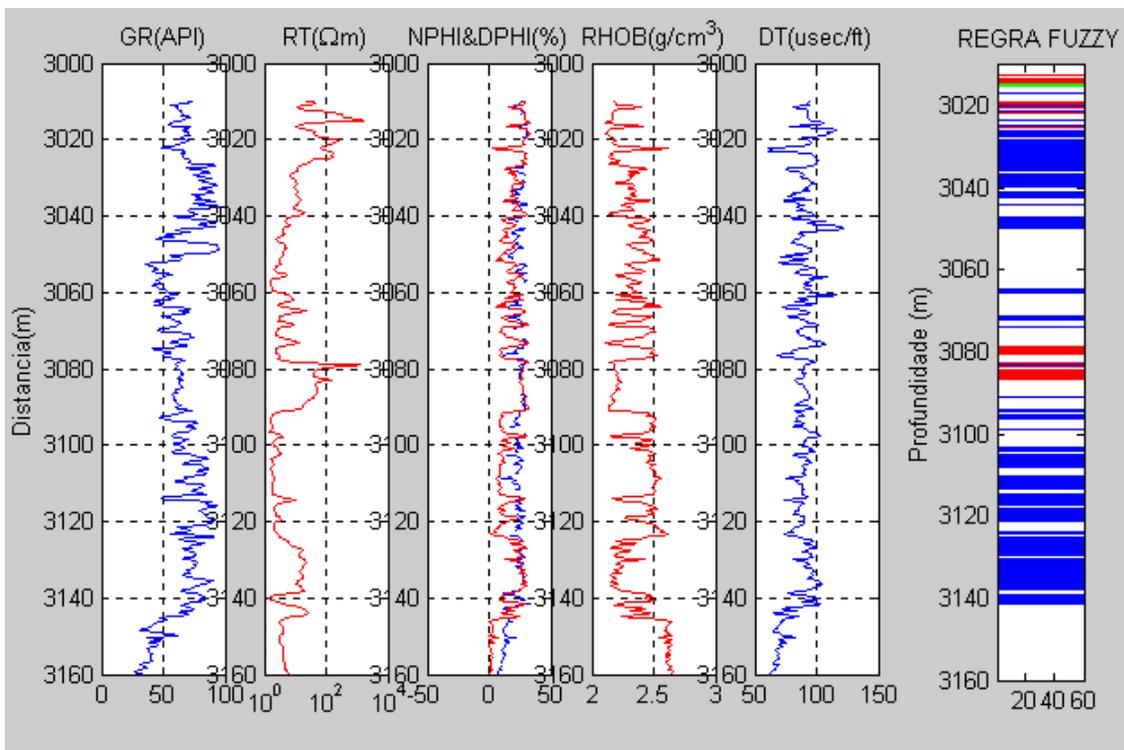


Figura 25: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão "reservatório com gás", na cor azul o padrão "folhelho", na cor vermelha, o padrão "reservatório com óleo" e em branco o reservatório com água. Na porção que se compara com o trecho testemunhado, observa-se a presença de hidrocarboneto nos trechos 3001 a 3026m, sendo que a partir de aproximadamente 3016m o arenito passa a ser intercalado com material fino (padrão "folhelho". Entre 3060 e 3080 a lógica fuzzy reconheceu o outro grande reservatório do poço.

7.2.6- Poço RJS 19

O trecho utilizado deste poço foi de 2940 a 3100m. A parte com dados de testemunho corresponde aos trechos de 3002 a 3015m. Neste trecho marga bioturbada (fácies 17) com finas camadas de arenito maciço (fácies 8- Anexo VI).

Na Figura 26, a parte testemunhada, entre 3002 e 3015m, constituída de marga bioturbada foi reconhecida pela lógica fuzzy como no padrão “folhelho” com finas intercalações de arenito com indícios de hidrocarboneto próximo a 3006m. O restante da interpretação é coerente com a análise visual, reconhecendo os dois principais reservatórios, de 2970 a 2990m e de 3055 a 3078m. O caráter intermitente observado na interpretação com a lógica fuzzy é dado pela presença de ruídos.

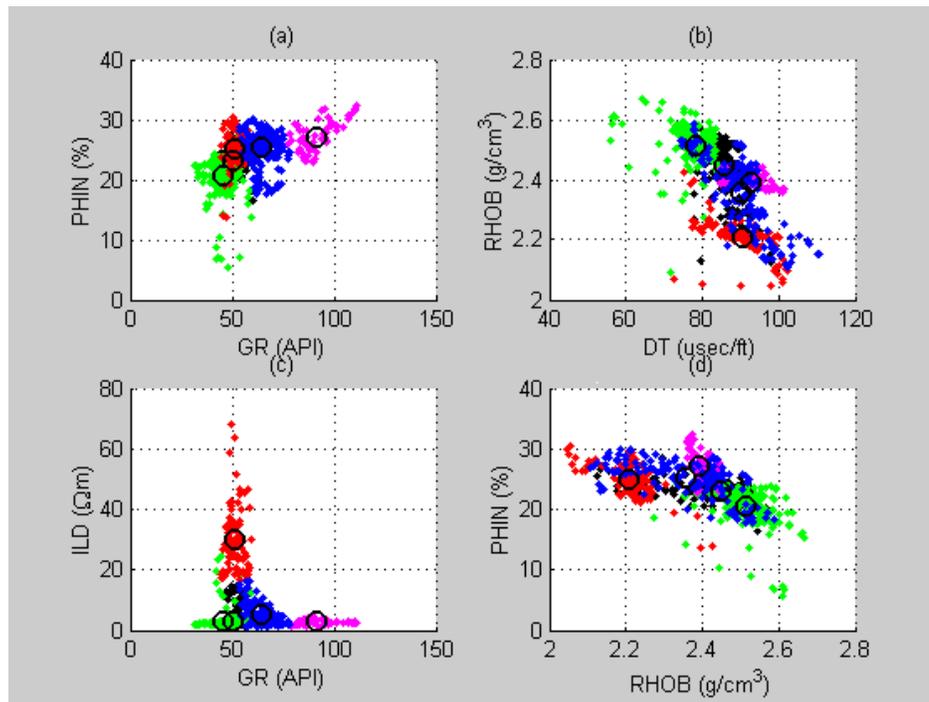


Gráfico 26: Gráficos perfil versus perfil do poço RJS 19, na aplicação da lógica fuzzy para reconhecimento do primeiro padrão: “reservatório com gás”.

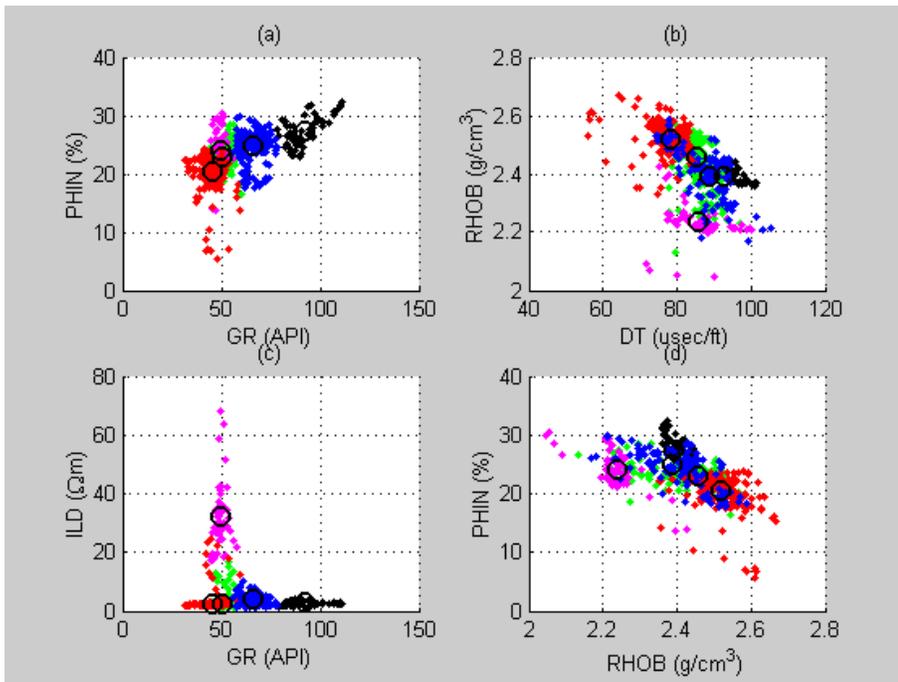
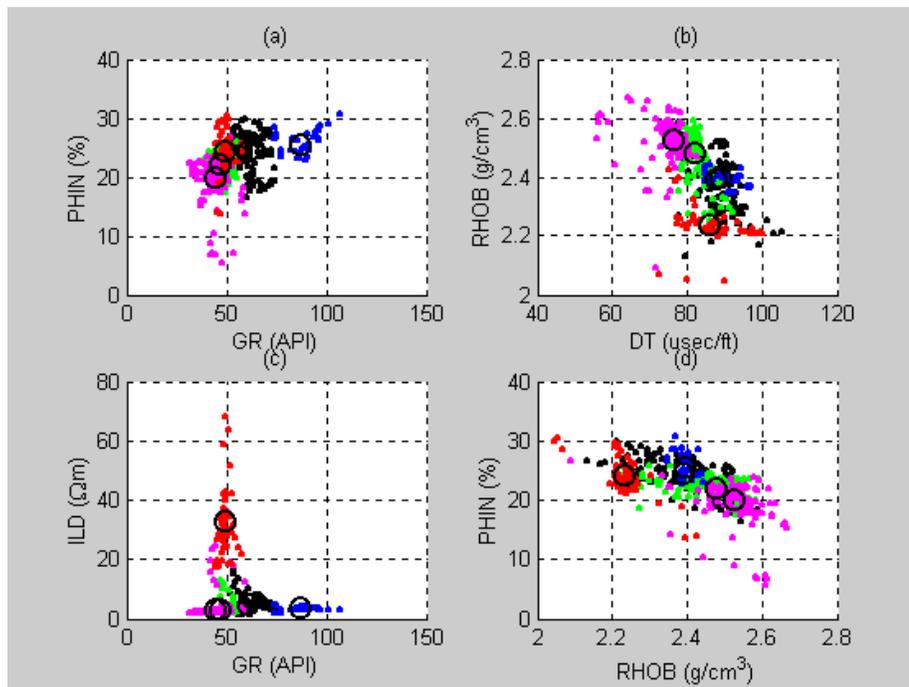


Gráfico 27: Após reconhecido o padrão “reservatório com gás”, gráficos perfil X perfil, excluindo-se os pontos reconhecidos como reservatório com gás.



Perfil versus perfil após excluídos os pontos identificados como gás e folhelho.

Gráfico 28:

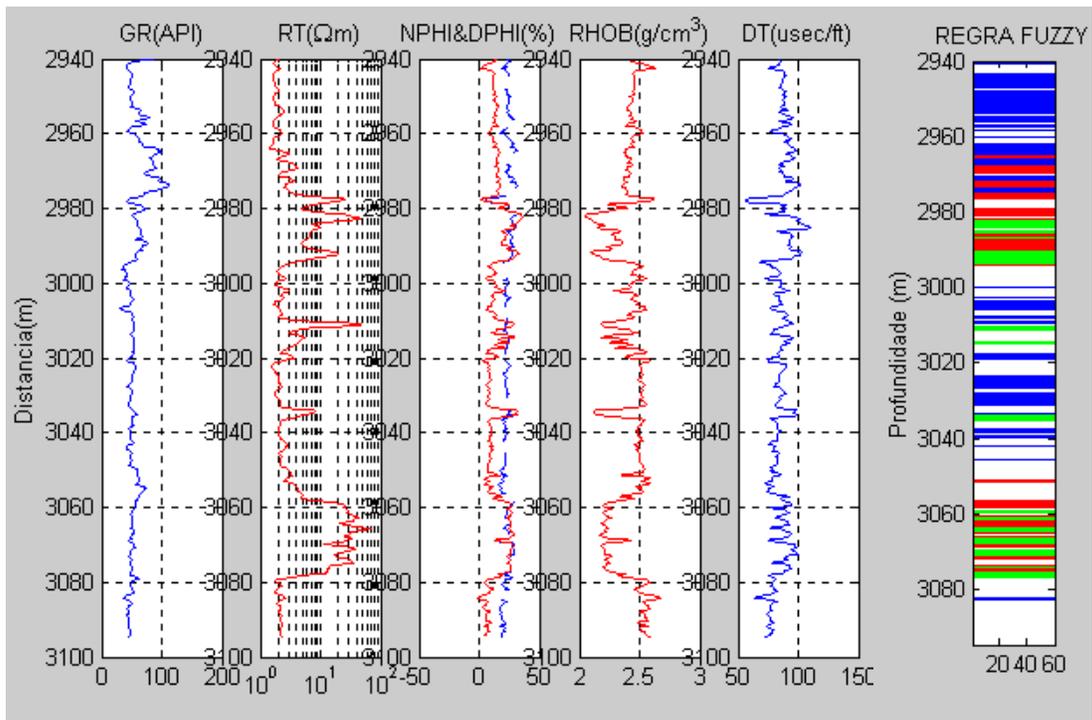


Figura 26: Perfis gerados e a interpretação obtida com a regra fuzzy. Na cor verde está o padrão reconhecido como padrão "reservatório com gás", na cor azul o padrão "folhelho", na cor vermelha, o padrão "reservatório com óleo" e em branco o reservatório com água. A parte testemunhada, entre 3002 e 3015m, constituída de margas bioturbada foi reconhecida pela lógica fuzzy como no padrão "folhelho" com finas intercalações de arenito com indícios de hidrocarboneto próximo a 3060m. O restante da interpretação é coerente com a análise visual, reconhecendo os dois principais reservatórios, de 2970 a 2990m e de 3055 a 3078m.

8. CONCLUSÕES

A análise qualitativa dos resultados obtidos com a metodologia fuzzy foram coerentes com a resposta esperada para os perfis sintéticos, com as análises de testemunhos dos perfis reais, e com as análises visuais realizadas na ausência de testemunhos. Isto comprova a eficácia da metodologia fuzzy na identificação de folhelhos em perfis de poço, atendendo ao objetivo de tornar-se uma ferramenta com a qual se possa segmentar os perfis de poços em zonas que atendam padrões pré-estabelecidos.

Quando aplicada em dados reais, o reconhecimento demonstrou padrão intermitente devido a grande presença de ruídos, sendo uma proposta para estudos futuros, o emprego de filtros que minimizem o efeito dos ruídos sem, no entanto, afetar a característica dos perfis. A presença deste caráter intermitente dificultou a utilização de uma análise quantitativa para avaliação dos resultados.

A técnica aqui proposta demonstrou ser particularmente eficiente na identificação de reservatórios, mesmo em situações naturais adversas, como o caso dos arenitos arcoseanos observados nos perfis reais. Todos os reservatórios foram reconhecidos.

Para aplicação da regra fuzzy, é necessário apenas a inserção dos dados em forma matricial, e a execução da rotina para identificação desenvolvida no *software* MATLABtm. O tempo necessário para que seja feita a identificação é de aproximadamente 10s.

Sendo assim, temos um método eficiente e rápido na identificação de potenciais reservatórios, e a um custo baixo, já que necessita apenas de um *software* conhecido no mercado e a um preço acessível.

Esta técnica também pode ser desenvolvida para aplicação em outros perfis, sendo necessário redefinir os parâmetros de respostas esperadas pelos diferentes tipos de formações para cada perfil, bem como novos vínculos que sejam necessários.

Este trabalho constitui-se, então, em um ponto de partida para que se desenvolva novas técnicas de reconhecimento com outros perfis, novos padrões. Podendo ser útil no auxílio a modelagem 3D, em associação com a sísmica, sobretudo em poços desprovidos de testemunhos, sendo uma técnica mais barata que a testemunhagem e mais segura que análises puramente visuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

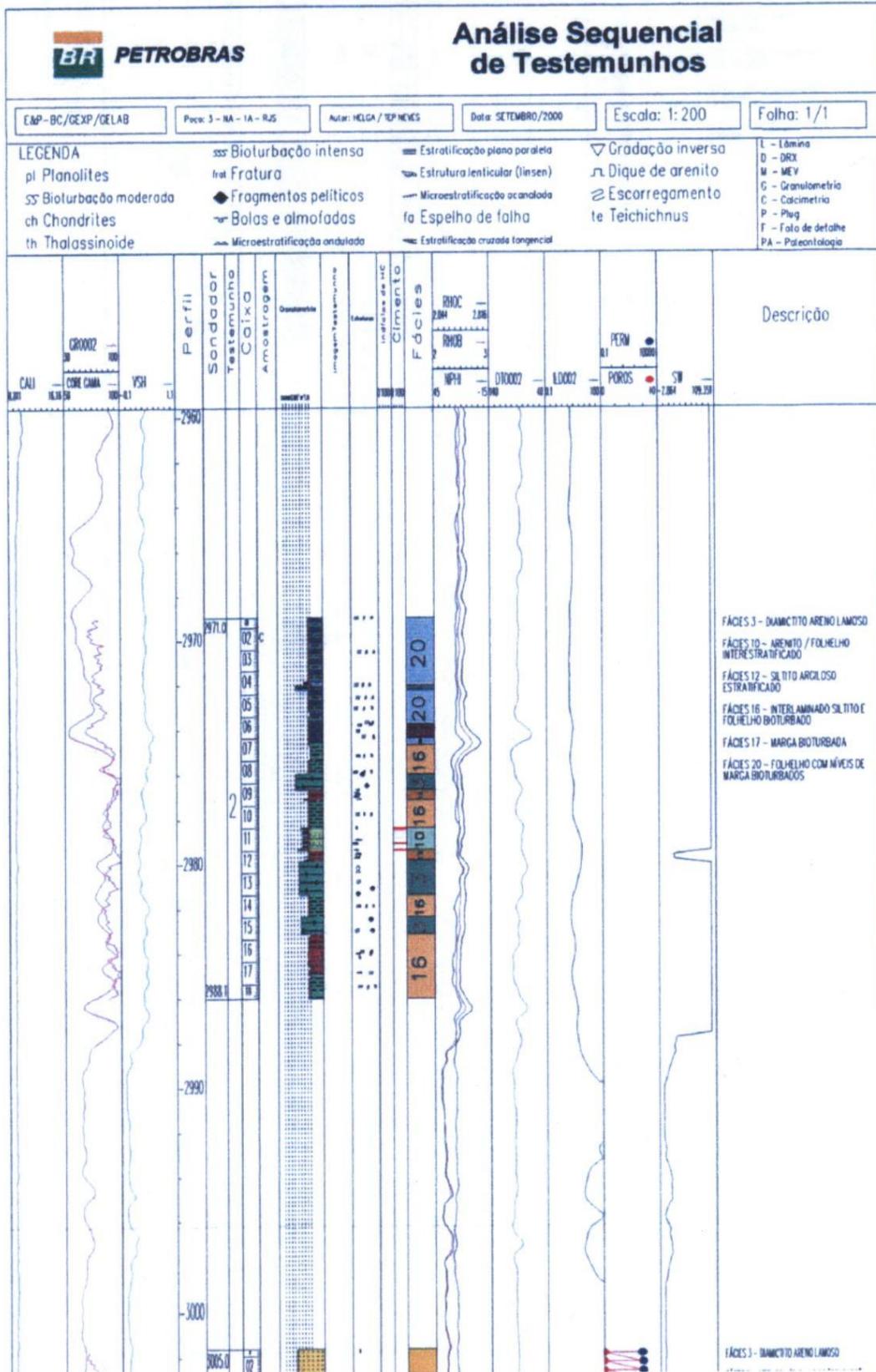
- Arbex, Roberto Tair.** Controle Fuzzy: Circuito e aplicações Revista Instec, junho/94, pg. 18-22
- Bezdek, J. C.**, 1980, A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithm. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-2, p 1-8.
- Bezdek, J. C. and Pal, S. K.**, 1992, Fuzzy Models for Pattern Recognition Method. IEEE Press, New York, 539pp.
- Camargos, F.L.**, Lógica Nebulosa: uma abordagem filosófica e aplicada. Disponível em Maio de 2004, no endereço :
<http://www.inf.ufsc.br/~barreto/trabaluno/IAfernandoLC.pdf>, UFSC-Florianópolis.
- Carvalho, R.O.**, 2001, Técnicas para predição de perfis da onda cisalhante e sua aplicação na identificação litológica no Campo de Namorado, Bacia de Campos, RJ, Monografia submetida ao curso de graduação em Geologia da UFRJ, Rio de Janeiro, 85p.
- Costa, A., Rodriguez, A.G. Simas, E.P.L., Araújo, R.S.** , Lógica Fuzzy : Conceitos E Aplicações , disponível em Maio 2004 no endereço:
http://www.inf.unisinos.br/~cazella/dss/fuzzy_relatorio.pdf, UNISINOS- RS
- Das Gupta, S. P.**, 2001, Application of a fuzzy pattern recognition method in borehole geophysics, Computers & Geosciences 27, p 85-89.
- Ellis, D. V.**, 1987, Well Logging for Earth Scientists. Elsevier, New York, p532.
- Flexa, R.T., Carrasquilla, A.G., Andrade, A.**, 2003, Aplicação de estatística multivariada na identificação de litologia nos perfis de poço, 8º Congresso Internacional de Geofísica da SBGF, Rio de Janeiro
- Fukuyama, Y. and Sugeno, M.**, 1989, A new method of choosing the number of clusters for fuzzy c-means method. Proc. 5th Fuzzy System Symposium, p 247-250.
- Johann, P.**, 2002. Geofísica de Reservatório. Minicurso realizado durante a III Semana de Geofísica da UFRJ, de 10 a 12 de dezembro de 2002, Rio de Janeiro.
- Mallick, R.K., Choudhuri, B., Vishunavat, P.**, 1996, An innovative technique resolves apparent anomalies in detection of gas zones based on neutron-density logs, Journal of Petroleum Science Engineering 18, p201-213.
- Rabe, C., Araújo, e.M.P., Gaggiotti, K., Fontoura, S.**, 2003. Caracterização de um folhelho da Bacia de Campos a partir de perfilagem de poços e ensaios de laboratório. 2º Congresso Brasileiro de P & D em petróleo e gás. 15 a 18 de junho de 2003, Rio de Janeiro.

Silva, J.C.,2003. Fundamentals of well logging. Course from Department of Petroleum and Geosystems Engineering. The University of Texas at Austin.

Tanscheit, R.,"Controle Nebuloso", *Anais do 9o Congresso Brasileiro de Automática*, Minicursos, pp. 82-95, Vitória, ES, Brasil, 1992.

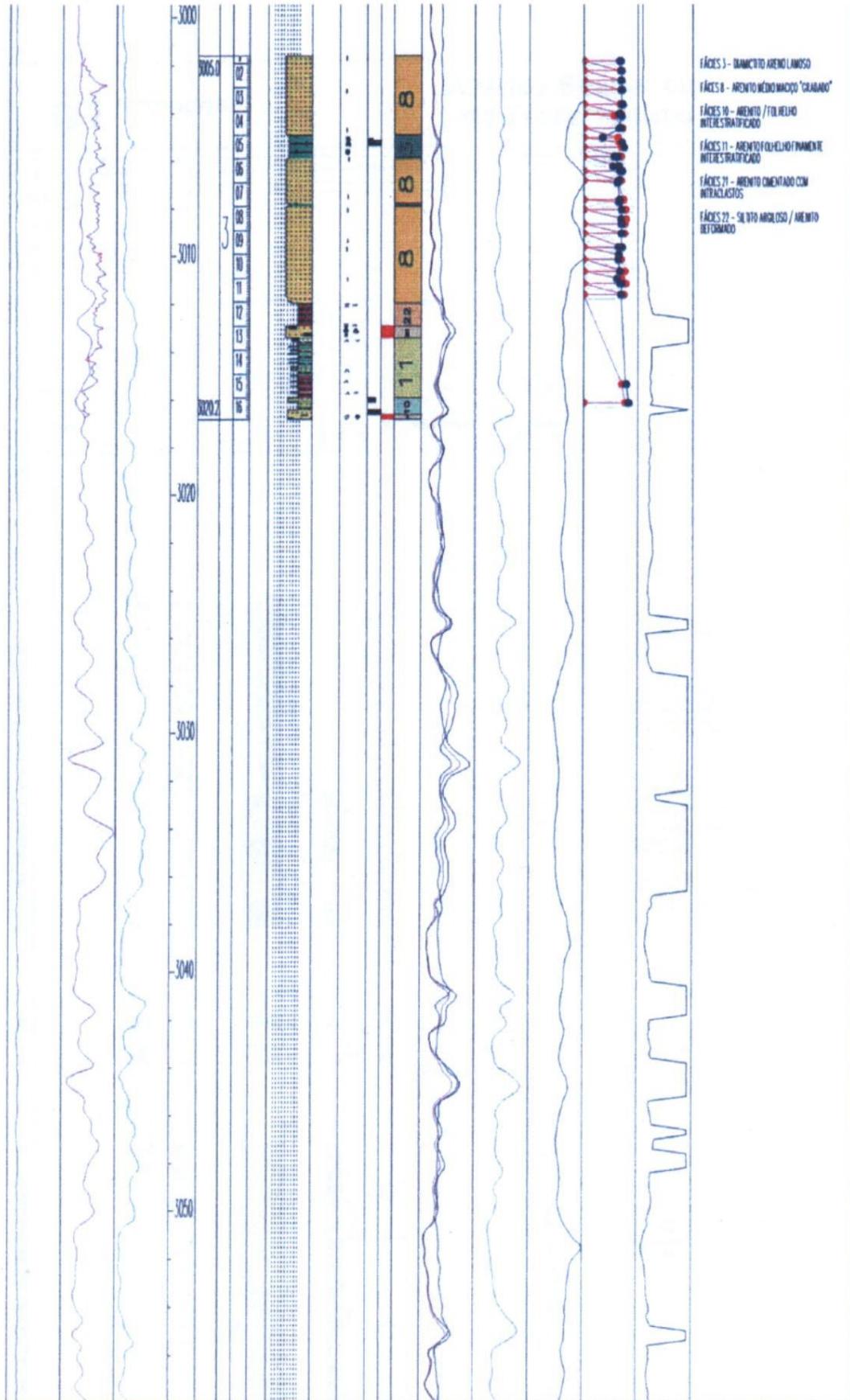
Zhang, J., Hu,Q.,Oyang,J. Lin,C., 1997, A method to evaluate reservoirs and estimate saturation by dynamic responses of dual induction logging tools. *Journal of Petroleum Science Engineering* 19, p233-240.

ANEXO I
Anasete do poço NA 1



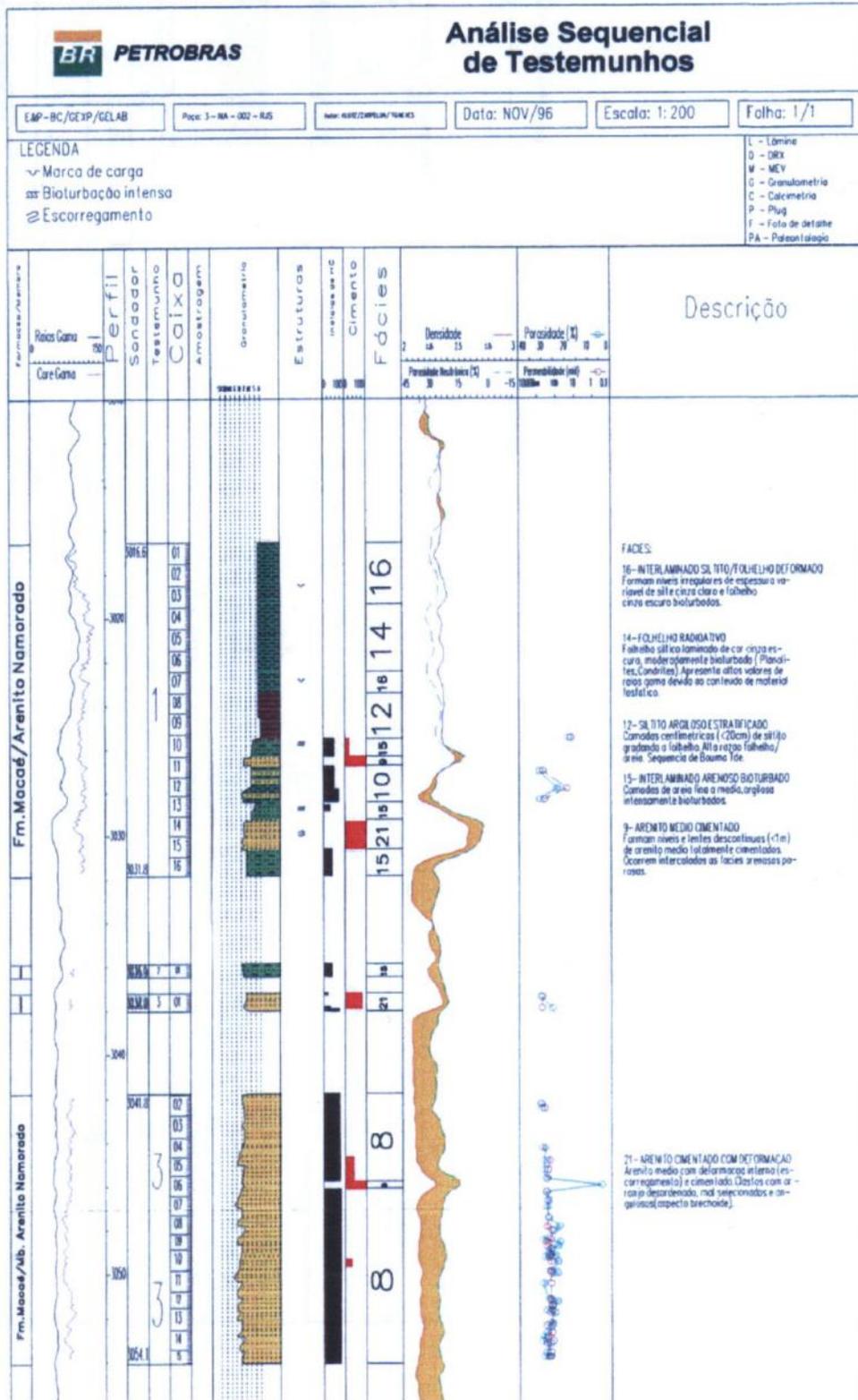
Continuação:

X

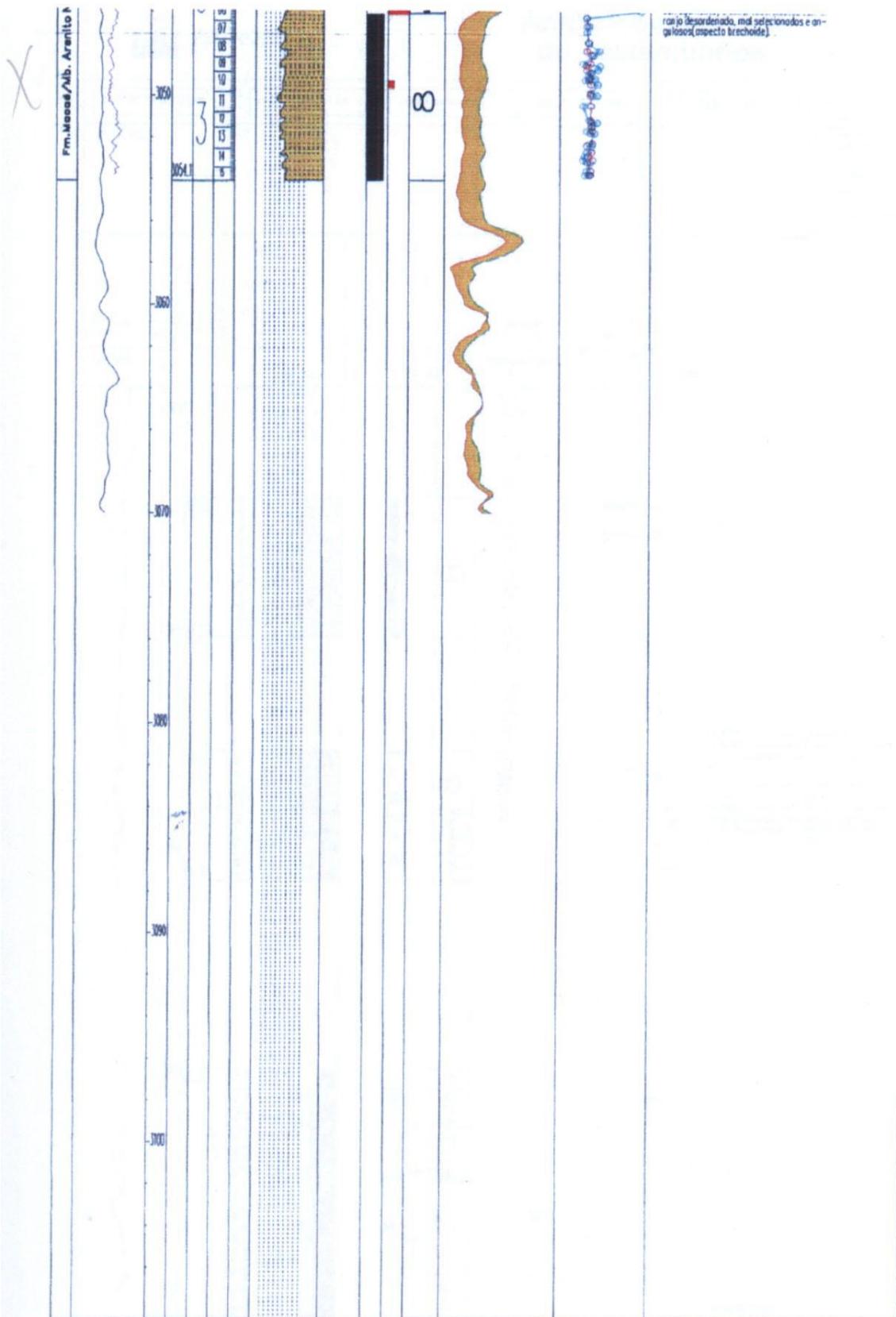


ANEXO II

Anasete do poço NA 2

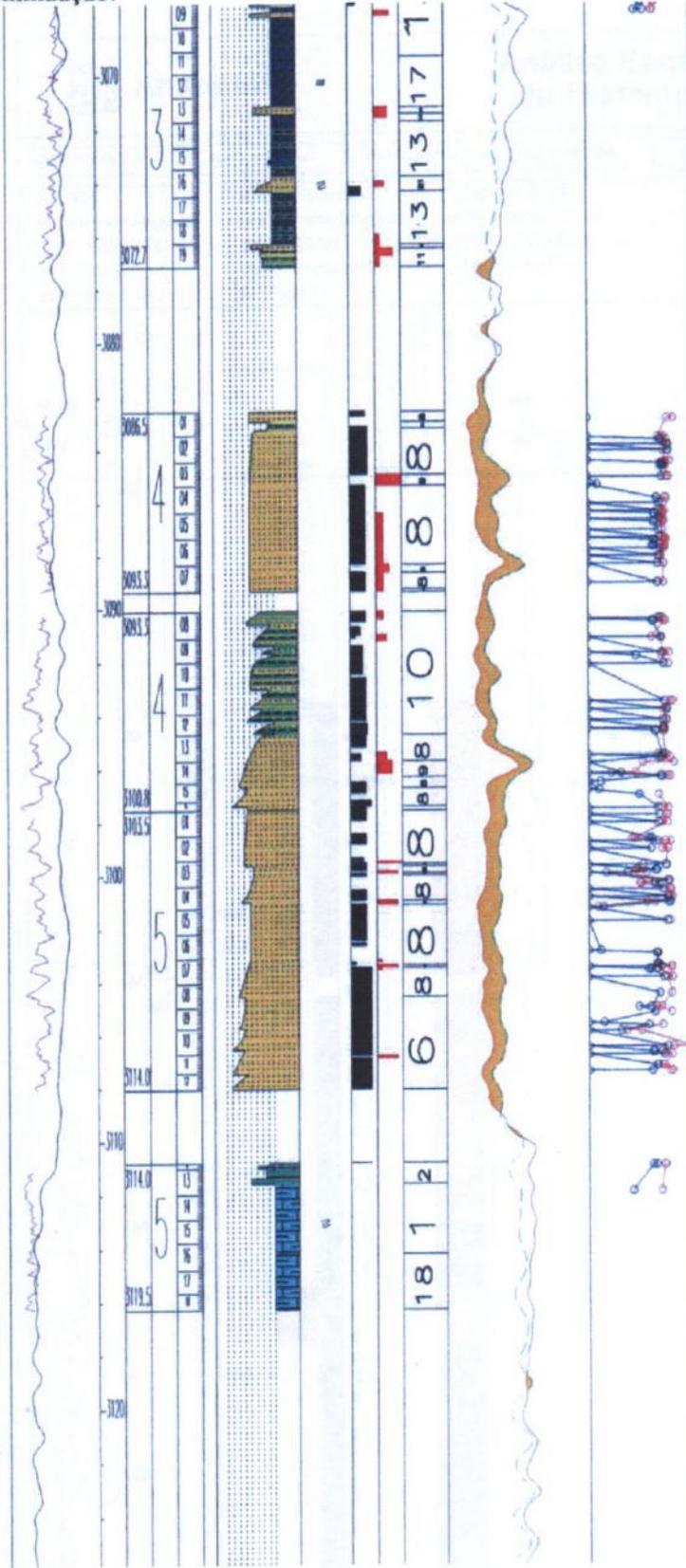


Continuação:



Continuação:

X



17 - MARCA DEFORMADA
Composta por 25,5% de CaCO₃ (bioclastos de Zoopagoras/Promelas, Heliolites, Leptobolus (conchas Zoopagoras/Nerites)).

11 - ARENITO FOLHEADO FINAMENTE INTERSTRATIFICADO
Conchas de arenito fino (plano paralelo e ripple), gradacionais a piro e folhelho (Sequência de Osmund Tucke).

FÁCIES 10 - ARENITO FOLHEADO INTERSTRATIFICADO
Interfases de areia, lã de arenito médio gradacional a arenito fino com ripple e folhelho (Sequência de Osmund Tucke).

FÁCIES 9 - ARENITO MEIO CEMENTADO
(equivalente a fácies 8 por ser cimentada)

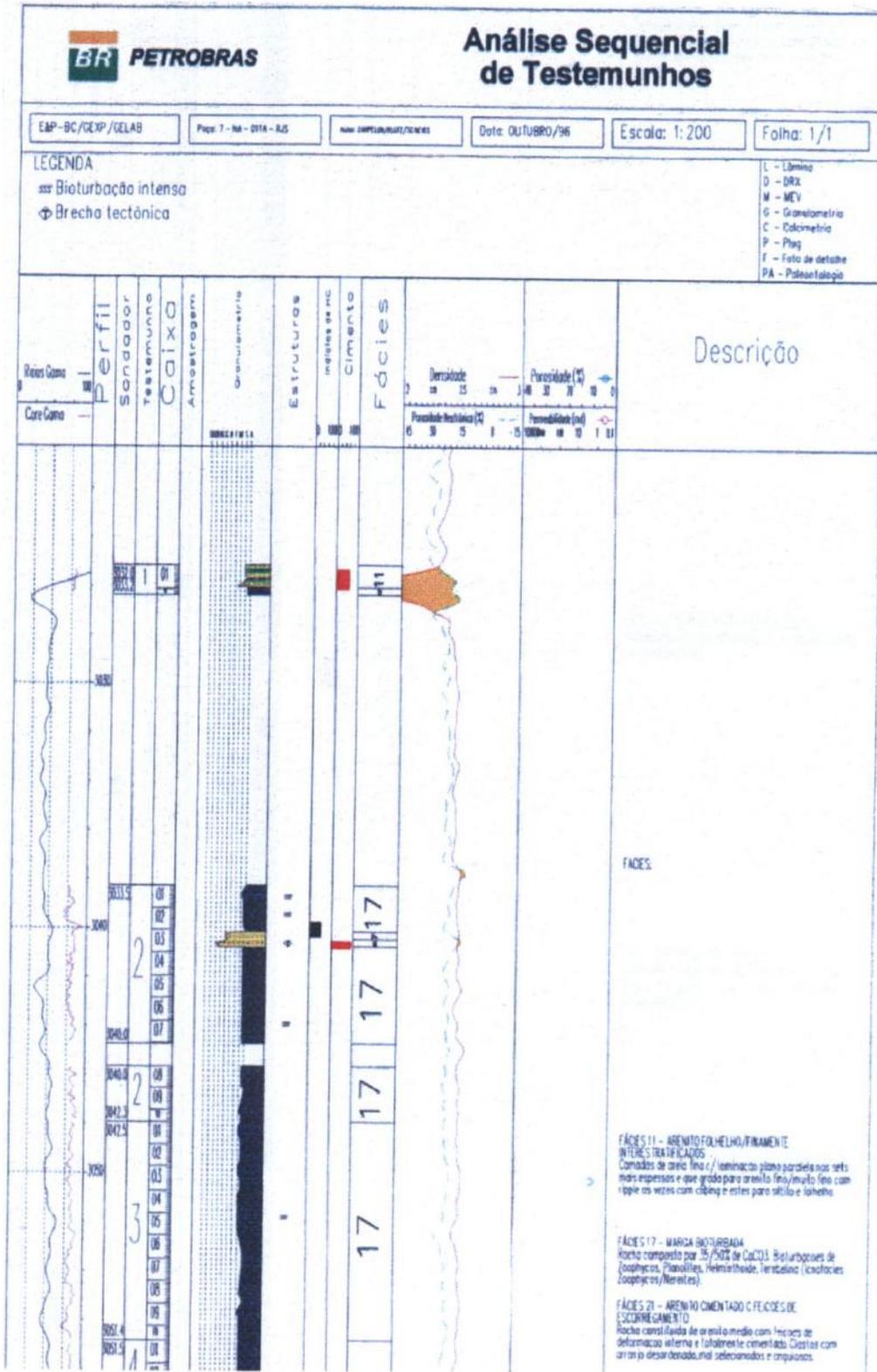
6 - ARENITO GROSSO AMALGAMADO
Conchas metálicas, lã de arenito muito grosso a conglomerática e lã de arenito grosso. Alguns blocos de gradacionais inversos / normal no topo.

7 - CONGLOMERADO E BRECHAS CARBONÁTICAS
Areniteiras (desenvolvidas) / gradacionais, chertós gradacionais / wackstone (folhelho e margo). Bloco constituído de lã de carbonática.

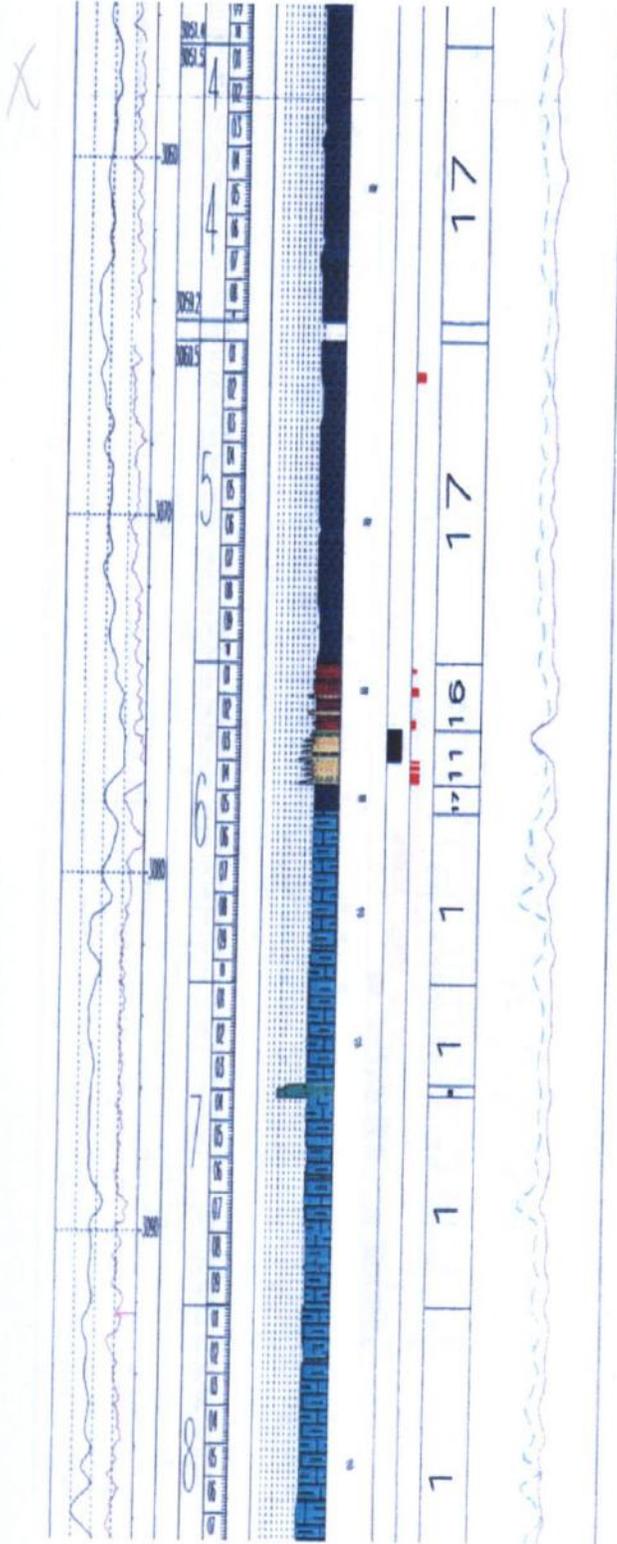
FÁCIES 1 - INTER AMALGAMADO DEFORMADO
Conchas de até 1 metro com intercalações de calcário, margo e folhelho. Facies de deformação (exceto espessura).

FÁCIES 18 - BLENDO
interfases rítmicas de calcário, margo e folhelho em camadas de até 1m de espessura, raras em planícies.

ANEXO IV
Anasete do poço NA 11



Continuação:



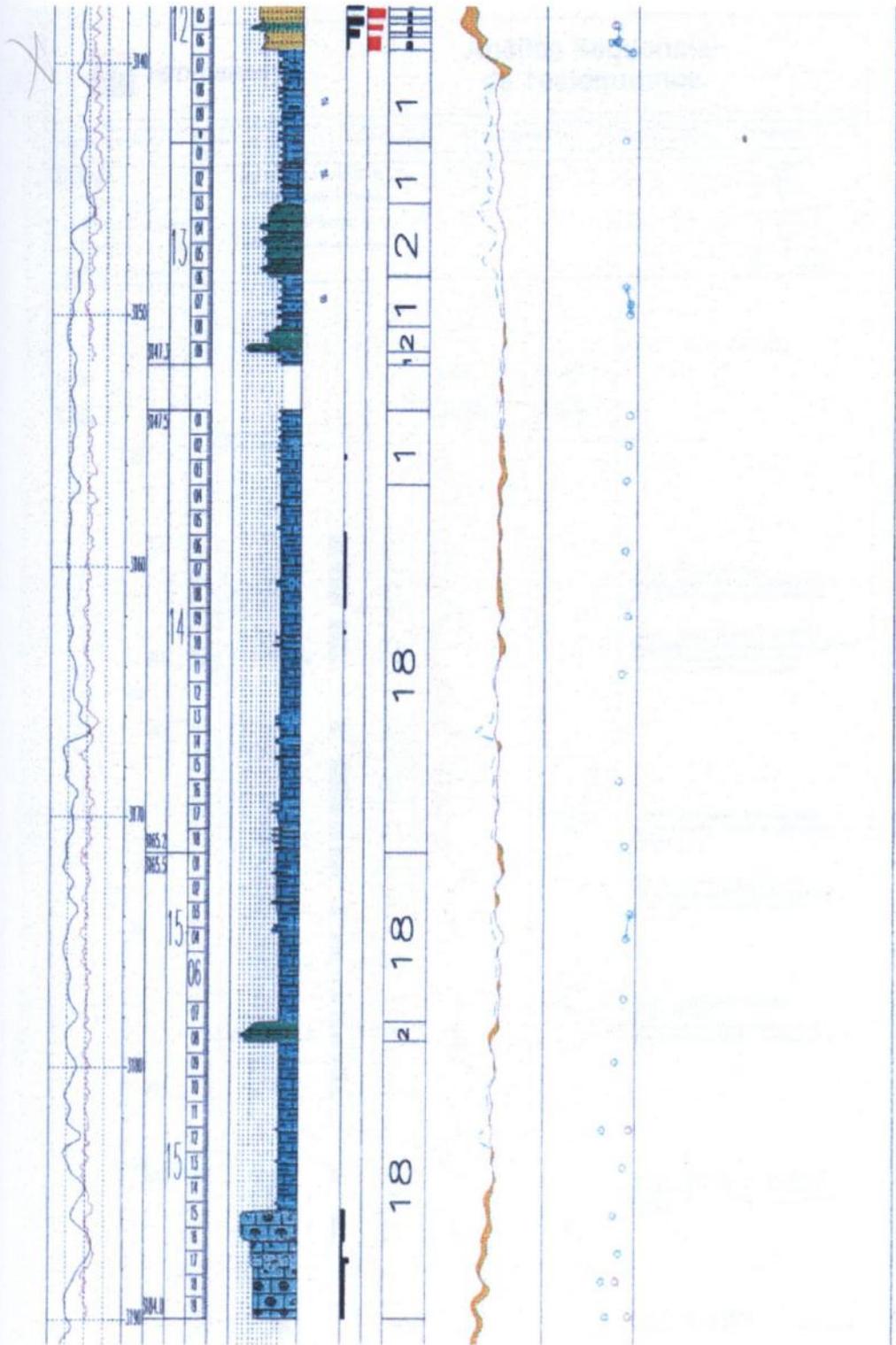
COLUNA UNIDADE IV
 Rocha constituída de arenita média com feições de deformação interna e fortemente cementada. Clastos com arranjo desordenado, mal selecionados e angulosos.

FÁCES 16 - INTERLÂMINAS SÉTICAS/FOLICULOS DE FERROUSIS
 Formam lâminas irregulares de espessura variável de até cinco centos e folhetos cinco centos a bilobulados.

FÁCES 1 - INTERLÂMINAS LÂNGUILOS DEBILITADOS
 Camadas rítmicas e não rítmicas caracterizadas por descontinuidades de calcabilidade, margem e folhetos. Camadas contorcidas, irregulares, invertidas, rompidas, plissadas e dobradas.

FÁCES 2 - CONJUNTO DE BRECCHAS CARBONÍFICAS
 Depósitos de quantidades anorgânicas, wackstones, mudstones, também de depósitos de folhetos e margem. Muito constituído de brecchas rítmicas.

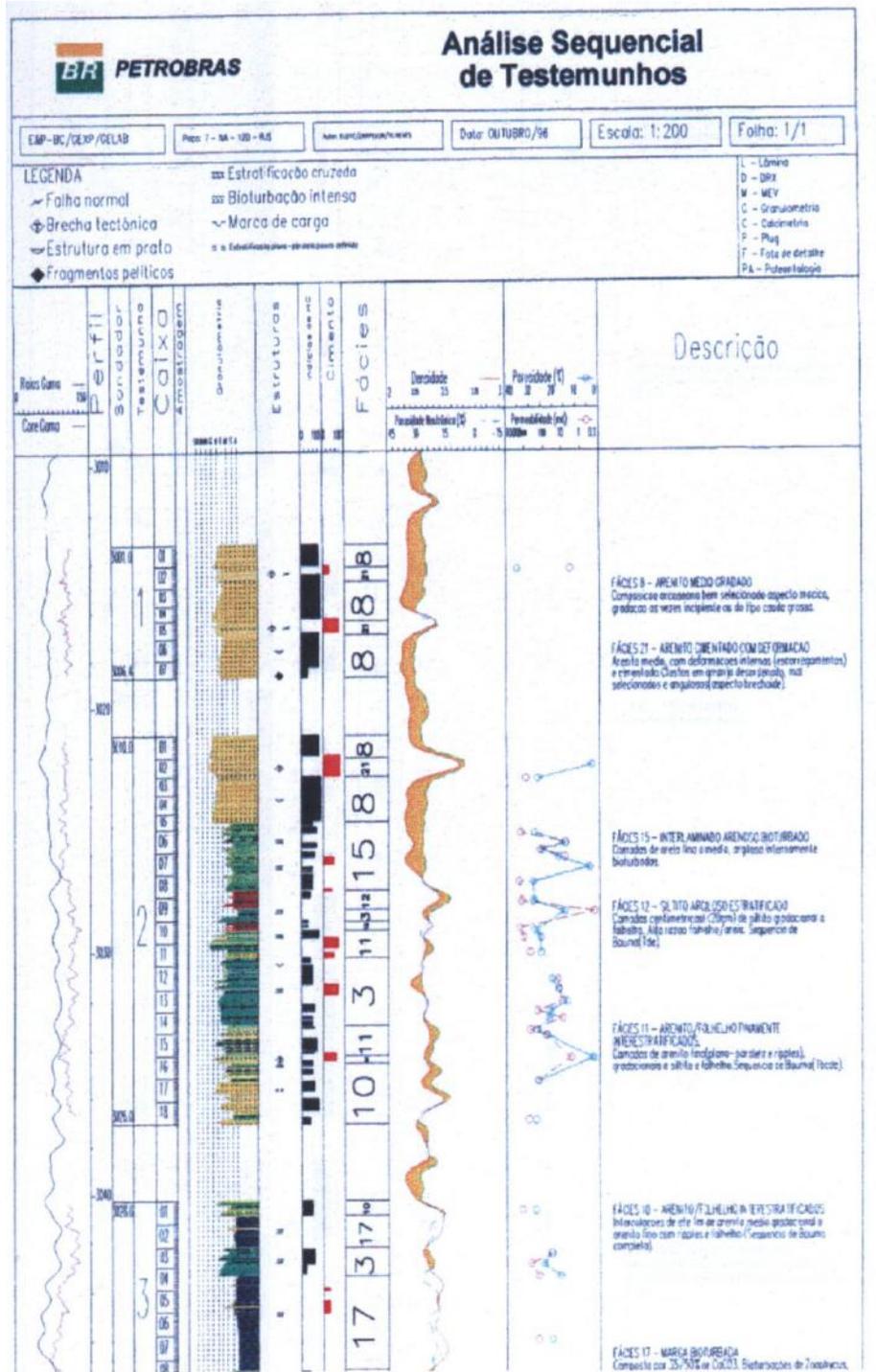
Continuação:



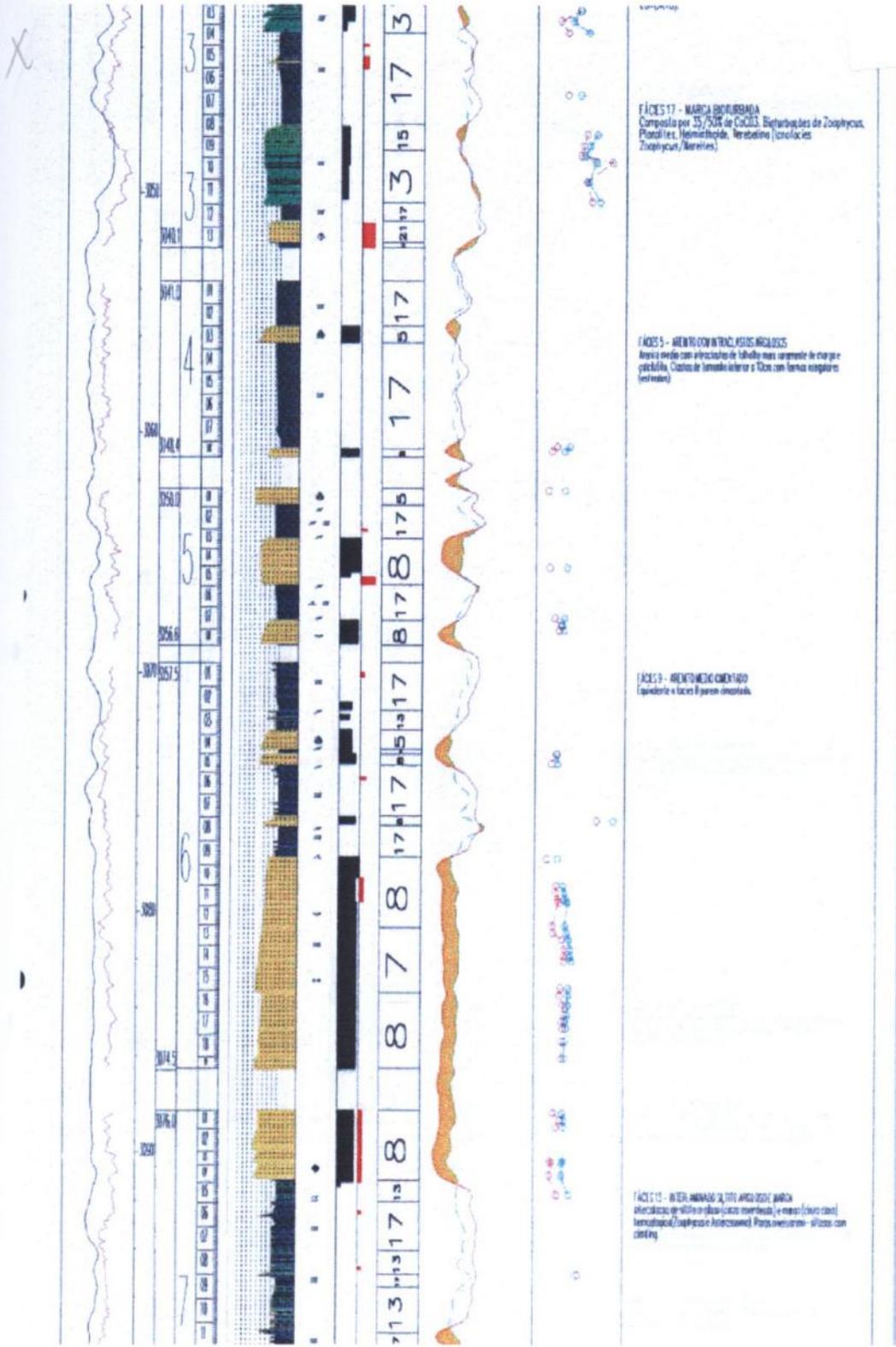
RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL
JULHO DE 2004

ANEXO V

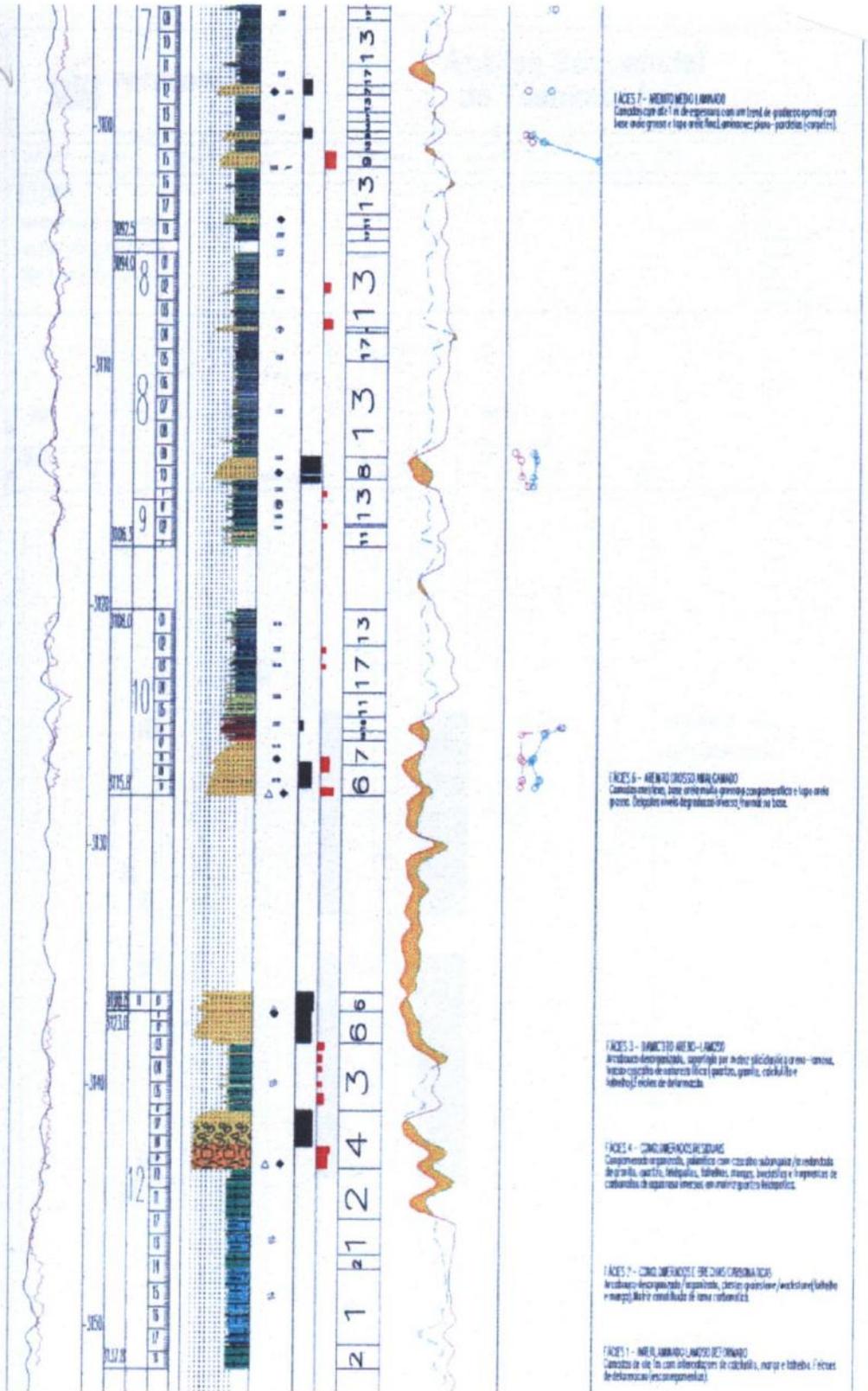
Anasete do poço NA 12



Continuação:



Continuação:



ANEXO VI
Anasete do poço RJS-19

