



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ALBERTO JOSE RUIZ TAPIA

ZONEAMENTO DE POÇOS ATRAVÉS DA INFERÊNCIA *FUZZY*

Belém - Pará

2015

ALBERTO JOSE RUIZ TAPIA

ZONEAMENTO DE POÇOS ATRAVÉS DA INFERÊNCIA *FUZZY*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para estar apto para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador: André José Neves Andrade

Belém - Pará

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Ruiz Tapia, Alberto Jose, 1987-
Zoneamento de poços através da inferência *Fuzzy* / Alberto Jose
Ruiz Tapia. – 2015
94 f. : il. ; 29 cm

Inclui bibliografias

Orientador: André José Neves Andrade
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto
de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém,
2015.

1. Perfilagem geofísica de poços. 2. Geofísica. 3. Lógica *Fuzzy*. I.
Título.

CDD 22. ed. 622.15

ALBERTO JOSE RUIZ TAPIA

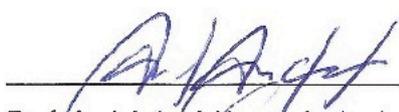
ZONEAMENTO DE POÇOS ATRAVÉS DA INFERÊNCIA FUZZY

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção de Mestre em Geofísica.

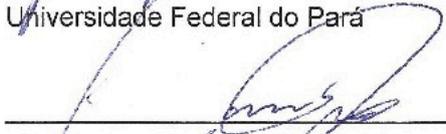
Data de Aprovação: 26 - 06 - 2015

Conceito:

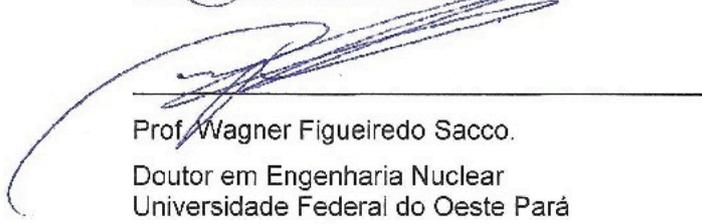
Banca Examinadora



Prof. André José Neves Andrade - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará



Prof. Carlos Eduardo Guerra – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Oeste Pará



Prof. Wagner Figueiredo Sacco.
Doutor em Engenharia Nuclear
Universidade Federal do Oeste Pará

AGRADECIMENTOS

À Deus todo poderoso, por permitir-me superar todas as adversidades, e problemas em este longo caminho, e concluir uma fase mais em minha vida.

À minha família, em especial a minha irmã Lisley Ruiz que nunca me deixou só em momentos difíceis, e sem ela, eu nunca teria sido capaz de cumprir esta meta, a meus pais Emilce e Alberto por sua dedicação paciência e amor incondicional através dos anos, minha vida nunca será suficiente para agradecer-lhes obrigados pais, a minha tia Carmen minha outra mãe, que sempre estava presente e me deu seu amor incondicional, e meu padrinho Nicolas por seu apoio e bons desejos sempre, a meus sobrinhos Shelsy e Jesus que todas as manhãs e à noite você expressarão o seu amor e saudade dando-me força para continuar e meus outros familiares, avó, primos e tias obrigados.

À minha querida Laura Rosellon, pelo companheirismo e compreensão em dois anos de sacrifício, obrigado por cuidar da doença e prestar apoio para tornar real todos meus sonhos.

Aos meus amigos que sempre me deram alegria, força e apoio em tempos difíceis, e obrigados aqueles que me ajudaram durante minha vida e contribuirão para ser quem eu sou. Aos amigos de laboratório. Em especial, agradeço à Jéssica Lia por compartilhar de todos os momentos de estudos.

Ao meu professor e orientador Dr. André José Neves Andrade pela atenção paciência e dedicação prestada em dois longos anos, eu nunca esquecerei seus ensinamentos, muito obrigado por me dar a oportunidade de estudar e aprender ao seu lado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geofísica, à coordenação, a professor Ellen e secretarias do departamento.

Às instituições PETROBRÁS e CNPq pelo suporte técnico e financeiro quanto bolsista, respectivamente.

RESUMO

O zoneamento do poço pode ser entendido como a caracterização geológica (localização e descrição da fácies) de cada camada atravessada pelo poço ao longo de sua trajetória. O zoneamento de poço é uma atividade corriqueira da análise de testemunho e importante para a geologia do petróleo, auxiliando a construção da carta estratigráfica e, também, para a engenharia do petróleo, no desenvolvimento do plano de exploração do poço. Este trabalho apresenta um método para a obtenção do zoneamento de poços não testemunhados, de modo que a informação adquirida nestes poços possa contribuir para o conhecimento geológico e de engenharia do campo petrolífero. O método apresentado utiliza a descrição de testemunho para a construção da base de conhecimento de um sistema de inferência *fuzzy*, que opera com o parâmetro P (uma nova combinação dos perfis de densidade e sônico), parâmetro M (Gráfico M-N) e como os perfis de raios gama natural e resistividade profunda. A operação desse sistema de inferência *fuzzy*, com os dados de perfil de um poço não testemunhado, resulta no zoneamento deste poço. Este método é apresentado com dados sintéticos, que satisfazem o modelo petrofísico e a Lei de Archie, e com dados reais de dois poços testemunhados do Campo de Namorado, na Bacia de Campos.

Palavras-Chaves: Geofísica. Geofísica de poço. Fácies sedimentares. Algoritmos inteligentes. Lógica Fuzzy.

ABSTRACT

Well zoning may be understood as the geological characterization (location and facies description) of each layer crossed by the borehole trajectory. Well zoning is a common activity in conventional core analysis and important for petroleum geology, assisting the construction of stratigraphic column and also for petroleum engineering aiding in the development of the well exploitation plan. This work presents a method for well zoning wells of non cored boreholes, so that the information gained in these wells can contribute to improve the knowledge of sedimentology and oilfield engineering. The method showed here uses the core description for building the knowledge base of a fuzzy inference system, which operates with P parameter (a new combination of density log and sonic log), parameter M (M-N plot) and the natural gamma ray log and the deep resistivity log. Operation of this fuzzy inference system using log data from non cored borehole produces the well zoning of each non cored borehole. This method is presented with synthetic data satisfying the petrophysical model and the Archie Law, and real data of two cored boreholes from the Namorado oilfield, in the Campos Basin.

Keywords: Well logging. Sedimentary facies. Intelligent algorithms. Fuzzy logic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Relações entre, processo, fácies e tempo em uma bacia sedimentar.	16
Figura 2- Fácies sedimentares (Campo de Namorado).	16
Figura 3- Localização geológica da bacia de Campos.	18
Figura 4- Coluna estratigráfica da bacia de Campos	20
Figura 5- Principais campos petrolíferos da bacia de campos	22
Figura 6- Modelo de Rocha adotado para o estudo Petrofísico.	23
Figura 7- Gráfica para a descrição da construção do parâmetro M, mostrando o pontos de água e matriz.	35
Figura 8- Gráfica para a descrição da construção do parâmetro N, mostrando os pontos de água e matriz.	36
Figura 9- Gráfico M-N. Os círculos de cor vermelha representam os pontos fixos dos minerais principais, e as cruces azuis representas os dados dos parâmetros N e M calculados a partir dos perfis de porosidade de um poço determinado.	38
Figura 10-Descrição de conjuntos crisp (Encima) e Fuzzy (Embaixo), para um dado de entrada em um conjunto, A, B, C.	41
Figura 11-Descrição gráfica da operação de união de conjuntos Fuzzy, para um conjunto, A, B.	43
Figura 12-Descrição gráfica da operação de interseção de conjuntos Fuzzy, para um conjunto, A, B.	45
Figura 13-Descrição gráfica da operação de Complemento de conjuntos Fuzzy, para um conjunto, A, B.	46
Figura 14-Exemplo de funciones de pertinência (a) Triangular, b) Trapezoidal, c) Sigmoide, d) Gaussiana.	48
Figura 15-Funções de pertinência para a classificação crisp de sedimentos clásticos figura (a) e funções de pertinência para a classificação fuzzy sedimentos clásticos figura (b). As linhas verticais cinzas indicam exemplos de sedimentos de dois tamanhos de partícula específicos	49
Figura 16-Descrição do processo de inferência fuzzy.	52
Figura 17-Fuzificação para um valor crisp.	53
Figura 18-Avaliação das regras para duas entradas.	54

Figura 19-Aplicando o Método de Implicação	55
Figura 20-Agregação das saídas, para o processo de logica fuzzy.	56
Figura 21-Diagrama de defuzificação.....	57
Figura 22-Diagrama Inferência Fuzzy.	58
Figura 23-Defuzificação método das medidas dos máximos (MON).....	59
Figura 24-Gráfico para o calculo do parâmetro K.....	61
Figura 25-Gráfico para o calculo do parâmetro P.....	62
Figura 26-Função de pertinência construída para o parâmetro K.	64
Figura 27-Gráfico do filtro de profundidade.....	66
Figura 28-Poço (Testemunhado) – Dados Sintéticos.....	68
Figura 29-Dados sintéticos, identificação de fácies no Gráfico M-N para o Poço I. 69	
Figura 30-Dados sintéticos, identificação de fácies no Gráfico N-P para o Poço I..70	
Figura 31-Criação das funções de pertinência referentes a poço I para a fácies A, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR) e resistividade (Rt) respectivamente, e os parâmetros P e N.	71
Figura 32-Criação das funções de pertinência referentes ao poço I para a fácies B, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.	72
Figura 33-Dados Sintéticos, Camadas representativas das fácies de interesse do Poço II (Poço de teste).....	73
Figura 34-Gráfico M-N modificado para o Poço II.	74
Figura 35-Gráfico N-P modificado para o Poço II.....	75
Figura 36- Mostra a identificação das fácies de interesse realizado pelo sistema de inferência Fuzzy.	76
Figura 37-Mostra o resultado final da associação do sistema de inferência Fuzzy ao filtro Fuzzy.	77
Figura 38-Mostram, respectivamente, os perfis de raio gama natural, resistividade, densidade porosidade neutrônica e sônico, nas trilhas de 1 a 5. A sexta trilha representa o testemunho descrito do poço para três fácies que são representadas com as cores de azuis, vermelho. e verde paras as fácies A,B e C respectivamente.	78
Figura 39-Dados reais, identificação de fácies no Gráfico M-N para o Poço.	80
Figura 40-Dados Reais, identificação de fácies no Gráfico N-P para o Poço III.....	81

Figura 41-Criação das funções de pertinência referentes ao poço III para a fácies A, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.	82
Figura 42-Criação das funções de pertinência referentes ao poço III para a fácies B, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.	83
Figura 43-Criação das funções de pertinência referentes ao poço III para a fácies C, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.....	84
Figura 44-Conjunto de perfis para o Poço IV de teste, Dados reais.....	85
Figura 45-Gráfica M-N modificado para o poço IV.	86
Figura 46-Gráfico N-P modificado para o poço IV.....	87
Figura 47-Mostra o resultado final da associação do sistema de inferência Fuzzy ao filtro Fuzzy para os dados reais.....	88

LISTA DE TABELA

Tabela 1- Propriedades físicas da matriz.	37
Tabela 2- Valores de M e N.....	38
Tabela 3- Cálculos dos parâmetros P e K para alguns minerais.....	63
Tabela 4- Descrição geológica das fácies da figura 38.	79

SÚMARIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FÁCIES SEDIMENTARES.....	15
3 BACIA DE CAMPOS	18
3.1 Campos de Namorado.	21
4 MODELO PETROFÍSICO	23
4.1 Porosidade.....	24
4.2 Argilosidade.....	26
4.3 Saturação de fluido	26
5 AVALIAÇÃO DE FORMAÇÃO.	28
5.1 Perfil de resistividade	28
5.2 Perfil de densidade	30
5.3 Perfil de porosidade neutrônica.....	31
5.4 Perfil sônico.....	32
5.5. Perfil de raio gama.	33
5.6 Gráfico M-N.....	34
5.6.1 Parâmetro M.....	34
5.6.2 Parâmetro N.....	35
5.7 Interpretação do Gráfico M-N	36
6 LÓGICA FUZZY.....	39
6.1 Conjuntos fuzzy.....	40
6.2 Operações de conjuntos fuzzy.....	43
6.2.1 União	43
6.2.2 Interseção.....	44
6.2.3 Complemento:	45

6.3 Propriedades dos conjuntos	47
6.4 Representação de conjuntos fuzzy (funções de pertinências)	47
6.5 Variáveis linguísticas	50
6.6 Regras fuzzy	51
6.7 Inferência fuzzy	51
6.7.1 Inferência Mamdani.	52
6.7.1.1 Fuzificação.....	53
6.7.1.2 Avaliação de regras.	53
6.7.1.3. Agregação das saídas.	54
6.7.1.4 Agregado de todas as saídas.	55
6.7.1.5 Defuzzificação.	57
6.7.2 Diagrama de inferência fuzzy.	58
6.7.3 Método da medida dos máximos (MOM).....	59
7 METODOLOGIA	60
7.1 Parâmetros P e K.....	60
7.1.1 Parâmetro K	61
7.1.2 Parâmetro P.	62
7.2 Sistema de inferência fuzzy.....	63
7.2.1 Base de conhecimento.	63
7.3 Regra fuzzy	64
7.4 Identificações das fâcias	65
7.5 Filtro de profundidade	65
8 RESULTADOS.....	67
8.1 Dados sintéticos.....	68
8.2 Dados reais.....	78
9 CONCLUSÃO	88
REFERENCIAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

O zoneamento de poços pode ser compreendido como um instrumento de auxílio no estudo da geologia de um território pouco explorado, possibilitando a caracterização de uma área desconhecida. O termo geológico fácies descreve as características de uma camada rochosa que a individualiza em relação às demais camadas presentes na sequência geológica e possui inúmeras aplicações na geologia e engenharia de petróleo.

A análise e interpretação de fácies e sequências sedimentares são indispensáveis durante o processo de localização, avaliação das reservas e delimitação dos reservatórios. A identificação de fácies em estratigrafia e sedimentologia pode ser vista como um conjunto de rochas sedimentares que podem ser definidas e separadas uma da outra e que proporcionam informação da geometria, litologia, estrutura sedimentar, textura e conteúdo de fósseis, permitindo a individualização de uma ou várias camadas de rocha sedimentar das que se encontram em suas vizinhanças (ARCHE2010).

A premissa fundamental da geofísica de poço que estabelece que camadas semelhantes possuem propriedades físicas semelhantes é utilizada para a conceituação das fácies sedimentares ou identificação das diferentes camadas atravessadas pelo poço. Em muitas situações, principalmente naquelas que envolvem uma complexa combinação de minerais na constituição da matriz mineral, esta premissa pode não ser completamente válida.

Uma das principais técnicas para a interpretação geológica dos dados geofísicos obtidos de um poço é o gráfico M-N (BURKE, 1969).

A ausência de um testemunho impossibilita a identificação de fácies, pela falta de uma interpretação visual direta da informação, este caso apresenta-se frequentemente na construção de poços direcionais como são os poços horizontais usados na extração de óleo de camadas reservatórios de pequenas espessuras onde é complicada a extração do testemunho. Uma das ferramentas que facilitam esta tarefa e permitem a identificação de fácies sem um testemunho usando informação conhecida de poços testemunhados anteriormente é o algoritmo inteligente baseado em lógica Fuzzy (ZADEH, 1965). A lógica Fuzzy tem por objetivo modelar modos de raciocínio aproximados ao invés de precisos ajustando-se muito bem à formação geológica de uma fácies devido a elas não tem comumente mudanças imprevistas, mais sim gradualmente do acordo com um tempo e processos geológicos. A lógica clássica não é a mais acertada para fazer um modelamento no estudo de fácies sedimentares, devido a que ela exige definições exatas afastando-se muito da realidade, por causa disso foi utilizada a lógica fuzzy para fazer a identificação de fácies utilizado como valores iniciais o de entrada distintos perfis geofísicos; para a

classificação e ordenamento dos dados foi usado o gráfico M-N com o fim de identificar a litologia, além foi utilizado o gráfico N-P criado a partir dos perfis de porosidade (densidade, porosidade neutrônica e sônico) para obter um melhor resultado na compreensão da localização das fácies segundo a composição mineralógica.

Assim apresenta-se em esta dissertação uma metodologia para a identificação de fácies em poços não testemunhados. A metodologia apresentada pode ser dividida em duas etapas: Na primeira apresenta-se uma codificação eficiente dos perfis, que possibilita a discriminação das diferentes fácies. A segunda etapa trata da construção de um sistema de inferência Fuzzy que a partir da codificação da informação geológica contida em nos perfis produz a identificação das diferentes fácies.

A metodologia apresentada nesta dissertação é avaliada utilizando dados sintéticos e dados de dois poços testemunhados, perfurados na bacia de Campos, Brasil.

2 FÁCIES SEDIMENTARES

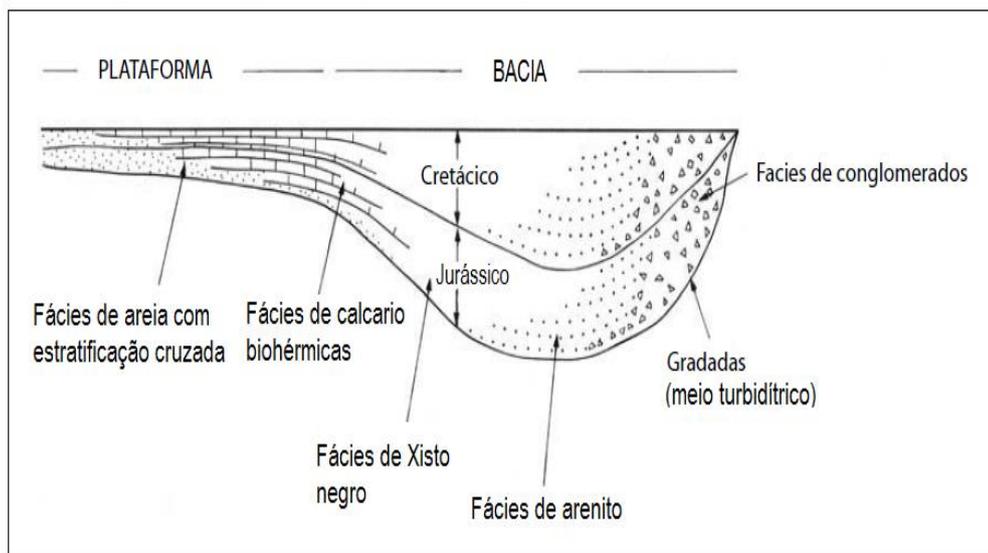
Um ambiente sedimentar pode ser definido como uma parte da superfície terrestre onde se acumulam sedimentos e que se diferencia fisicamente, quimicamente e biologicamente das zonas adjacentes. São os ambientes nos quais os sedimentos são transformados em rochas sedimentares através de processos de soterramento, compactação e cimentação. Na formação das rochas sedimentares ocorrem também processos de transporte e deposição, fazendo que as rochas se acumulem em formas de camadas com características similares dando origem às fácies sedimentares.

O conceito de fácies em estratigrafia e sedimentologia foi introduzido por Gressly em 1838, como um conjunto de rochas sedimentares que podem ser definidas e separadas de outro por sua geometria, litologia, estrutura sedimentar, textura, padrão de paleocorrentes e fósseis, permitindo a individualização de uma ou várias camadas de rocha sedimentar das outras na sua vizinhança. Se imaginarmos esse conjunto de rochas sedimentares como uma unidade estratigráfica que é examinada em uma seção transversal de uma extremidade à outra, cada uma das fácies muda gradualmente em sentido horizontal, para outra que se formou ao mesmo tempo mas que apresenta características diferentes. Tipicamente, a fusão de fácies adjacentes tende a ser uma transição gradual ao invés de um limite claro, embora às vezes mudanças repentinas ocorram (ARCHE, 2010).

A Figura 1 mostra as relações entre as fácies sedimentares, ambientes, dos processos e do tempo: Por exemplo, uma fácies de xisto betuminoso é depositada em um ambiente marinho profundo por um processo de decantação no Jurássico, ou uma fácies de arenito gradadas é depositado sobre um meio de borde precontinental por um processo de corrente de turbidez no Cretáceo (SELLEY, 1976).

Há situações em que para a individualização das camadas levam-se em consideração só as características físicas e químicas como a cor, estrutura, composição, textura e arquitetura sedimentar. Neste caso utiliza-se o termo de litofácies, no caso em que a individualização das camadas seja feita através da informação da flora e fauna, ao invés do tempo de deposição, o termo usado é biofácies.

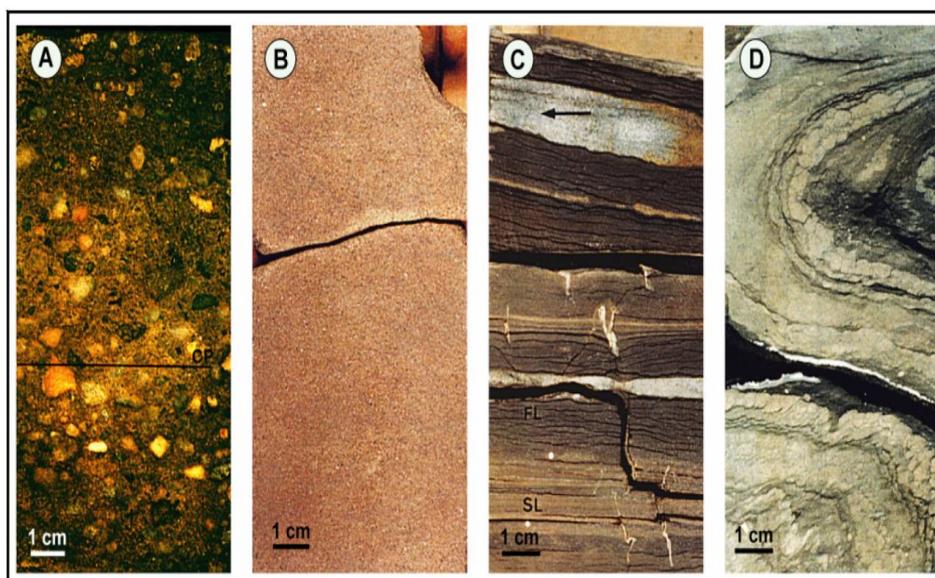
Figura 1-Relações entre, processo, fácies e tempo em uma bacia sedimentar.



Fonte: (Modificado de Selley 1976).

A Figura 2. Apresenta fotos de algumas fácies sedimentares identificadas em testemunhos de poços junto ao Campo de Namorado. A) Fácies Conglomerados e Arenitos Conglomeráticos, B) Fácies Arenitos Maciços e estratificados, C) Fácies Turbiditos de Bouma em Camadas Finas, D) Fácies de Escorregamentos.

Figura 2-Fácies sedimentares (Campo de Namorado).



Fonte: (BARBOZA 2005)

Na geologia, o estudo das fácies de forma individualizada em um ambiente sedimentar permite o agrupamento delas através de associações que são um

conjunto de fácies que mantém uma relação física e genética entre elas, mantendo uma relação tanto vertical como horizontal na formação (ARCHE, 2010). Esses agrupamentos são fundamentais para definir mecanismos de formação dos depósitos sedimentares, também permite propor modelos sobre sistemas de deposição e ambientes de acumulação através da sucessão temporal, o qual consiste em restituir a paisagem no momento da deposição, apresentando com detalhes, as variações climáticas, hidrodinâmicas e biológicas (BARBOZA, 2005). Segundo Brown e Fischer (1977) essa interação no espaço formado pela associação de fácies acumuladas pelos diversos processos deposicionais que se desenvolvem em um mesmo ambiente de sedimentação corresponde a um sistema deposicional, o qual seria a expressão sedimentológica das sequências deposicionais da estratigrafia de sequências.

Para o caso da geofísica de poço, define-se eletrofácies (SERRA, 1980) como o conjunto de respostas dos perfis que caracterizam ou definem as propriedades físicas das rochas e fluidos contidos na formação investigada pelas ferramentas de perfilagem. Isto permite identificar uma camada e que esta seja diferenciadas das outras. A identificação de fácies é um componente essencial da prospecção de petróleo e caracterização de um reservatório (KUMAR, 2006).

3 BACIA DE CAMPOS

A bacia de Campos está localizada no norte do estado do Rio de Janeiro, limitando-se ao norte pelo alto da Vitória, separando-se da bacia do Espírito Santo, e ao sul pelo Alto de Cabo Frio, separando-se da Bacia do Santos. A porção marinha da bacia tem profundidades máximas de 3.400 m de profundidade, com uma área de aproximadamente de 100.000 Km^2 .

Figura 3-Localização geológica da bacia de Campos.



Fonte: (Beasley, 2010).

A bacia de Campos é uma bacia de margem divergente, originada pela ruptura do supercontinente Gondwana, coincidindo em aspectos gerais com a história evolutiva das demais bacias da margem leste brasileira. Fatores como o baixo grau de afinamento crostal, reativação das fontes de sedimentos, intensa tectônica adiastrófica e as variações globais do nível do mar no Neocretáceo e Terciário, propiciaram a acumulação de grande volume de hidrocarbonetos, conferindo a esta área qualidades singulares em termos de potencial petrolífero (RANGEL, 1998).

A evolução estratigráfica e estrutural da bacia de Campos esteve controlada pelos eventos da tectônica de placas, associado a um rift e posteriormente aos movimentos das placas suramericana e africana, podendo ser divididas em megasequências tectono-sedimentar: Na megasequências continental ou estágio rift, no cretáceo inferior houve uma mudança na estratigrafia, que afetou a crosta terrestre, que também foi modificada pela reativação tectônica no cretáceo superior. Essas mudanças foram as responsáveis por estabelecer dois sistemas de falhas e depressão que formaram a bacia de Campos. Esses eventos também contribuíram na formação de sistemas de vales rift com estruturas orientadas preferencialmente em direção NE-SW, no sistema de vales rift foram formados os grabens e meio-grabens, limitados por falhas sintéticas e antitéticas com deslocamentos até de centenas de quilômetros (CHEVRON, 2006).

A bacia de Campos, na sua parte central apresenta um sistema de falhas com direção E-W que a separa em duas regiões tectonicamente semelhantes. Este sistema de falhas se formou quando a fase de rift separou a crosta continental no cretáceo inferior, devido aos movimentos entre as partes norte e sul da bacia. As falhas originadas causaram depressões intra-rifts estruturalmente complexas, onde houve uma acumulação de turbiditas e se apresentou a migração do hidrocarburo na bacia de Campos (CHEVRON, 2006).

À megasequência transicional está associada à extensão que originou depressões onde ocorreram os processos de sedimentação muito importantes. Neste período ocorrem a mudança de sedimentos de origem continental para sedimentos de origem marinha. Como consequência formaram-se blocos altos e baixos que foram relacionados com estes processos sedimentários e geoquímicos, permitindo a formação de reservatórios de hidrocarburo na parte nordeste da bacia. Nesta etapa acumularam-se espessas seções de evaporitos e camadas sedimentares das unidades estratigráficas mais novas (CHEVRON, 2006) depositados em ambiente lagunar, que é calmo tectonicamente e climaticamente severo.

A megasequência carbonática marinha está associada à subsidência da bacia, através de contração térmica da crosta, com uma importante elevação eustática do nível do mar durante o início e metade do Albiano que permitiu a

O marco estratigráfico da bacia de campos compõe-se de rochas de basamento cristalino, que foram cobertas de rochas ígneas e sedimentares. As sequências da fase rift da bacia incluem basaltos da formação Cabiúnas e uma porção inferior da formação Lagoa Feia (figura 4). Seus sedimentos são constituídos por conglomerados, lamitos e carbonatos de água rasa. As sequências das margens passivas da zona proto-oceânica e marinha cobrem a formação Macaé e grupo Campos; composto pelas formações Ubatuba, Carapebus e Emborê.

3.1 Campos de Namorado.

Em 1974, descobriu-se uns dos reservatórios mais importantes, com produção de óleo acumulado de cerca de 45,3 milhões de barris/dia em dezembro de 2000, Este foi o primeiro de uma serie de reservatórios que se perfurou na Bacia de Campos.

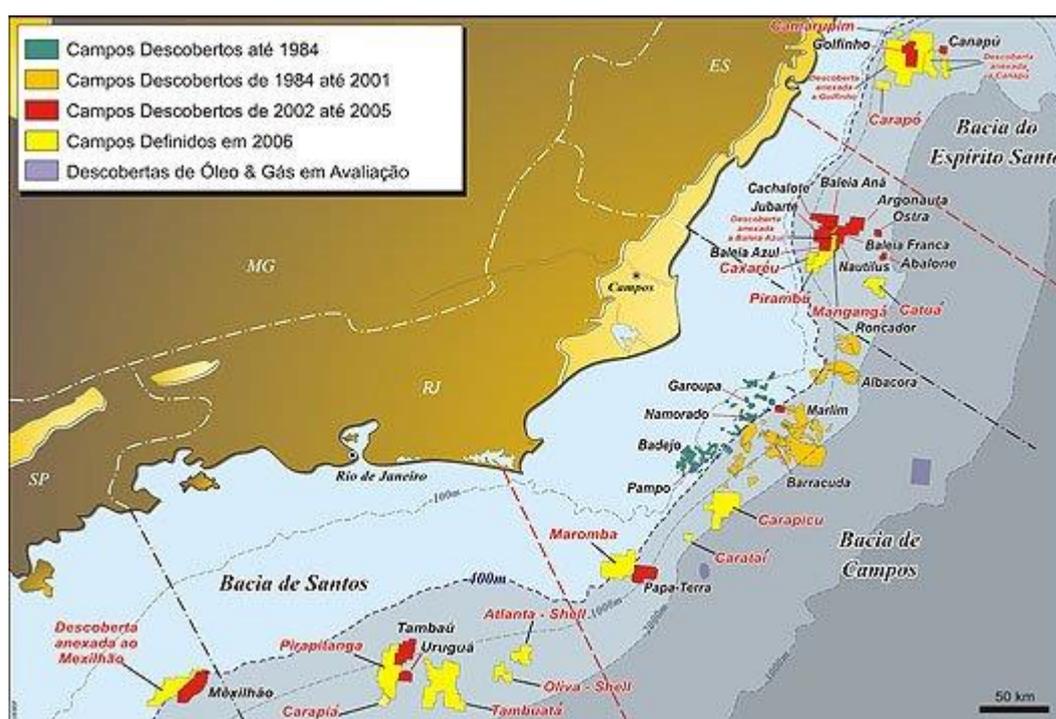
Os reservatórios do Campo de Namorado consistem de arenitos (arcoceanos turbidíticos), os quais fazem parte da megasequências marinha transgressiva. Esses arenitos estão situados, na formação Macaé dentro do intervalo de tempo do Albiano superior/ Cenomaninano, são espessos corpos arenosos que apresentam extensiva cimentação carbonatica e boas porosidades efetivas.

De acordo com Menezes e Adams (1990), o reservatório apresenta área com fechamento do tipo misto, estrutural e estratigráfico (em torno de 23 km²); geometria externa lenticular/tabular definida por carbonatos da Formação Macaé; limite superior definido por folhelhos da Formação Ubatuba, limites laterais são ao norte a ao sul por acunhamento, sudeste, noroeste e sudoeste por falhas com espessura média de 60 m (variando de 5 a 130 m); a largura média de 4 km e comprimento mínimo de 9 km e máximo de 14 km. A geometria interna é heterogênea, de baixo grau com estruturas primárias predominantes de arenito maciço e composição de arenitos arcoceanos. A granulação é em média regular e o grau de arredondamento e esfericidade em geral, é baixo.

O sistema turbidítico caracteriza-se por três diferentes fases de reabastecimento do canal (SOUZA JR., 1997), A primeira correspondente aos

depósitos grossos ligados às correntes turbidíticas de alta densidade, que formam ciclos granodécrescentes caracterizados pela associação vertical de microconglomerados e pelas areias maciças de médias a grossas. A segunda fase é representada por depósitos de corrente de turbidez de baixa densidade. A última fase corresponde ao sistema de deposição de mar alto, composta de uma associação de fácies pelíticas, representando a sedimentação hemipelágica da bacia.

Figura 5- Principais campos petrolíferos da bacia de campos



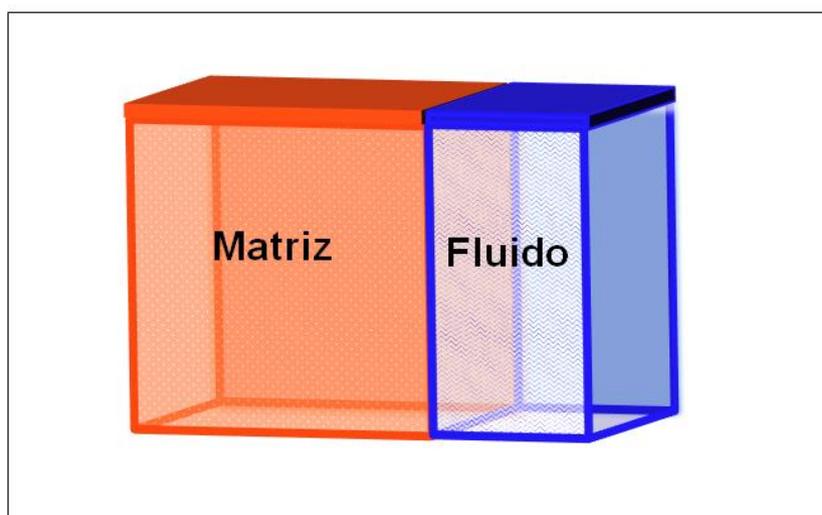
Fonte: (ECONOMIABR, 2015)

4 MODELO PETROFÍSICO

Quase a totalidade da produção de óleo atualmente é extraída a partir de depósitos nos espaços dos poros de rochas reservatório. Geralmente, a maioria das rochas reservatório de hidrocarboneto são de origem sedimentar. As rochas sedimentares podem-se classificar de acordo a sua composição química, dividindo-se em rochas siliciclásticas (agregado de partículas fragmentadas) e rochas carbonáticas (calcários). A quantidade de óleo contida numa unidade volumétrica reservatório é o produto da porosidade pela saturação hidrocarboneto. O objetivo principal da criação de um modelo Petrofísico de uma rocha reservatório é produzir a qualificação do reservatório.

Uma rocha sedimentar geralmente é constituída mineralogicamente de arcabouço, que é o grão que promovem a sustentação da rocha, a matriz que é a fração fina que é transportada em suspensão, e o cimento material precipitado quimicamente nos poros das rochas siliciclásticas que, nas rochas carbonáticas é chamado de espato.

Figura 6-Modelo de Rocha adotado para o estudo Petrofísico.



Fonte: do autor

O modelo Petrofísico difere do modelo geológico de uma rocha sedimentar, pela incapacidade da perfilagem de identificar os três parâmetros de uma rocha sedimentar, mudando o modelo tradicional, só considerando um volume unitário composto por uma fração sólida e uma fração fluida, como mostra a figura (6), a

fração sólida corresponde ao conjunto de todos os constituintes sólidos da rocha, independente de sua origem recebe a designação de Matriz. A fração fluida corresponde ao conjunto de todos os constituintes fluidos (água, óleo e gás), que ocupam a fração do volume unitário, não ocupado pela matriz e recebe a designação de Poro (GIRÃO, 2013).

O modelo de rocha que consideraremos para o estudo petrofísico, tem as propriedades petrofísicas definidas, como a argilosidade, saturação e porosidade, considerando sua quantificação matemática e suas equações.

4.1 Porosidade

A porosidade indica a capacidade da rocha para conter fluidos; é o volume de poros por unidade de volume de formação, a fração do volume total de uma amostra que é ocupado pelos poros.

A porosidade (ϕ) é uma grandeza adimensional expressa em percentagem ou da forma decimal e é definida como o volume de poros (volume entre os grãos) V_p , dividido pelo volume total de rocha V :

$$\phi = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{V_m}{V} \quad , \quad (1)$$

onde V_m é o volume da matriz.

Como o volume do espaço disponível para o armazenamento de fluidos não pode exceder o volume total da rocha, a porosidade é uma fração e o valor máximo teórico para ser alcançado é 1. Muitas vezes, a porosidade é expressa como uma percentagem.

De acordo com a origem dos poros, a porosidade pode ser primária, que é aquela que é gerada durante a formação da rocha, (porosidade interpartículas e intercrystalina), e a porosidade secundária que é devida, fundamentalmente a processos de diagêneses e de alteração (porosidade moldica, cavidades, canais, fraturas, sem esquecer a porosidade produzida pela atividade biológica).

Para caracterizar e estudar as qualidades de um reservatório, a porosidade é uma das principais características, que pode ser designada genericamente por variações com a profundidade dos dados de três perfis, dos nucleares (perfil de densidade o perfil de porosidade neutrônica) e o perfil sônico. Para um volume unitário de rocha, pode-se escrever a equação geral dos perfis de porosidade para as rochas reservatório, na forma:

$$p = \phi p_w + V_{sh} p_{sh} + (1 - V_{sh} - \phi) p_m \quad , \quad (2)$$

Onde:

ϕ = Porosidade corrigida pela argilosidade

p_w = propriedade física da água mensurada na mesma unidade do perfil

V_{sh} = Argilosidade

p_{sh} = propriedade física de argila

p_m = propriedade física da matriz

Utilizando a equação geral dos perfis, podemos escrever as equações dos perfis: perfil sônico porosidade neutrônica e densidade.

$$D_t = \phi D_{t_w} + V_{sh} D_{t_{sh}} + (1 - V_{sh} - \phi) D_{t_m} \quad , \quad (3)$$

$$\phi_n = \phi \phi_w + V_{sh} \phi_{sh} + (1 - V_{sh} - \phi) \phi_m \quad , \quad (4)$$

$$\rho = \phi \rho_w + V_{sh} \rho_{sh} + (1 - V_{sh} - \phi) \rho_m \quad , \quad (5)$$

Podemos definir as variáveis usadas anteriormente D_t , ϕ_n e ρ como os valores dos perfis sônicos, porosidade neutrônica e densidade respectivamente.

As variáveis D_{t_w} , ϕ_w , ρ_w são os valores registrados nos perfis correspondentes à água.

As variáveis $D_{t_{sh}}$, ϕ_{sh} , ρ_{sh} são os valores registrados nos perfis correspondentes à argila.

As variáveis Dt_m, ϕ_m, ρ_m são os valores registrados nos perfis correspondentes à matriz.

4.2 Argiloidade

O estudo das argilas é muito importante na geofísica de poço. A presença de argilas produz contaminação das medidas, levando a determinação de valores não realistas para as outras propriedades petrofísicas. Por causa disso o volume de argila de uma formação é um fator que define a qualidade de um reservatório.

O volume de argila pode ser medido através do método de raio gama, assumindo que toda radioatividade em uma rocha reservatório é devida à fração da argila presente na constituição da rocha, admitindo-se uma relação volumétrica linear entre o conteúdo radiativo medido pela ferramenta de raio gama natural e a argiloidade. Além este método assume, que se as propriedades físicas dos folhelhos adjacentes à camada reservatório são boas aproximações para as propriedades da argila no interior da rocha reservatório. O volume de argila fica expressado na forma.

$$V_{sh} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}, \quad (6)$$

onde

GR_{log} = Valor do perfil de raio gama lido no ponto de interesse

GR_{min} = menor valor obtido no perfil de raio gama

GR_{max} = maior valor obtido no perfil de raio gama

4.3 Saturação de fluido

A saturação de fluido em um meio poroso é a fração dos seus poros que é ocupada pela água de formação. Archie determinou experimentalmente a saturação de água de um arenito limpo (livre de argilominerais) supondo que o único material condutivo na constituição da rocha é a água de formação. A forma final da equação de Arché é apresentada assim:

$$R_t = \frac{a.R_w}{\phi^m.S_w^2} \quad , \quad (7)$$

O termo R_t representa a resistividade de formação, a representa o coeficiente litológico que avalia as diferenças litológicas das rochas reservatórios, R_w é a resistividade da água, ϕ é a porosidade, m representa o expoente de cimentação, que considera a tortuosidade ou a complexidade da rede formada pelos poros interconectados e S_w corresponde a saturação de água.

A principal vantagem da lei de Archie é que possibilita a transformação de uma interpretação qualitativa de dados geofísicos de poço para uma avaliação quantitativa dos volumes de hidrocarboneto em subsuperfície (ARCHIE, 1942).

5 AVALIAÇÃO DE FORMAÇÃO.

Podemos definir a avaliação de formação como o conjunto das técnicas e das atividades para obter informação das propriedades físicas e petrofísicas de uma reserva de petróleo com o objetivo de qualificar e quantificar um reservatório. A avaliação de formação usa a informação do poço e da superfície em conjunto para avaliar as características da formação do subsuperfície. Deste modo, a composição, a natureza e qualidade da zona na que estamos trabalhando, pode ser determinada.

Esta avaliação é feita através de informações adquiridas por meio geológico e geofísico durante a perfilagem, que é o conjunto de técnicas e métodos de aquisição das medidas das propriedades físicas das rochas na vizinhança do poço. Os perfis são a forma de apresentar as variações das propriedades físicas mensuradas ao longo da profundidade de um poço. Eles ajudam a definir as características físicas das rochas tais como litologia, a porosidade, a geometria do poro e a permeabilidade. Os dados de perfilagem são usados para identificar zonas produtoras, determinar a profundidade e espessura de zonas, distinguir entre hidrocarboneto, gás, ou água em um reservatório e estimar reservas de hidrocarbonetos.

Os dois parâmetros principais determinados nas medições de perfilagem de um poço são a porosidade e o volume de poros preenchidos com fluido. Os parâmetros de interpretação do perfilagem são determinados diretamente em ambos os casos, o também é inferida indiretamente para qualquer um dos três tipos de perfis gerais: (1) elétricos, (2) nucleares, e (3) acústico ou sônico.

5.1 Perfil de resistividade

O perfil de resistividade registra a resistividade, ou a resistência, para o fluxo de eletricidade através da formação em metros por ohm (Ωm). A resistividade é o recíproco da condutividade e está relacionada com a porosidade e a quantidade e tipo de fluido presente na rocha e a perfuração.

O uso mais importante dos perfis de resistividade é na distinção de hidrocarbonetos da água, como a matriz das rochas geralmente não é condutora, a

transmissão de corrente em uma rocha está condicionada à presença de água nos poros. Por conseguinte, quando a saturação de hidrocarboneto nos poros aumenta, a resistividade da rocha aumenta.

Uma alta porosidade ou uma formação que contém hidrocarbonetos tem alta resistência; uma baixa porosidade ou uma formação de água salgada tem baixa resistividade. Vários tipos de perfis de resistividade correspondem principalmente à profundidade da medição (por exemplo, baixa, média e penetração profunda). Se são feitas medições superficiais serão obtidas leituras de resistividade pertencentes ao reboco e o fluido de perfuração, enquanto que as leituras de profundidade correspondem à resistividade da formação não invadida ou a verdadeira formação. Os hidrocarbonetos podem estar presentes em uma formação onde a resistividade de profundidade é maior do que a resistividade superficial. Os folhelhos são geralmente de baixa resistividade, e arenitos e carbonatos têm alta resistividade.

Em 1941, G. E. Archie da Shell Oil Company apresentou um trabalho à AIME em Dallas, Texas, com os conceitos base para usar na interpretação quantitativa moderna dos perfis de poço (ARCHIE 1942).

Os experimentos de Archie mostrarão que a resistividade de uma formação cheia de água (R_o), e a resistividade da água (R_w) podem ser relacionadas por meio de um fator (F) da resistividade da formação:

$$R_o = F \times R_w \quad , \quad (8)$$

Onde o Fator (F) de resistividade da formação é igual à resistividade da formação 100% saturada em água (R_o) dividida pela resistividade da água da formação (R_w).

Os experimentos de Archie também mostrarão que esse fator de formação podia relacionar-se à porosidade pela seguinte equação:

$$F = 1.0 / \phi^m \quad (9)$$

Onde m é um expoente da cimentação, cujo valor de este varia com o tamanho de grão, a distribuição do tamanho de grão e a complexidade das

conexões de poros, entre mais complicada e a interconexões de poro o valor de m é maior.

5.2 Perfil de densidade

Perfil de densidade é um perfil de porosidade que mede a densidade nos elétrons de formação. Através deste perfil podem-se identificar zonas produtivas de gás, densidade de hidrocarboneto e avaliar os reservatórios com litologias complexas.

A ferramenta de densidade é uma ferramenta de contato que tem uma fonte de raios gama de energia média que emite raios gama à formação. Geralmente a fonte de raios utilizada na construção das ferramentas é Co 60 ou Césio 137, este último emite com uma energia de 662 KeV, cuja média vida é de cerca de 30 anos, o que permite que a intensidade do feixe energético seja estável. Além disso, a ferramenta de densidade está dotada de um cintilômetro para reduzir o efeito lama/reboco. Estes cintilômetros são blindados para protegê-los da radiação direta proveniente da fonte.

Os raios gama colidem com a formação causando uma perda de energia das partículas gama, o que é chamado efeito Compton, que é neste caso a interação entre as partículas de raio gama entrantes e os elétrons na formação. Os raios gama que alcançam o detector são indicadores da densidade de formação, já que o número de colisões por efeito Compton são uma função direta do número de elétrons em uma formação (densidade eletrônica), ou seja, a ferramenta de densidade corresponde ao número de elétrons por unidade de volume e, por conseguinte pode-se calcular a densidade de uma formação devido à relação do efeito Compton com a densidade eletrônica.

A densidade de formação é uma função da densidade da matriz, da porosidade e da densidade do fluido nos poros. Daí para calcular a porosidade a partir do perfil de densidade é necessário conhecer a densidade da matriz, como é mostrado na seguinte equação (equação do modelo Petrofísico calcula da porosidade com perfil de densidade). A partir disso considera-se que quanto mais densa for a rocha, menor será a intensidade de radiação nos detectores.

A calibração da ferramenta de densidade realiza-se em uma rocha padrão tomada como o calcário isenta de Argilosidade, (ou seja, limpo); e saturado de água doce, usando a equação de calibração na forma:

$$\rho = 1,0704\rho_e - 0,1883 \quad , \quad (9)$$

5.3 Perfil de porosidade neutrônica

O perfil de porosidade neutrônica está baseado no efeito dos nêutrons sobre a formação. Estes nêutrons são emitidos por uma fonte. O hidrogênio tem o efeito de desacelerar os nêutrons rápidos já que eles apresentam uma seção de choque grande e massa pequena, permitindo a captura de nêutrons. Como o hidrogênio encontra-se principalmente nos fluidos dos poros, o perfil de porosidade neutrônica responde principalmente à porosidade, embora, a matriz e o tipo de fluido também influenciam. Este perfil está calibrado para ler a porosidade correta supondo que os poros estão preenchidos de água e uma matriz em particular (calcário arenito e dolomita) (ELLIS, 2008).

Na ferramenta do perfil de porosidade neutrônica criam-se nêutrons a partir de uma fonte química, que pode ser uma mistura de amerício-berílio, que emitem nêutrons de forma contínua. Estes nêutrons chocam com os núcleos do material de formação e produzem um nêutron que perdeu parte da sua energia. Levando em conta que os átomos de hidrogênio têm quase a mesma massa que o nêutron, a perda de energia será máxima quando acontecer um choque entre os nêutrons e os átomos de hidrogênio. Portanto, a quantidade máxima de perda de energia é uma função da concentração de hidrogênio em uma formação, pois o hidrogênio concentra-se em uma formação porosa onde os fluidos preenchem o espaço do poro, concluindo que a perda de energia poderia estar relacionada à porosidade de formação.

No caso de os poros estarem preenchidos de gás ao invés de óleo ou água, a porosidade do nêutron será menor do que a real. Isto acontece porque há menos concentração do hidrogênio no gás em comparação como hidrocarboneto ou água. Chama-se efeito do gás a diminuição da porosidade neutrônica ao atravessar uma camada com gás.

A apresentação da porosidade neutrônica no perfil é o resultado da calibração da ferramenta de porosidade neutrônica feita com a ferramenta de densidade em uma rocha de calcário padrão, completamente saturada por água doce, cuja equação é expressa na forma,

$$\phi_n = 1,5848 - 0,585 \rho , \quad (11)$$

Onde ϕ_n é a porosidade neutrônica registrada no perfil cujas unidades de porosidade do calcário e ρ é o valor registrado no perfil de densidade.

5.4 Perfil sônico

A ferramenta sônica é composta por um tubo metálico onde é encontrado um transmissor e dois receptores, um deles mais perto do receptor que o outro. Esse arranjo é projetado para medir o tempo de propagação da onda.

A ferramenta de aquisição do perfil sônico mede o tempo que um pulso acústico leva, se propagar-se desde um transmissor através da lama, ao longo do poço e novamente através da lama e finalmente até um conjunto de receptores localizados na ferramenta. Esse tempo medido equivale ao tempo de viagem acumulado através dos diversos meios atravessados.

O tempo de propagação da onda acústica compressional medida ao longo do arranjo de receptores é chamado tempo de trânsito (Δt), sendo o tempo que requer uma onda acústica compressional para percorrer 1m ou 1ft.

As ondas acústicas podem propagar-se através de um meio sólido de diferentes formas, como ondas compressionais que são de nosso interesse e ondas de corte. As ondas compressionais passam através das rochas de formações que contêm água, óleo ou gás, e tem tempos de trânsitos maiores do que aquelas ondas que atravessam as rochas sem porosidade. Essa mudança no tempo de trânsito está relacionada ao fluido presente no espaço poroso da rocha que é uma função da porosidade. (ALFORD, 2012).

O tempo de trânsito (Δt) é obtido pela subtração dos tempos de propagação registrados no receptor mais afastado e no receptor mais próximo da fonte. Ele depende da litologia e da porosidade, mas antes dos trabalhos de Wyllie não existia um envolvimento entre a física na propagação das ondas e qualquer propriedade petrofísicas. Graças aos trabalhos de Wyllie (WYLLIE, 1956) se justificou a dependência da velocidade de propagação com a porosidade. A partir disto temos que conhecer a velocidade de trânsito na matriz da formação para o cálculo da porosidade com o perfil sônico, aplicando a equação de Wyllie:

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_{fl} - \Delta t_m} \quad , \quad (12)$$

Onde Δt_m é o tempo de trânsito da formação, Δt_m é o tempo de trânsito da matriz e Δt_{fl} é o tempo de trânsito do fluido.

5.5 Perfil de raio gama.

O perfil de raio gama registra a radioatividade natural dos materiais encontrados em todas as formações. O raio gama emitido de uma formação penetra a sonda detentora, que geralmente é um cintilômetro, que está formado por um cristal de iodeto de sódio (NaI) dopado com impurezas. O cintilômetro realiza a medida da energia dos raios gama no ambiente e é produzido um pulso elétrico que é transmitido para o gravador de superfície através dos cabos elétricos.

No cintilômetro, o efeito fotoelétrico é o processo físico através do qual o raio gama incidente interage com os elétrons do cristal, No efeito fotoelétrico, o raio gama perde energia e libera elétrons que excitam a rede cristalina do cristal de iodeto de sódio (NaI).Esses elétrons serão capturados pelas impurezas do cristal. Quando a rede cristalina do iodeto de sódio faz o processo de retorno ao estado natural, emite centelhas de luz visível ou fótons, as quais são transmitidas para um fotomultiplicador que transforma as centelhas de luz visível em pulsos elétricos. A amplitude do pulso elétrico será proporcional ao número de fótons emitidos pela rede cristalina do cristal, que ao mesmo tempo vai depender da energia da

radiação gama. A energia do raio gama dependerá da ocorrência natural de elementos radioativos nas rochas estudadas.

Os arenitos não argilosos têm concentrações baixas de materiais radioativos e por isso têm baixas leituras de raio gama. Quando o conteúdo de argila aumenta, a resposta do perfil de raio gama aumenta devido à concentração de material radioativo da argila. No entanto, os arenitos limpos (com volume de argila baixo) e com um alto conteúdo de feldspatos de potássio, micas ou águas com um alto conteúdo de urânio, também podem produzir uma resposta alta de perfil de raio gama. Então os valores altos de radiação gama estarão associados às rochas selantes e os baixos valores, às rochas reservatório.

O perfil de raio gama, além de permitir a identificação de litologias e correlação de zonas, permite calcular o volume de argila nos arenitos e carbonatos.

5.6 Gráfico M-N

O gráfico M-N combina os dados dos três perfis de porosidade (densidade, porosidade neutrônica e sônico) para fazer uma identificação da litologia a partir das propriedades físicas do mineral presente nas rochas e fazer a identificação do mineral com maior volume em sua constituição, assumindo que este é o mineral principal que é responsável pela informação litológica presente nos perfis de porosidade, e desta forma obter um valor dos parâmetros M e N, que são os pares ordenados com os quais está construído o gráfico M-N. Estes parâmetros são formulados de modo a torná-los relativamente independentes do efeito da porosidade sobre os registros dos perfis de porosidade.

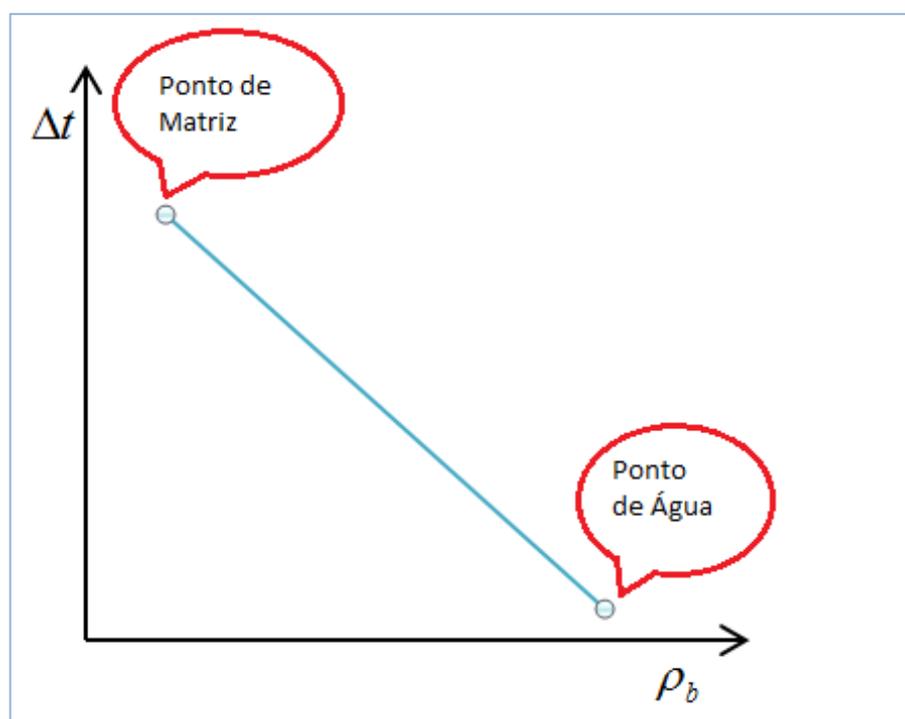
5.6.1 Parâmetro M

Para a definição do parâmetro M é utilizada a combinação do perfil de densidade e do perfil sônico, tomado como a cotangente do ângulo de inclinação que a reta de porosidade faz como o eixo-x no gráfico sônico-densidade, ou.

$$M = \frac{\Delta t_w - \Delta t_m}{\rho_m - \rho_w} \quad , \quad (13)$$

Na equação (13) Δt_w e Δt_m representam o tempo de trânsito da água e do mineral principal, ρ_m e ρ_w representam a densidade do mineral principal e da água. (ver figura 7)

Figura 7--Gráfico para a descrição da construção do parâmetro M, mostrando os pontos de água e matriz.



Fonte do autor

5.6.2 Parâmetro N

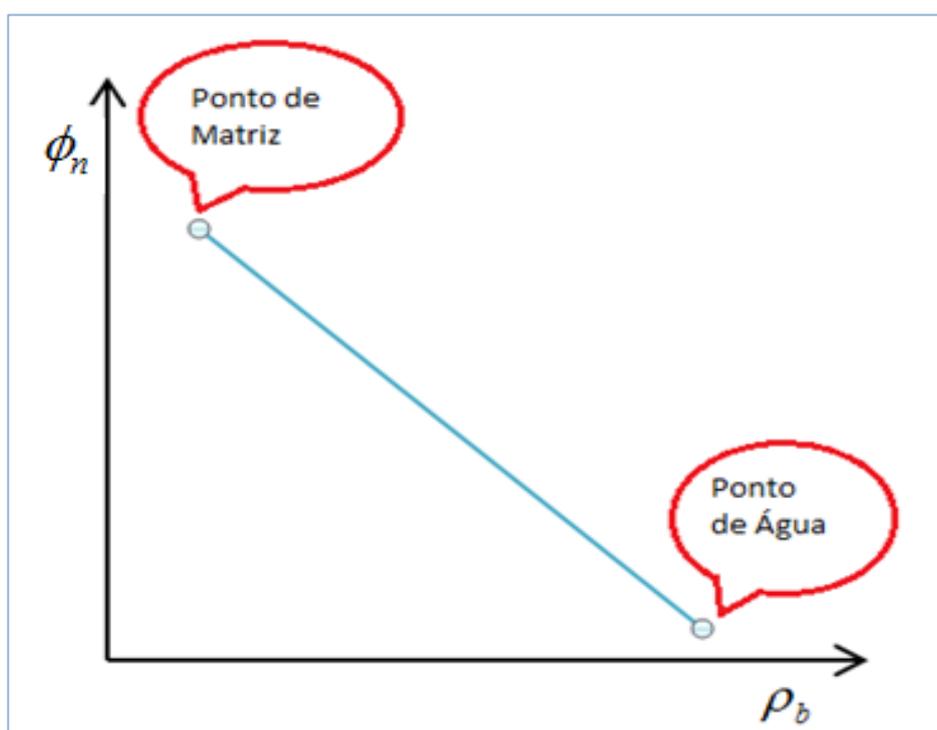
Para a definição do parâmetro N, é utilizada a combinação do perfil de densidade e do perfil de porosidade neutrônica, tomado como tangente do ângulo que a reta de porosidade faz com o eixo-x no gráfico densidade-neutrônico. A reta

de porosidade passa pelo ponto de matriz que é único para cada litologia, ou

$$N = \frac{\phi_w - \phi_n}{\rho_m - \rho_w}, \quad (14).$$

Onde, ϕ_w e ϕ_n representam a porosidade neutrônica da água e do mineral principal, ρ_m e ρ_w representam a densidade do mineral principal e da água. (ver figura8)

Figura 8--Gráfico para a descrição da construção do parâmetro N, mostrando os pontos de água e matriz.



Fonte: do autor

5.7 Interpretação do Gráfico M-N

O gráfico M-N é apresentado por os parâmetros M e N em forma de pares ordenados. Cada mineral produz um único ponto permitindo marcar vários pontos representativos das diversas matrizes de interesse, os quais são denominados como pontos fixos do gráfico M-N ou pontos de matriz.

Os parâmetros de porosidade da matriz como $(\rho_m, \phi_m, \Delta t_m)$ mostrados na tabela (1) são as propriedades físicas registradas nos perfis de porosidade para os

principais minerais presentes nas rochas sedimentares e são substituídos nas equações (M) (N) permitindo a criação de pares ordenados no plano M-N mostrada na tabela (2) e representados no gráfico da figura (9), característicos da litologia para um determinado trecho do poço. Admite-se assim que os pontos de uma mesma camada se distribuem na vizinhança de um ponto fixo e que a litologia desta camada poderá ser estimada a partir da proximidade deste ponto fixo, medida pela distância euclidiana deste ponto em relação à maioria dos pontos de agrupamento da camada.

Tabela 1- Propriedades físicas da matriz.

Mineral principal	Densidade (g/cm³)	Neutrônico (%)	Sônico (µs/ft)
Quartzo	2.65	-0.35	55.5
Calcita	2.71	0.0	47.6
Dolomita	2.86	0.05	43.5
Anidrita	2.98	0.0	50.0
Gipsita	2.35	0.49	52.0
Ortoclasio	2.55	-0.05	66.5
Gesso	2.32	0.06	55.7
Albita	2.62	-0.04	46.4
Sal	2.05	0.04	67.0

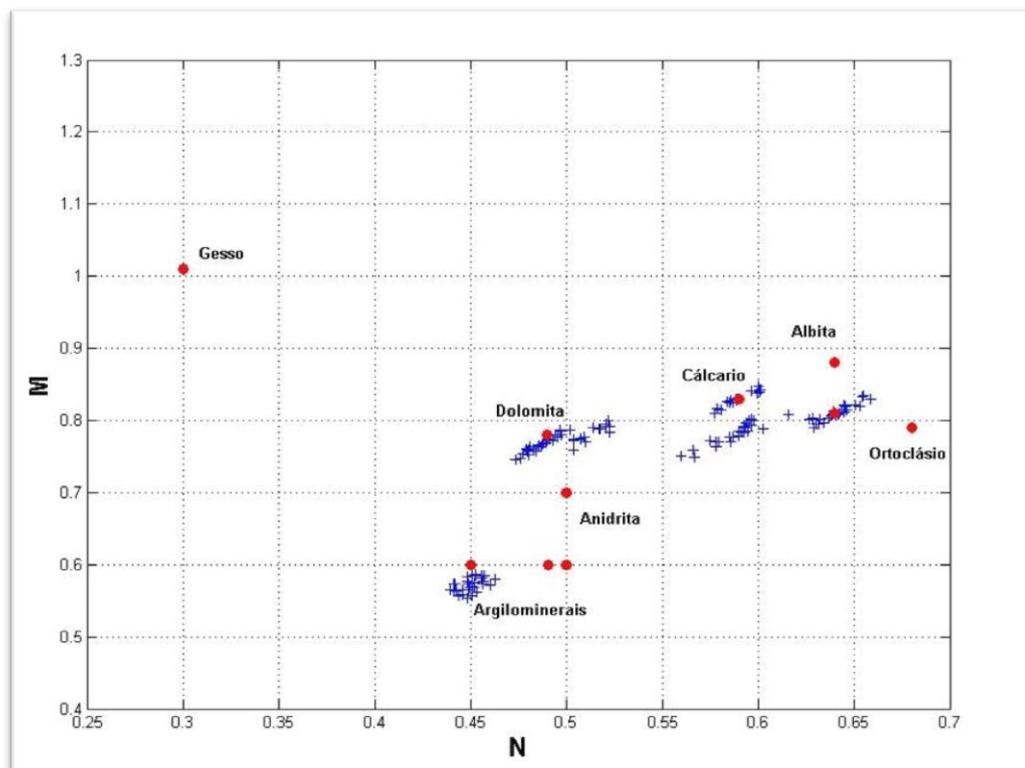
Autor: LUTHI (2001).

Tabela 2- Valores de M e N.

Matriz	M	N
Quartzo	0.81	0.64
Calcita	0.83	0.59
Dolomita	0.78	0.49
Anidrita	0.70	0.50
Gesso	1.01	0.30
Argilominerais		
Ilita	0.6	0.49
Caolita	0.6	0.45
Smectita	0.6	0.50

Autor: LUTHI (2001).

Figura 9-Gráfico M-N. Os círculos de cor vermelha representam os pontos fixos dos minerais principais, e as cruzes azuis representam os dados dos parâmetros N e M calculados a partir dos perfis de porosidade de um determinado poço.



Fonte: Autor.

6 LÓGICA FUZZY

A lógica Fuzzy fornece um mecanismo de Inferência que permite simular procedimentos de raciocínio humano em sistemas baseados em conhecimento. A teoria da lógica Fuzzy estabelece uma estrutura matemática que permite modelar a incerteza dos processos cognitivos humanos de modo que pode ser tratável por um computador. Em outras palavras, a Lógica Fuzzy é uma lógica multivalorada que permite representar matematicamente a incerteza e a imprecisão; fornecendo ferramentas formais para o tratamento de variáveis. Como é um exemplo explicado por Zadeh (AURRAND-LIONS, 1991), "Quando aumentam a complexidade, as afirmações precisas perdem seu significado e as afirmações úteis perdem precisão.", que podem ser resumidas como que "as árvores não deixam ver a floresta".

Qualquer problema pode ser resolvido com um conjunto de variáveis de entrada (espaço de entrada), e obter um valor adequado de variáveis de saída (espaço de saída). Por tanto a lógica Fuzzy permite o mapeamento de um modo adequado, de acordo com critérios de significado e não de precisão.

Os conceitos utilizados na Lógica Fuzzy e Probabilidade são geralmente relacionados, mas eles são totalmente diferentes. A probabilidade representa informações sobre frequência de ocorrências relativa de um evento bem definida sobre o total de eventos possíveis. Por outro lado, o grau de pertinência Fuzzy representa similaridades de um evento com relação a outro evento onde as propriedades desses eventos não são definidas com precisão.

Um evento possível não implica que ele é provável. Mas, se um evento é provável, ele deve ser possível.

A Lógica Fuzzy foi criada por Lotfi A. Zadeh, professor da Universidade de Berkeley (Califórnia) (ZADEH, 1965). Na sua proposta, a lógica Fuzzy foi apresentada como uma forma de processamento de informação, na qual os dados podem estar associados com um grau de pertinência parcial a conjuntos.

Uma maneira de combinar informações imprecisas para obter novos fatos é estabelecer a necessidade de um método de inferência generalizada e introduzir o que é conhecido como regra composicional de inferência. A partir deste princípio, podem-se descrever as principais características essenciais da lógica Fuzzy e sistemas Fuzzy.

O raciocínio exato pode ser visto como um caso especial de raciocínio aproximado. Qualquer sistema lógico pode ser fuzzificado: Usando a lógica Fuzzy o conhecimento humano pode ser formulado de uma maneira sistemática e pode ser facilmente Incluído em sistemas de engenharia.

O conhecimento é interpretado como um conjunto de restrições Fuzzy em uma coleção de variáveis. Os sistemas Fuzzy são particularmente interessantes para a definição de sistemas cujo modelo exato é difícil de obter. A inferência pode ser vista como um processo de propagação dessas restrições Fuzzy e é amplamente utilizada em sistemas de apoio de decisões. A lógica Fuzzy permite obter decisões com valores incompletas ou informações incertas. Os sistemas Fuzzy são altamente recomendados para esses problemas complexos onde não existe um modelo matemático simples associado. Também nos processos que seguem um comportamento não linear uma solução difusa apresenta grandes vantagens, pois a solução difusa exige conhecimento especializado expressões linguísticas, requisito que normalmente é facilmente disponível.

A teoria Fuzzy propõe-se a uma boa aproximação de modelagem do significado das palavras empregadas em linguagem natural.

As três principais características da teoria Fuzzy são:

- Uso de variáveis linguísticas no lugar ou em adição as variáveis numéricas;
- Caracterização das relações simples entre variáveis por expressões condicionadas;
- Caracterização das relações complexas por algoritmos Fuzzy.

6.1 Conjuntos fuzzy

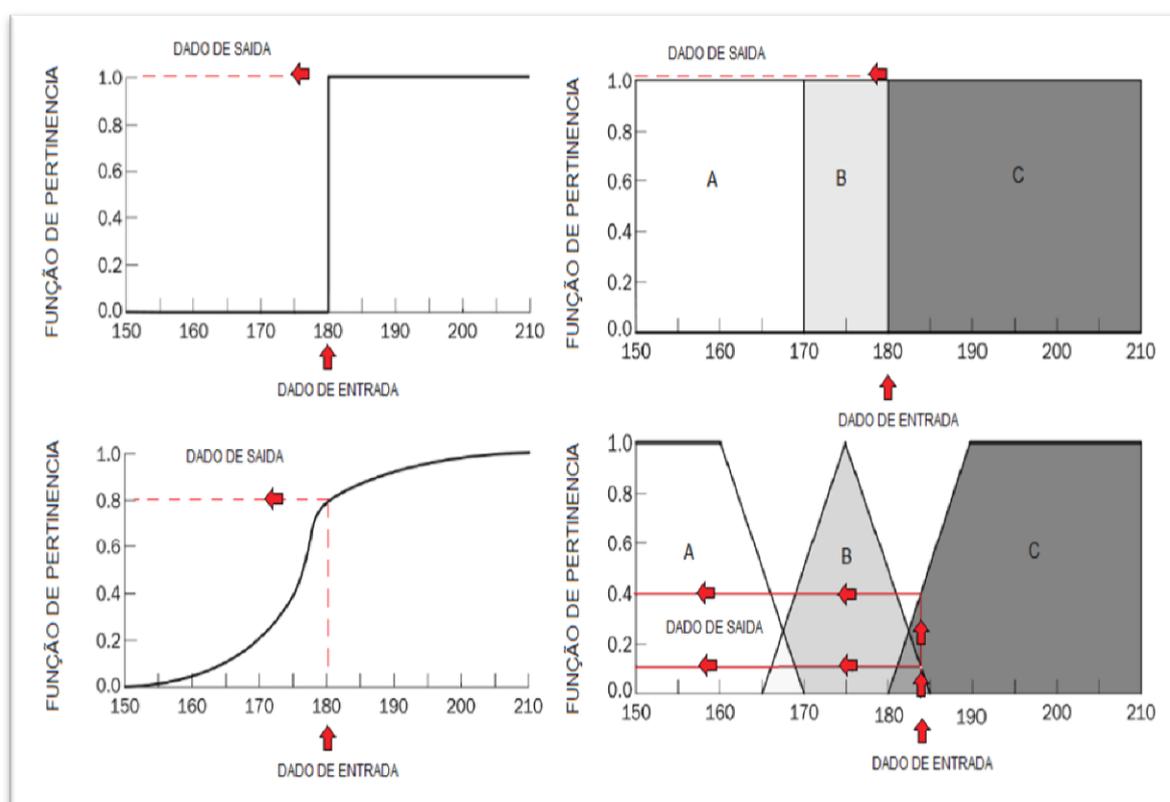
Como lógica multivalorada na definição de graus de pertinência, a lógica Fuzzy utiliza valores contínuos entre 0 (que representa fatos totalmente falsos) e 1 (totalmente verdadeiro). Assim, a lógica binária clássica pode ser vista como um caso especial da lógica fuzzy.

Os conceitos estão associados com conjuntos fuzzy (associando os valores de pertinência) em um processo chamado de fuzzificação. Uma vez que temos os

valores fuzzificados, a lógica fuzzy pode trabalhar com regras linguísticas e obter uma saída, que permanece difusa ou desfuzzificada para obter um valor discreto crisp.

A teoria clássica dos conjuntos baseia-se no princípio básico da lógica de maneira que um indivíduo pertence ou não a um conjunto, enquanto a ideia básica de um conjunto fuzzy é que um item é parte de um conjunto com certo grau de pertinência. Assim, uma proposição não é completamente (apenas parcialmente) verdadeira ou falsa (ZIMMERMANN, 1987). Este grau é expresso como um número no intervalo $[0; 1]$, figura 10.

Figura 10-Descrição de conjuntos crisp (acima) e Fuzzy (abaixo), para um dado de entrada em um conjunto, A, B, C.



Fonte: Gonzalez 2011.

Os conjuntos fuzzy são uma forma de caracterização de classe que, por várias razões, não têm ou não podem definir limites rígidos (contatos) entre classes. Essas classes, definidas de maneira inexata, são chamadas de conjuntos fuzzy. A utilização de um conjunto fuzzy é indicada sempre que se tiver que lidar

com ambiguidade, abstração e ambivalência matemática ou conceitual de fenômenos empíricos (BURROUGH e MACDONNELL,1998); ou, dito de outra forma, quando um objeto pode ter um grau de pertinência definido entre a pertinência total (valor um) ou não pertinência (valor zero). A partir desta perspectiva, os conjuntos convencionais (ou conjuntos crisp) podem ser visto como um caso especial de conjuntos fuzzy; um conjunto fuzzy que suporta apenas dois níveis de pertinência (um e zero).

Um conjunto fuzzy pode ser definido de forma geral como um conjunto com limites difusos. Seja X , o universo do discurso, e os seus elementos denotam-se como x , na teoria clássica de conjuntos discretos, define-se um conjunto C que se define sobre X mediante a função característica de C como f_C .

$$f_C(x) = \begin{cases} 1 & \text{quando } x \in C \\ 0 & \text{quando } x \notin C \end{cases} \quad (15)$$

Este conjunto mapeia o universo X em um conjunto de dois elementos, em que $f_C(x)$ é 1 se o elemento x pertence ao conjunto C , e 0, se o elemento x não pertence ao conjunto C . Se esta função é generalizada para os valores atribuídos aos elementos da matriz e cai em uma determinada faixa particular no eixo y e assim indica o grau de pertinência dos elementos neste conjunto, teríamos uma função de pertinência de um conjunto difuso determinado. A função de pertinência μ_A pela que se define um conjunto fuzzy A , seria:

$$\mu_A = X \rightarrow [0,1] \quad , \quad (16)$$

Onde $\mu_A(x) = 1$, se x pertence totalmente a A , $\mu_A(x) = 0$ se x não está em A e $0 < \mu_A(x) < 1$ se x está parcialmente em A . Este valor entre 0 e 1 representa o grau de pertinência (também chamado valor de pertinência de um elemento x a um conjunto A).

Assim, o intervalo da equação anterior é de números reais, e inclui as bordas. Mesmo que $[0;1]$ é uma faixa de valores no eixo y mais utilizados para

representar funções de pertinência, qualquer conjunto arbitrário com uma ordenação total ou parcial pode ser utilizado.

6.2 Operações de conjuntos fuzzy

As três operações básicas definidas em conjuntos discretos (Complemento, união e intersecção) podem ser generalizada em várias formas em conjuntos fuzzy. No entanto, existe uma generalização particular que tem especial importância. Quando é restrito o rango de pertencentes ao conjunto $[0;1]$, essas operações "padrão" sobre conjuntos fuzzy se comportam da mesma maneira que as operações sobre conjuntos discretos. Estas operações são definidas assim:

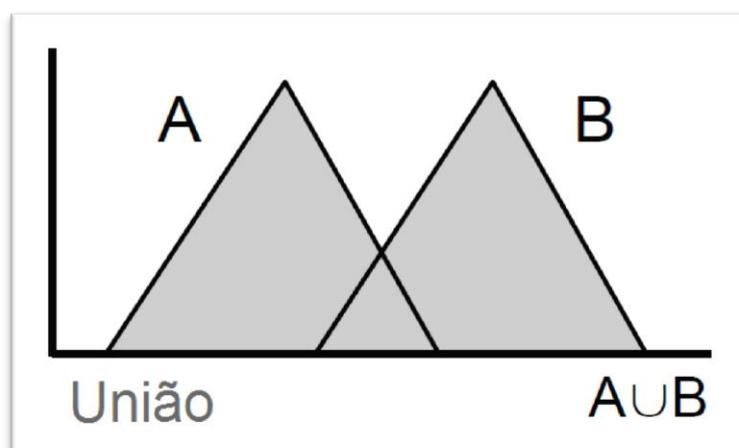
6.2.1 União

A forma generalizada da união é a T-conorma. Pode ser definida com a seguinte função.

$$\perp: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1], \quad (17)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \perp [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad , \quad (18)$$

Figura 11- Descrição gráfica da operação de união de conjuntos Fuzzy, para um conjunto, A, B.



Fonte: Gonzalez 2011.

Para que uma função possa ser considerada como uma união fuzzy, deve satisfazer os seguintes axiomas.

- 1) Elemento Neutro: $\perp(a, 0) = a$,
- 2) Comutatividade: $(a, b) = \perp(b, a)$,
- 3) Monotonicidade: *Se $a \leq c$ y $b \leq d$ então $\perp(a, b) = \perp(c, d)$,*
- 4) Associatividade: $\perp(\perp(a, b), c) = \perp(a, \perp(b, c))$,

Algum T- conormas amplamente utilizadas são:

- Máximo: $\perp(a, b) = \max(a, b)$
- Produto: $\perp(a, b) = (a + b) - (a \times b)$
- Soma limitada (Lukasiewick): $\perp(a, b) = \min(a + b, 1)$

6.2.2 Interseção

A forma generalizada da interseção é definida T-norma. É uma função da forma.

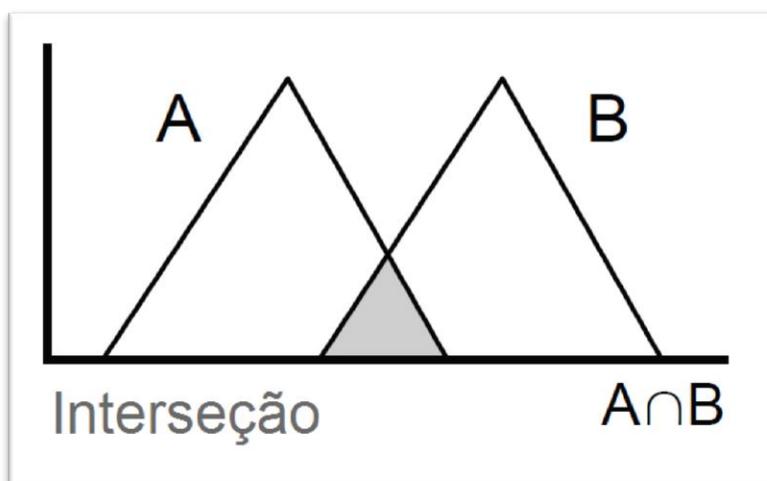
$$T: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] , \quad (19)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = T[\mu_A(x), \mu_B(x)] , \quad (20)$$

Uma T-norma satisfaz os seguintes axiomas $\forall a, b, c \in [0,1]$

- 1) Elemento unidade: $T(a, b) = 1$,
- 2) Comutatividade: $T(a, b) = T(b, a)$,
- 3) Monotonicidade: *Se $a \leq c$ y $b \leq d$ então $T(a, b) = T(c, d)$,*
- 4) Associatividade: $T(T(a, b), c) = T(a, T(b, c))$.

Figura 12- Descrição gráfica da operação de interseção de conjuntos Fuzzy, para um conjunto, A, B.



Fonte: Gonzalez 2011.

Algum T- normas amplamente utilizadas são:

- Máximo: $T(a,b) = \max(a,b)$,
- Produto algébrico: $T(a,b) = ab$,
- Suma limitada (Lukasiewick): $T(a,b) = \max(0, a+b-1)$,

6.2.3 Complemento:

O complemento \bar{A} de um conjunto fuzzy A , é denotado por cA ; esta definido por uma função de tipo $c: [0,1] \rightarrow [0,1]$. Tem que satisfazer os seguintes axiomas:

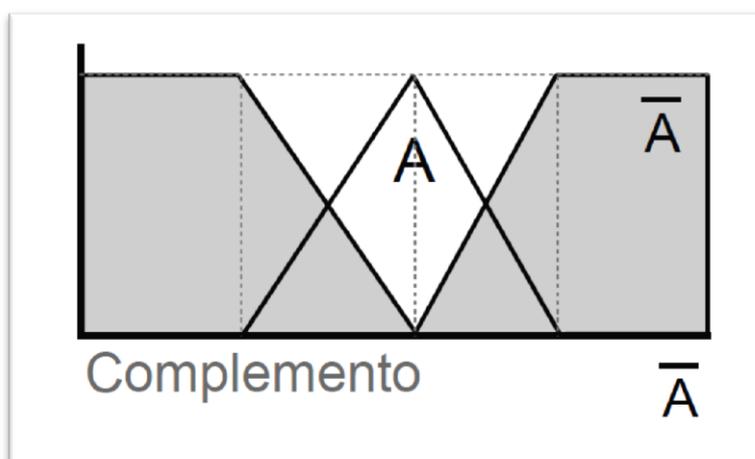
- 1) Condições limite ou fronteira: $c(0) = 1$ y $c(1) = 0$
- 2) Monotonicidade: $\forall a,b \in [0,1]$ se $a < b$ então $c(a) \geq c(b)$
- 3) C é uma função contínua.

4) C é involutiva $\forall a, \in [0,1]$ temos $c(c(a)) = a$.

O complemento é uma função da forma:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) , \quad (21)$$

Figura 13- Descrição gráfica da operação de Complemento deconjuntos Fuzzy, para um conjunto, A, B.



Fonte: Gonzalez 2011.

Tal como acontece com os operadores de união e interseção, também para o complemento existem muitas classes. Um dos mais utilizados, além do complemento clássico ($\mu_{\bar{A}}(x) = c(a) = 1 - a$) é o λ - complemento de sugeno, que é definido pela seguinte expressão.

$$\mu_{\bar{A}^\lambda}(x) = \frac{1 - \mu_A(x)}{1 - \lambda \mu_A(x)} \quad \text{com } \lambda \in (-1, \infty) , \quad (22)$$

Se $\lambda = 0$ a função se comporta como o complemento clássico. Além disso, para cada valor de λ , obtemos uma expressão particular para o complemento. Outro tipo de complemento amplamente utilizado é o de Yager, definida com a seguinte expressão:

$$\mu_{\bar{A}^w}(x) = \left(1 - \mu_A(x)^w \right)^{\frac{1}{w}} \quad \text{com } w \in (0, \infty) , \quad (23)$$

Tal como acontece com o complemento de Sugeno, alterando o valor de w obtemos diferentes tipos de complemento. Se $w=1$ temos o complemento clássico.

6.3 Propriedades dos conjuntos

Os conjuntos Crisp e difusos têm as mesmas propriedades (na verdade, os conjuntos crisp podem ser visto como um subconjunto de conjuntos fuzzy).

- Comutativa: $A \cap B = B \cap A$,
- Associativa: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$,
- Distribuição: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$,
- Idempotente: $A \cup A = A$ y $A \cap A = A$,
- Involução: $\neg(\neg A) = A$,
- Transitividade: *If* $(A \subset B) \cap (B \subset C)$ *then* $A \subset C$,
- Lei de Morgan: $\neg(A \cap B) = \neg A \cup \neg B$ y $\neg(A \cup B) = \neg A \cap \neg B$,

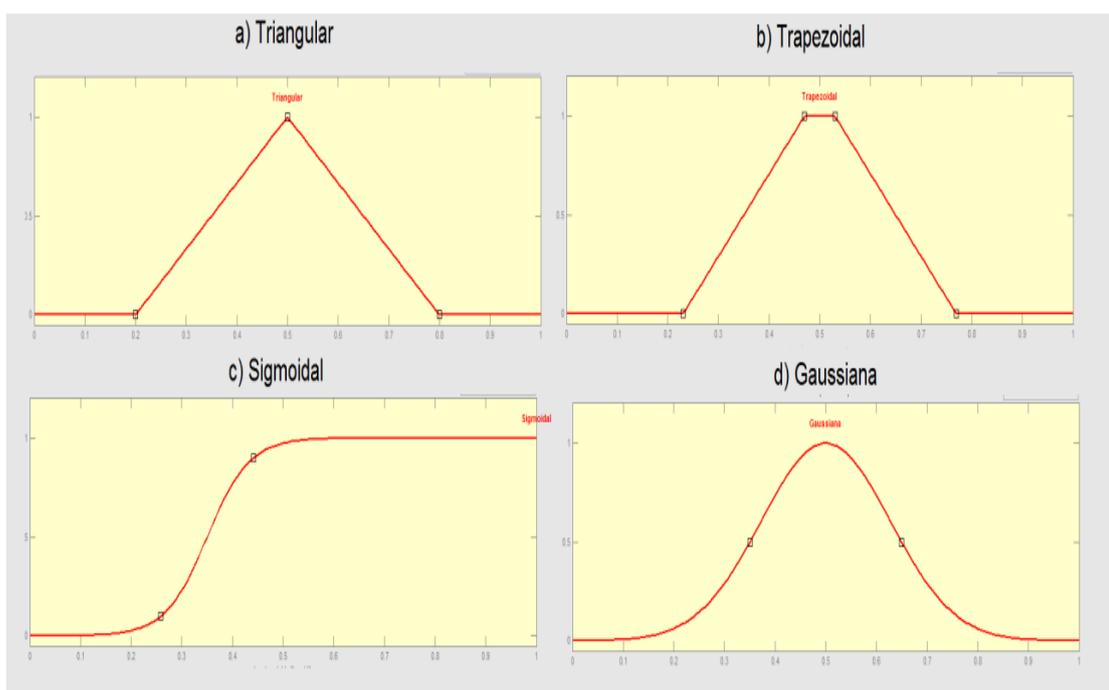
Empregando essas operações, propriedades e modificadores podem-se obter grande variedade de expressões.

6.4 Representação de conjuntos fuzzy (funções de pertinências)

Os conjuntos crisp são úteis, mas têm problemas em muitas situações reais para sua aplicação. Para definir um conjunto fuzzy deve escolher-se a sua função de pertinência. As funções de pertinência são as formas de representação dos conjuntos fuzzy. Um método comum é identificar o domínio do problema e representar por diferentes funções, as funções de pertinência dependem do problema a ser resolvido (tipicamente Triangular e Trapezoidal). Também podem ser usadas funções Gaussianas ou as funções Sigmóide vistas na figura 14.

Para representar um conjunto fuzzy contínuo, necessitamos expressar a função de pertinência e mapear os elementos do conjunto com seu grau de pertinência. Mas, no entanto pode ser usado a priori qualquer tipo de funções. Na prática utilizam-se funções lineares com uma descrição de seu vetor de ajuste.

Figura 14- Exemplo de funciones de pertinência (a) Triangular, b) Trapezoidal, c) Sigmoide, d) Gaussiana.

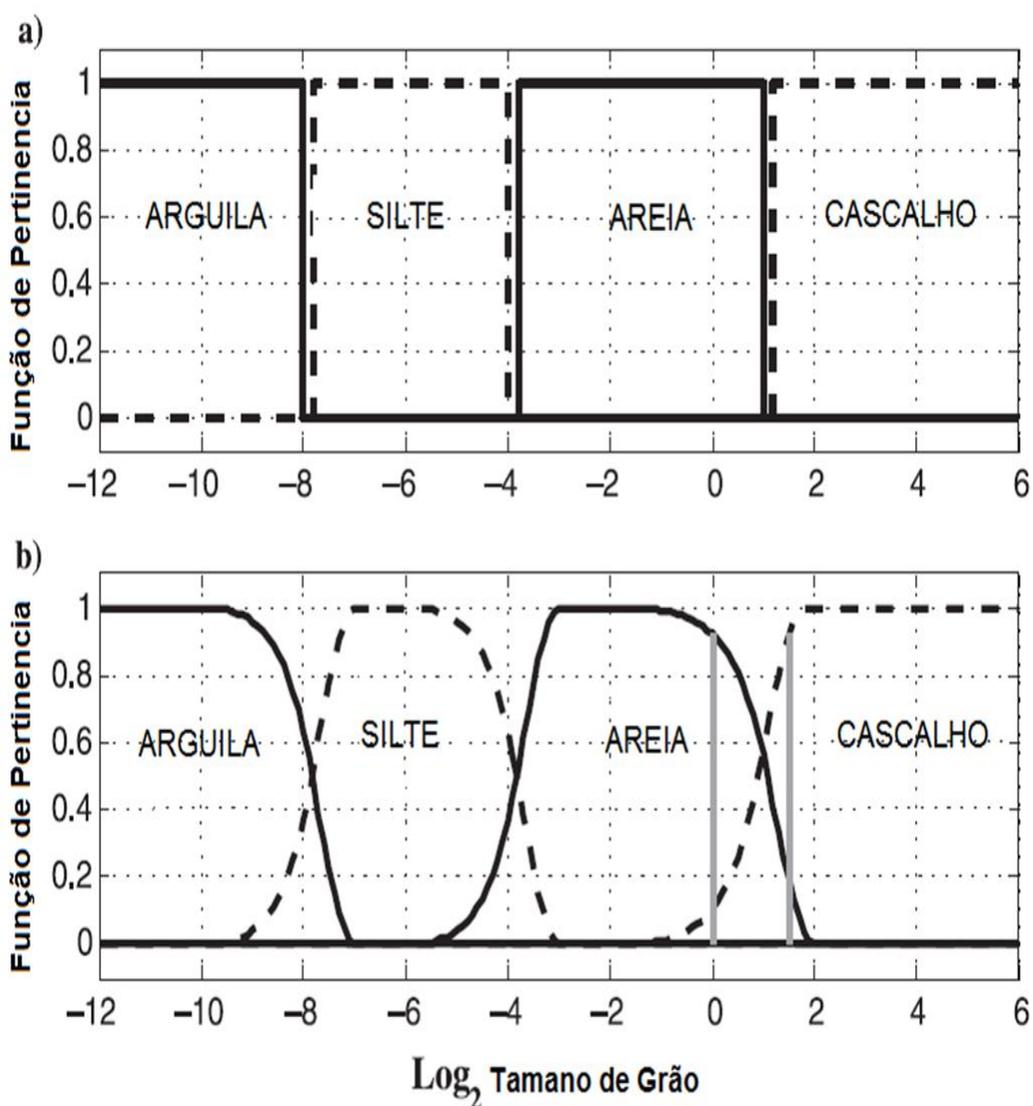


Fonte: (Autor elaborado em Matlab 2013)

Tais situações onde podem ser aplicadas as funções de pertinência são abundantes em geologia. Por exemplo, sedimentos, são classificados de acordo com seu tamanho de grão em cascalho, areia, silte e argila. (WENTWORTH, 1922). A associação da função correspondente a esta definição é mostrada na Figura (15a). Note-se que para as funções de pertinência para a classificação crisp de sedimentos clásticos, um sedimento cujo tamanho de partícula é de 2 mm é classificada como areia, enquanto outro, cujo tamanho de partícula é 2,0001 milímetros são classificadas como cascalho. Esta separação é um pouco estranha em contraste com a nossa definição intuitiva, onde nos referimos a os sedimentos como " muito bem "areia ou " principalmente " ou " praticamente " cascalho. Para aliviar a situação um pouco, cada categoria na escala é ainda mais subdividida em grossa, média, fina e muito fina subclasses. Note-se que como o número de

subclasses aumenta, esta classificação no limite se aproxima da descrição fuzzy pode-se substituir a classificação crisp de sedimentos, com uma classificação fuzzy, cuja função adesão é mostrada na figura 15b (as curvas são assimétricas devido à escala logarítmica), uma classificação de grão baseada na lógica fuzzy admitiria niveles de transição entre cada classe de grão (SAGGAF, 2003).

Figura 15. Funções de pertinência para a classificação crisp de sedimentos clásticos figura (a) e funções de pertinência para a classificação fuzzy sedimentos clásticos figura (b). As linhas verticais cinzas indicam exemplos de sedimentos de dois tamanhos de partícula específicos.



Fonte: (Adaptado de SAGGAF, 2003).

6.5 Variáveis linguísticas

Para representar o conhecimento em raciocínio aproximado, temos que usar variáveis linguísticas. Uma variável linguística (ZADEH,1974) é aquele cujos valores são palavras ou frases em uma língua natural ou artificial. Assim, uma variável linguística é utilizada para representar qualquer elemento que seja muito complexo, ou que não tem uma definição precisa; ou seja, o que não podemos descrever em termos numéricos. Assim, uma variável linguística é caracterizada por um quártuplo.

$$(X, T(X), U, G, M) \quad (24)$$

X é o nome da variável, $T(X)$ é o conjunto de termos de X ; ou seja, a coleta de valores linguísticos (ou rótulos linguístico); U é o universo de discurso (ou domínio subjacente); G é a gramática livre de contexto gerado pela os termos em $T(X)$; M é a regra semântica que associa cada valor linguístico de X seu significado; $M(x)$ $M(x)$ é um subconjunto fuzzy em U .

Os símbolos terminais de gramáticas incluem:

- Termos primários: "baixo", "alto",...
- Modificadores: "Muito", "Mais", "Menor", " Perto de ", ...
- Conectores lógicos: Normalmente NOT, AND e OR.

Normalmente, definem-se os conjuntos fuzzy dos termos primários e, a partir destes, são calculados os conjuntos fuzzy dos termos compostos (modificadores mais termos primários).

Um rótulo linguístico é formado como uma sequência dos símbolos terminais da gramática, um uso comum das variáveis linguísticas é regra fuzzy.

Uma variável linguística pode usar modificadores para alterar a forma de conjuntos fuzzy. Estes modificadores podem estar associados a advérbios como "muito", "ligeiramente", "um pouco", etc... Estes modificadores podem ser aplicados para completar frases, verbos, adjetivos, etc.

6.6 Regras fuzzy

Muitas vezes, a programação clássica não é suficiente para que um sistema execute funções complexas. Quando um sistema foi explicitamente programado para executar uma função e é solicitado para fazê-las, o sistema tem que raciocinar.

Quando o número de fatos e regras aumenta, o sistema deve ser capaz de verificar muitos fatos que surgem nas etapas de raciocínio.

O grau de satisfação de uma expressão representa um conjunto fuzzy. Uma regra fuzzy (regra de produção difusa if-then) é expressa simbolicamente como:

$$IF < \textit{proposição fuzzy} > THEN < \textit{proposição fuzzy} >$$

Onde, proposição fuzzy pode ser uma proposição fuzzy composta. Podemos definir uma proposição simples desse tipo por:

$$p: IF X \textit{ é } A THEN Y \textit{ é } B$$

O antecedente e consequente de uma regra podem ter várias peças. Nos sistemas de regras clássicos, se o antecedente é verdadeiro, o consequente também é verdadeiro. Em sistemas Fuzzy onde o antecedente é difuso, todas as regras são parcialmente executadas, e a consequência é verdade até certo ponto (se o antecedente é verdadeiro com qualquer grau de pertinência, a consequente é verdadeira também em certo grau).

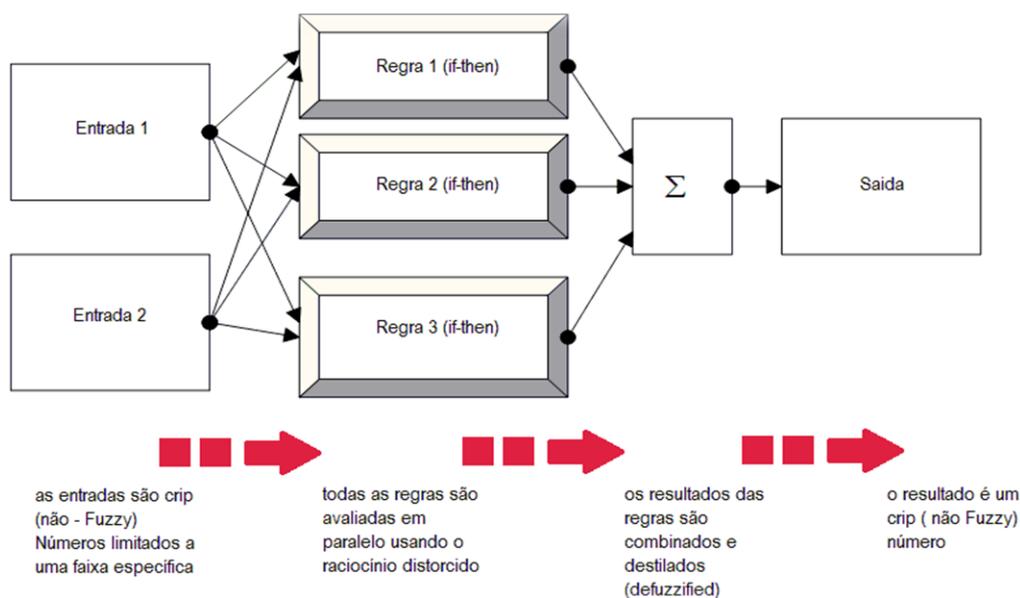
6.7 Inferência fuzzy

A inferência fuzzy pode ser definida como o processo de obtenção de um valor de saída para um valor de entrada utilizando a teoria de conjuntos fuzzy a qual pode ser observada na figura (16).

A informação flui da esquerda para a direita, a partir de duas entradas para uma única saída. A natureza paralela das regras é um dos aspectos mais importantes dos sistemas de lógica fuzzy. Em vez de comutação acentuada entre

os modos baseados em pontos de quebra, a lógica flui sem problemas de regiões onde o comportamento do sistema é dominado por qualquer uma regra ou outro.

Figura 16- Descrição do processo de inferência fuzzy.



Fonte: (JANG,1997)

6.7.1 Inferência Mamdani.

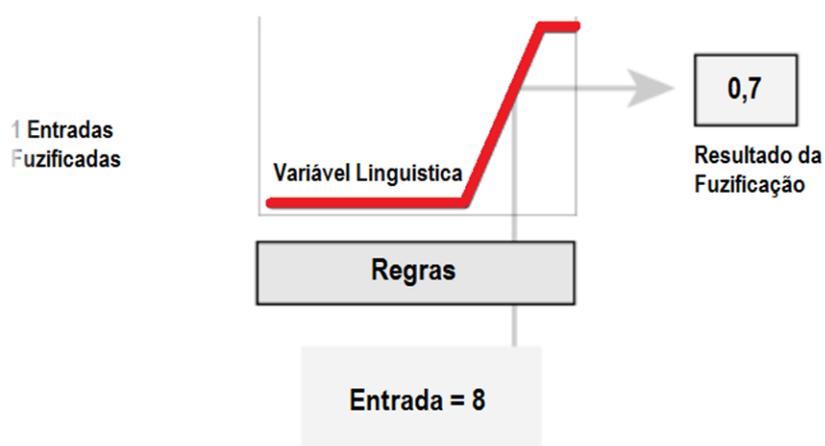
É possivelmente o método mais utilizado, proposto por Ebrahim Mamdani em 1975. O processo é feito em quatro passos:

1. Fuzzificação das variáveis de entrada.
2. Avaliação das regras.
3. Adicionando as saídas das regras.
4. Agregado todas as saídas
5. Defuzzificação.

6.7.1.1 Fuzzificação

O primeiro passo é levar os valores de entrada discretos e determinar o grau de pertinência destas entradas para os conjuntos fuzzy associados. O valor discreto naturalmente será limitado no universo de discurso da variável. Desta maneira cada entrada se fuzzifica sobre todas as funções de pertinência utilizadas nas regras fuzzy figura (17).

Figura 17-Fuzzificação para um valor crisp.



Fonte: (JANG,1997)

Desta forma, cada entrada é fuzzificada sobre todas as funções de pertinência de qualificação exigidas pelas regras.

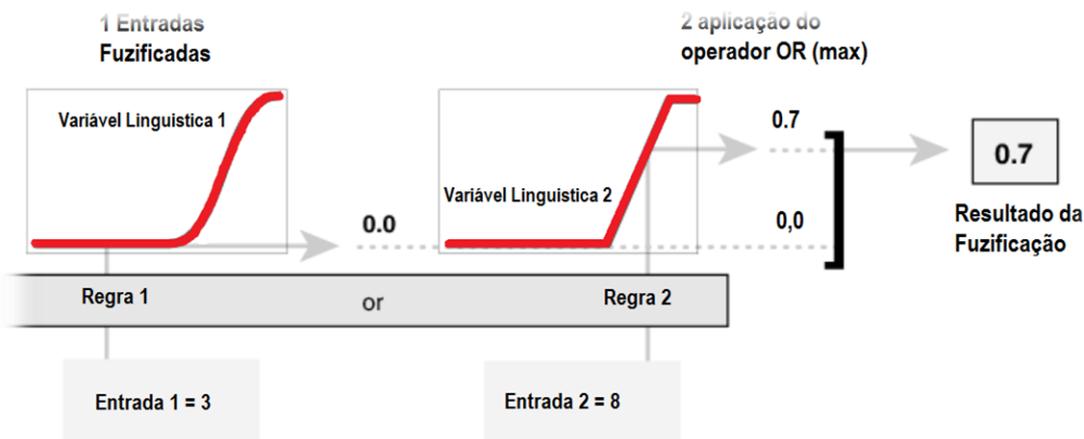
6.7.1.2 Avaliação de regras.

Após as entradas serão fuzzificadas, sabe se o grau em que cada parte do antecedente é satisfeita para cada regra. Se o antecedente de uma regra dada tem mais de uma parte, o operador fuzzy é aplicado para obter um número que representa o resultado do antecedente para essa regra. Este número é então aplicado para a função de saída.

A entrada para o operador fuzzy é dois ou mais valores de adesão de variáveis de entrada fuzificadas. A saída é um único valor de verdade.

Se uma regra tem vários antecedentes, se utiliza o operador AND ou OR para obter um único número que representa o resultado da avaliação.

Figura 18- Avaliação das regras para duas entradas.



Fonte: (JANG,1997)

6.7.1.3. Agregação das saídas.

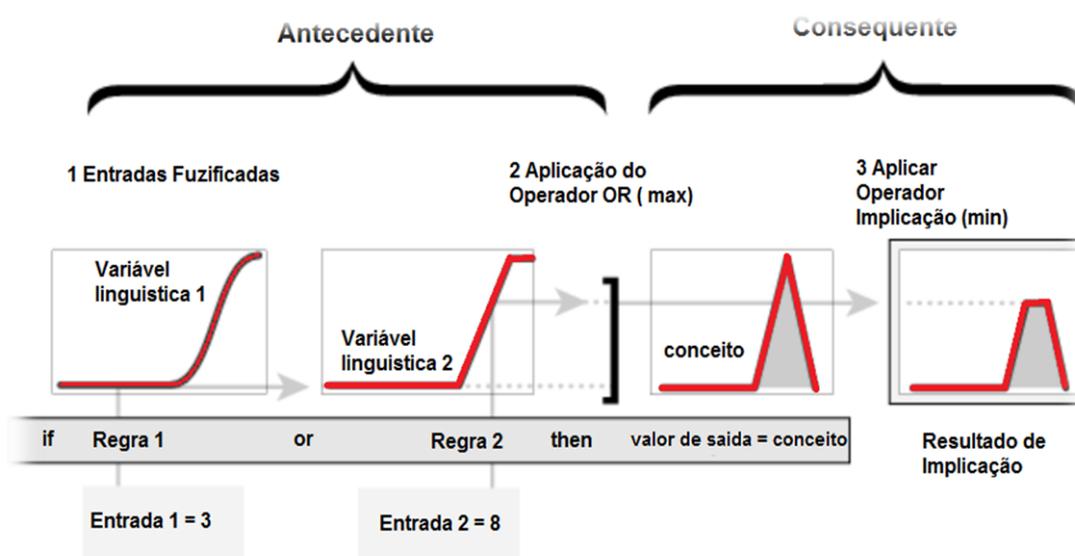
A agregação é o processo de unificação das saídas de todas as regras; ou seja, se combinam as funções de pertinência de todos os consequentes anteriormente escalados, combinando para um único conjunto fuzzy para cada variável de saída figura (19).

Antes de aplicar o método de implicação, deve ser determinado o peso das regras. Cada regra tem um peso (um número entre 0 e 1), o qual é aplicado ao número atribuído pelo antecedente. Geralmente, esse peso é de 1 e, portanto, não tem qualquer efeito sobre o processo de implicação.

Após ponderação adequada ter sido atribuído a cada regra, o método de implicação é efetuado. A consequente é um conjunto fuzzy representado por uma função de pertinência, que pondera apropriadamente as características linguísticas que são atribuídas a ele. A consequente é reformulada utilizando uma função associada com o antecedente (um único número). A entrada para o processo de implicação é um número único dado pelo antecedente, e a saída é um conjunto

fuzzy. A implicação é feita para cada regra. Dois métodos internos são suportados, e elas são as mesmas funções que são usadas pelo método: mín (mínimo), que trunca a saída do conjunto fuzzy, e prod (produto), que dimensiona a saída do conjunto fuzzy.

Figura 19. Aplicando o Método de Implicação



Fonte: (JANG 1997)

6.7.1.4 Agregação de todas as saídas.

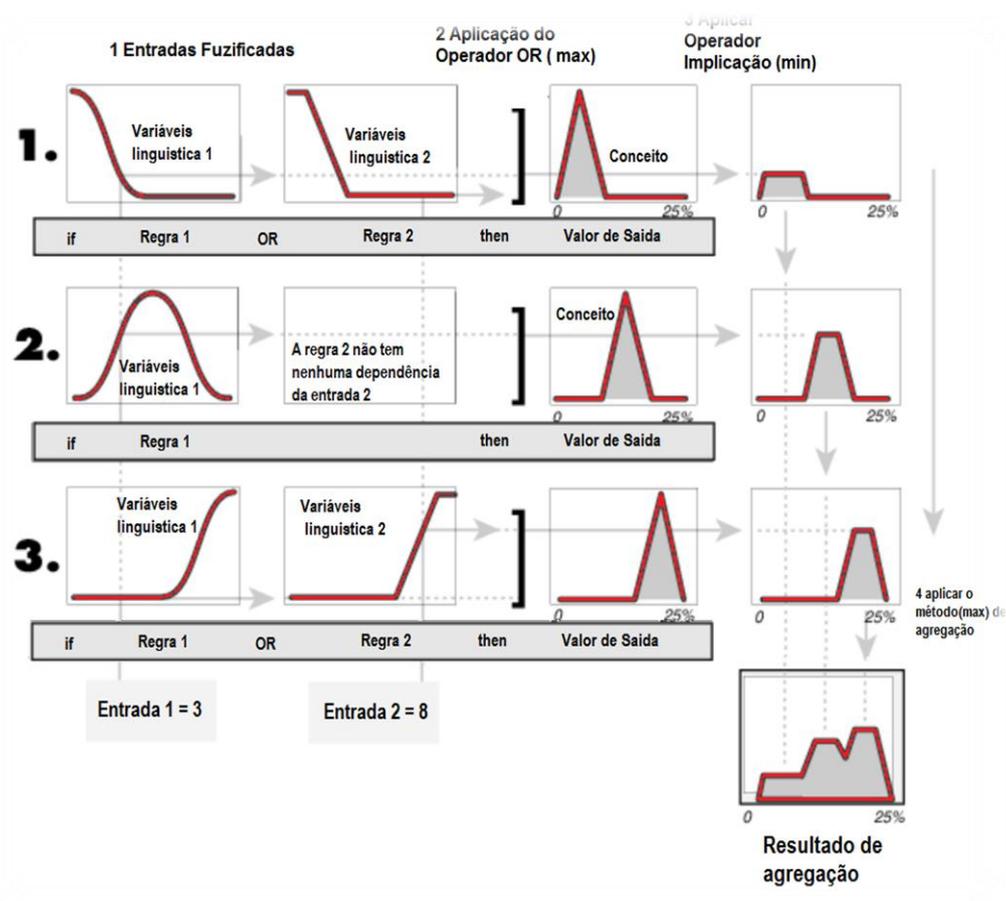
Como as decisões são baseadas na análise de todas as regras em uma pergunta, as regras devem ser combinadas de alguma forma, a fim de tomar uma decisão. A agregação é o processo pelo qual os conjuntos fuzzy que representam as saídas de cada regra são combinados em um único conjunto fuzzy. A agregação ocorre apenas uma vez para cada variável de saída, pouco antes da quinta e última etapa, defuzzificação. A entrada do processo de agregação é a lista de funções de saída truncado retornados pelo processo de aplicação para cada regra. A saída do processo de agregação é um conjunto fuzzy para cada variável de saída.

Enquanto o método de agregação é comutativo (que deve ser sempre), em seguida, a ordem na qual as regras são executadas não tem importância. Três métodos internos são suportados:

- Max (máximo)
- Probor (probabilística OR)
- sum (simplesmente a soma de cada conjunto de saída regras)

No diagrama a seguir, todas as três regras foram colocados juntos para mostrar como a saída de cada regra é combinada, ou agregadas, em um único conjunto fuzzy cuja função associação atribui ponderação para cada valor de saída (tip) figura 20.

Figura 20- Agregação das saídas, para o processo de logica fuzzy.



Fonte: (JANG 1997)

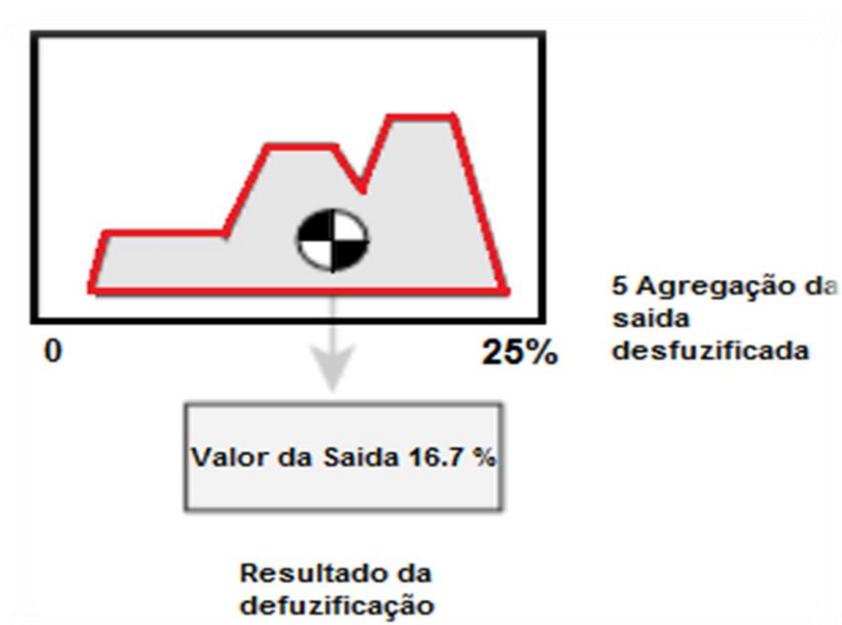
6.7.1.5 Defuzzificação.

A entrada para o processo de defuzzificação é um conjunto fuzzy (agregação de conjunto fuzzy de saída) e a saída é um único número. Por mais que a imprecisão ajuda as regras de avaliação durante as etapas intermediárias, o resultado final desejado para cada variável é geralmente um único número. No entanto, a soma de um conjunto difuso engloba uma gama de valores de saída, e assim deve ser defuzzificada, a fim de resolver um único valor a partir do conjunto de saída.

Talvez o método de defuzzificação mais popular seja o cálculo centróide, que retorna ao centro da área sob a curva. Há cinco métodos internos suportados: centroide, Mediatriz, meio de máximo (a média do valor máximo do conjunto de saída), o maior do máximo, e menor do máximo.

O resultado final é geralmente expresso por um valor discreto. Nesta fase, é tomado como entrada o conjunto difuso anteriormente obtido para dar um valor de saída figura (21).

Figura 21- Diagrama de defuzzificação.

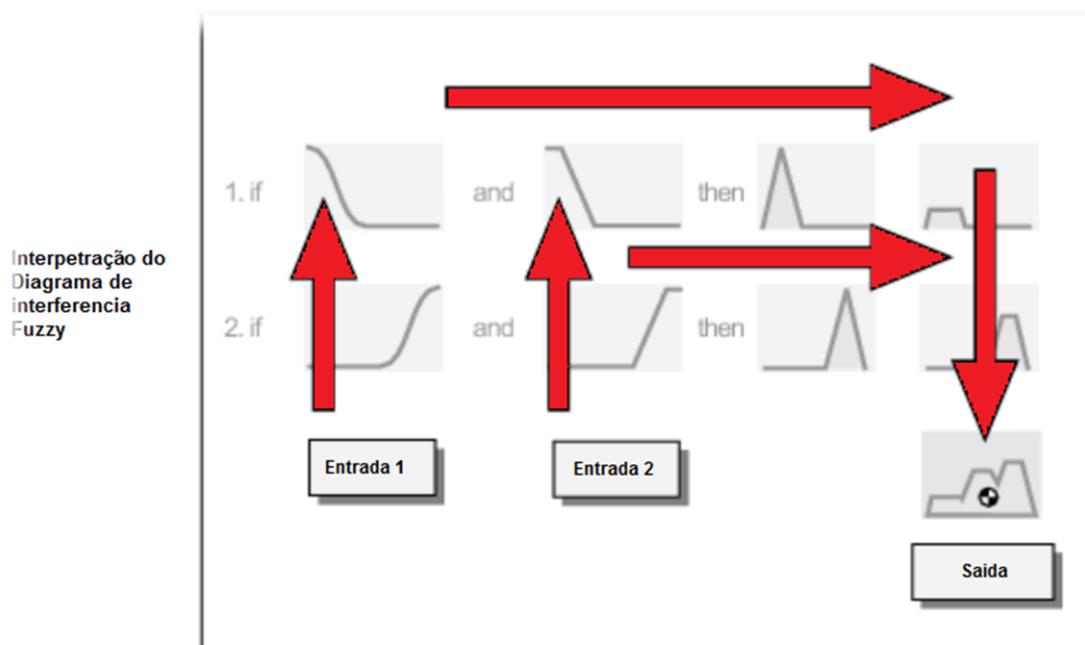


Fonte (JANG, 1997)

6.7.2 Diagrama de inferência fuzzy.

O diagrama de inferência fuzzy é a composição de todos os pequenos diagramas apresentados. Ele exhibe simultaneamente todas as partes do processo de inferência fuzzy determinado. Fluxos de Informação através do diagrama de inferência difusa como mostrado na figura (22) a seguir.

Figura 22-Diagrama Inferência Fuzzy.



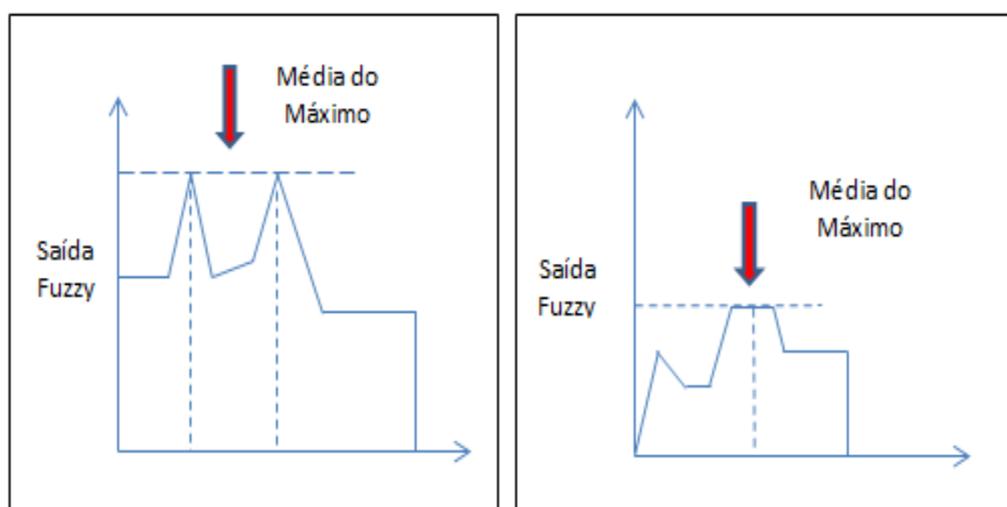
Fonte: (JANG,1997)

Nesta figura (22), o fluxo procede-se a partir das entradas na parte inferior esquerda, seguida, ao longo de cada linha, ou regra, e depois para baixo as saídas da regra para terminar no canto inferior direito. Este fluxo compacto mostra tudo de uma vez, desde fuzificação variável linguística todo o caminho através defuzificação do produto agregado.

6.7.3 Método da medida dos máximos (MOM)

Uma técnica utilizada para a defuzzificação é a aplicação do método da media dos máximos. O operador fuzzy Máximo assemelha-se à operação Booleana “OU” (união), sendo as evidências combinadas segundo a função $m = \text{Max}(m_a, m_b, m_c, \dots)$, onde os valores de m_a , m_b e m_c correspondem aos valores dos membros fuzzy das evidências dos valores de pertinência. Nessa operação o valor de saída para um dado ponto será o maior valor de entrada dos planos de informação. O operador fuzzy Máximo é o mais otimista entre operadores fuzzy, sendo indicado para situações onde a existência de apenas uma evidência é suficiente para indicar regiões potenciais à ocorrência de determinada evidência, em outras palavras no método de medida dos máximos, o valor numérico de saída corresponde ao ponto do universo de discurso que corresponde a media dos pontos de máximos local da função de pertinência de saída, produzido pelo processo de inferência.

Figura 23. Defuzzificação método das medidas dos máximos (MON).



Fonte: Miranda. P, Et. Al.(2003).

7 METODOLOGIA

O principal problema da realização da identificação de fácies sedimentares, diretamente nos perfis geofísicos, é a ocorrência da quebra da premissa fundamental da geofísica de poço, o qual estabelece que camadas geologicamente semelhantes, apresentam propriedades físicas semelhantes. Nestes casos, a utilização dos métodos clássicos da avaliação de formação para a identificação de litologias, que podem ser tomadas para produzir, por associação, a identificação de fácies, não apresenta um comportamento suficientemente realista, podendo acarretar interpretações incorretas.

Esta dissertação apresenta uma forma alternativa para a codificação das medidas registradas nos perfis de porosidade, de modo a enfatizar as diferenças geológicas de diferentes camadas em termos de suas propriedades físicas. Esta particular codificação dos perfis de porosidade, no entanto ainda possui uma interpretação visual com grandes dificuldades.

Uma forma de atenuar os possíveis erros da interpretação visual é a utilização do apoio computacional, objetivamente, com a utilização do sistema de inferência Fuzzy, construído segundo o método de Mamdani (WEBER e KLEIN, 2003).

7.1 Parâmetros P e K

A informação geológica contida nos perfis de porosidade aparente, densidade, sônico e porosidade neutrônica se traduz pelas propriedades físicas da matriz, desse modo na avaliação de formação foram criados vários métodos de codificação das medidas registradas nos perfis de porosidade de modo a enfatizar ou destacar o efeito da matriz rochosa sobre essas medidas.

O método clássico da avaliação de formação para a identificação da matriz rochosa é conhecido como o método M e N (BURKE, 1969). No entanto diferentes rochas podem apresentar valores semelhantes para os mesmos parâmetros, o que impede a sua discriminação.

Nesta dissertação apresentam-se dois novos parâmetros de codificação dos perfis de porosidade que podem contribuir para a discriminação litológica e,

consequentemente, para a utilização das informações das análises de testemunho para produzir a identificação de fácies em poços não testemunhados.

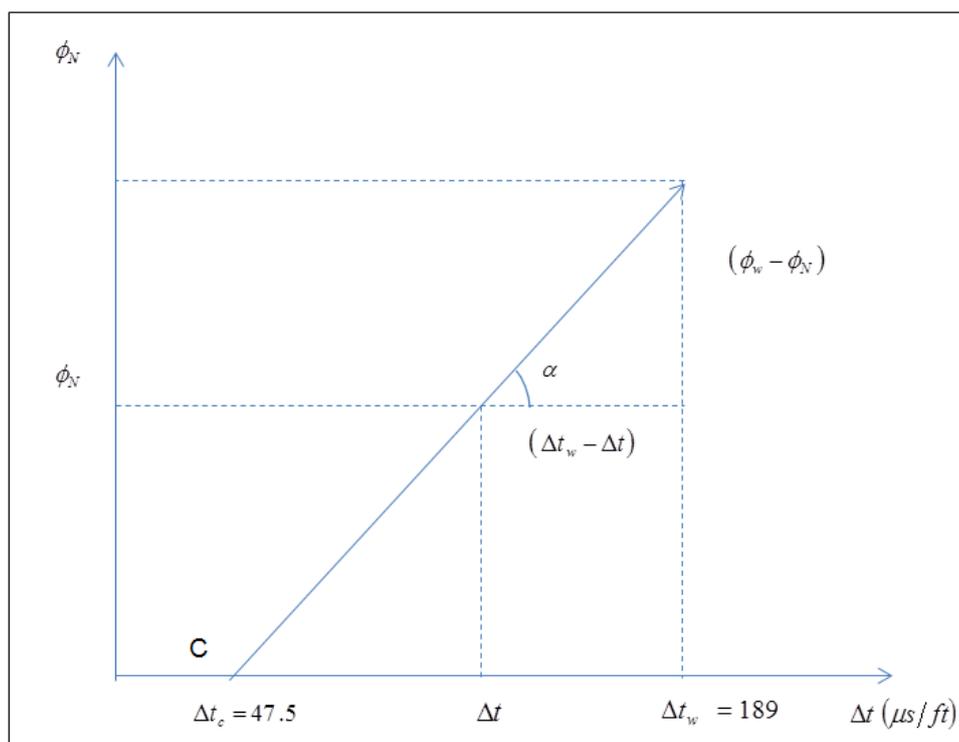
7.1.1 Parâmetro K

O parâmetro K é definido como a inclinação da reta para uma particular matriz que se encontra em um gráfico que associa os perfis de porosidade neutrônica y sônico assim,

$$K = \frac{\phi_w - \phi_n}{\Delta t_w - \Delta t_n} \times 100 \quad , \quad (25)$$

Na equação 25, ϕ_n representa o perfil de porosidade neurônica e Δt_n representa o perfil sônico. O índice w indica o valor do correspondente perfil para água doce, que é tomada como fluido saturante. A constante de multiplicação tem a função de tornar os valores do parâmetro P na mesma escala que os parâmetros M e N .

Figura 24-Gráfico para o calculo do parâmetro K.



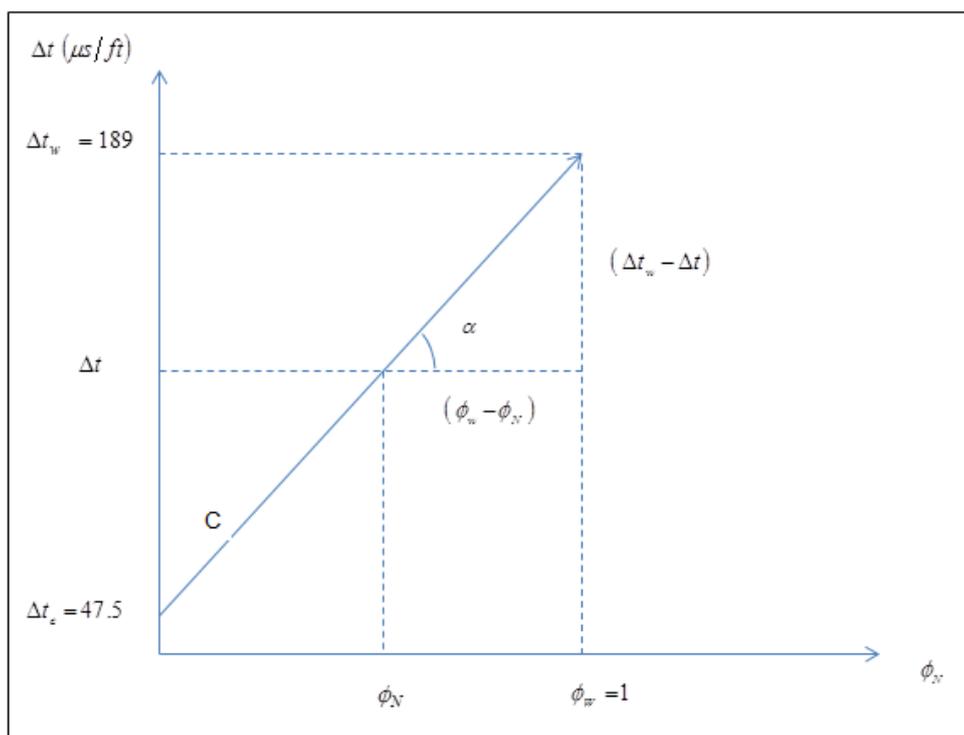
Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1.2 Parâmetro P.

O parâmetro P é definido como o inverso multiplicativo do parâmetro K. Em algumas situações o parâmetro P pode apresentar uma marcante diferença entre diferentes fácies que apresentarem semelhantes valores para os parâmetros M, N, K.

$$P = \tan \alpha = \frac{\Delta t_w - \Delta t_n}{\phi_w - \phi_n} \times 0.01, \quad (25)$$

Figura 25-Gráfico para o cálculo do parâmetro P.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros de porosidade da matriz como $(\rho_m, \phi_m, \Delta t_m)$ que foram usados na construção das tabelas 1 e 2 respectivamente, para os parâmetros M e N também são usados para a construção da tabela 3, que tem em ela os parâmetros P e K obtidos a partir das medidas físicas registradas nos perfis de porosidade para os principais minerais presentes nas rochas sedimentares e são substituídos nas equações de (P) e (K) permitindo a criação de pares ordenados no plano N-P mostrada na tabela (3) representada no gráfico da figura (28, 33, 38 e 44),

característicos da litologia para um determinado trecho do poço. Admite-se assim que os pontos de uma mesma camada se distribuem na vizinhança de um ponto fixo e que a litologia desta camada poderá ser estimada a partir da proximidade deste ponto fixo, medida pela distância euclidiana deste ponto em relação à maioria dos pontos de agrupamento da camada.

Tabela 3-Cálculos dos parâmetros P e K para alguns minerais.

Matriz	P	K
Quartzo	1,27	0,78
Calcita	1,42	0,70
Dolomita	1,53	0,65
Ortoclasio	1,17	0,86
Albita	1,37	0,73
Anidrita	1,40	0,71
Gesso	1,37	0,29
Argilominerais		
Ilita	1,22	0,82
Caolita	1,33	0,75
Smectita	1,22	0,82

Fonte: Elaborado Pelo Autor

7.2 Sistema de inferência fuzzy.

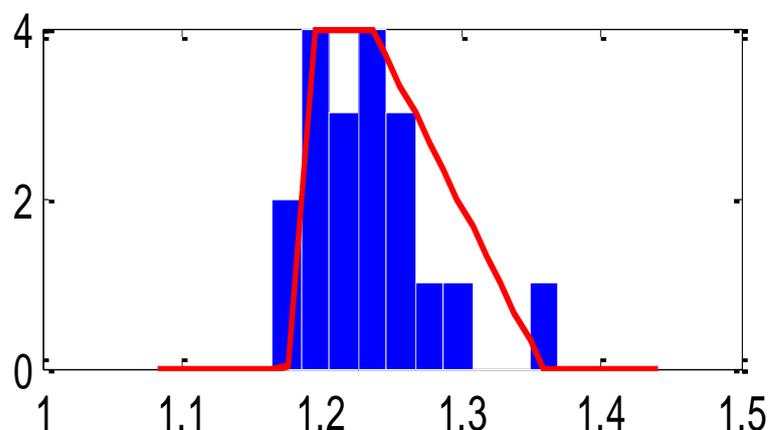
Nesta dissertação adota-se o método de Mamdani para a construção de um sistema Fuzzy, especializado para a identificação de fácies de interesse caracterizadas pela descrição de testemunho, em poços não testemunhados.

7.2.1 Base de conhecimento.

A base de conhecimento do sistema Fuzzy é construída a partir da correlação dos perfis com a descrição de testemunho. No poço testemunhado são tomados os perfis de raio gama natural, resistividade e calculados os parâmetros N e P a partir dos perfis de densidade, sônico e porosidade neutrônica. A Base de

conhecimento pode ser entendida como a criação das funções de pertinência construídas para cada um dos parâmetros utilizados para a formulação das regras Fuzzy. Nesta dissertação, adota-se como função de pertinência uma função trapezoidal construída a partir do histograma de cada parâmetro para cada intervalo de poço testemunhado identificado a presença da fácies de interesse pela análises de testemunho. A figura (24) mostra um exemplo da construção de uma função de pertinência construída para o parâmetro P para uma fácies de interesse. O histograma e representado pelas barras em azul na escala da figura. A função de pertinência e representada pela linha em vermelho escalonada pelo histograma.

Figura 26- Função de pertinência construída para o parâmetro P.



Fonte: Autor

7.3 Regra fuzzy

Uma regra Fuzzy para a identificação da fácies de um ponto qualquer ao longo da trajetória de um poço não testemunhado é construída a partir do conjunto de parâmetros adotados na construção do sistema de inferência Fuzzy. Nesta dissertação adotou-se o perfil de raio gama natural, o perfil de resistividade e os parâmetros N e P. As funções de pertinência são construídas para cada parâmetro e para todas as fácies. Assim, são construídas tantas regras fuzzy, quantas forem as fácies de interesse. Considerando uma fácies qualquer a forma geral de uma regra Fuzzy pode ser escrita como segue,

$$\text{Se } \mu_{RG}(x) \cap \mu_{Rt}(x) \cap \mu_N(x) \cap \mu_k(x) \quad \text{então} \quad f_i \quad (26)$$

Então na equação 26, o termo $\mu_{RG}(x)$ representa a avaliação da função de pertinência para o raio gama natural construída na base de conhecimento para o valor do raio gama natural na profundidade x do poço não testemunhado. Os demais termos da operação antecedente possuem o mesmo significado para cada um dos parâmetros envolvidos na base do conhecimento. O termo consequente f_i representa o grau de pertinência do ponto x do poço não testemunhado em relação à fácies i definida na base do conhecimento, a partir do poço testemunhado.

7.4 Identificações das fácies

Para cada ponto x do poço não testemunhado é avaliado nas expressões mostradas na equação 26. A fácies final a qual pertence o ponto é dada pela equação 27, na forma,

$$F(x) = \max \{ f_i \}; \quad i=1,2,\dots,\dots\dots m \quad (27)$$

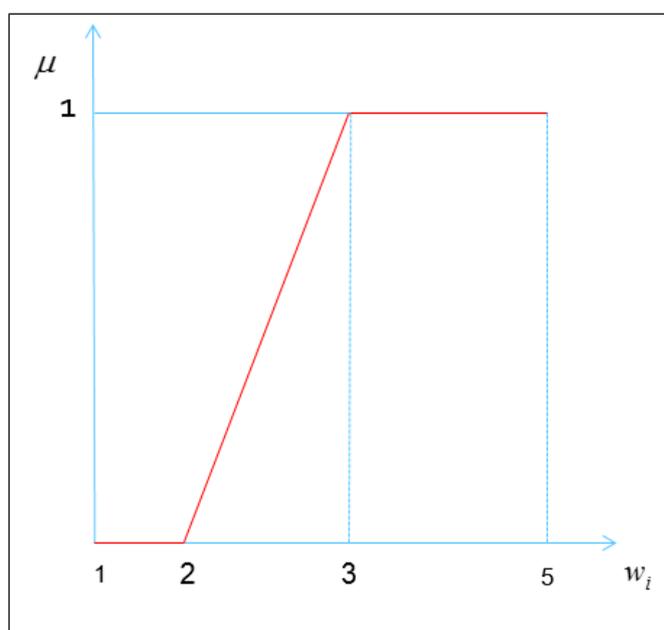
Na equação 27 $F(x)$ indica a fácies de interesse, presente na base do conhecimento a qual o ponto x pertence. m representa o número de fácies presente na base do conhecimento.

7.5 Filtro de profundidade

Em muitas situações, como exemplo, presença de ruídos nos dados variações da composição mineralógica e alterações de fluido intersticial, as medidas das propriedades físicas podem sofrer grandes variações, acrescente se a isso o fato de que o histograma e consequentemente a função de pertinência construída na base do conhecimento não são representativos das possíveis variações do mesmo parâmetro de uma fácies de interesse. Pode ocorrer ainda que pontos pertencentes a uma fácies sejam identificados com pertencentes a outra fácies. Uma possibilidade de correção destes eventos é realizar com a aplicação de um pós - processamento de um filtro de coerência em profundidade.

Esta dissertação apresenta um filtro Fuzzy de coerência na profundidade caracterizado pela função de pertinência mostrada na figura 27.

Figura 27- Gráfico do filtro de profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor

O filtro construído opera como uma janela móvel de 5 pontos, marcados no eixo das abcissas da função de pertinência, que representa o numero de pontos no interior da janela pertencentes em todas as fácies.

A regra Fuzzy que governa o filtro é escrita na equação 27

$$F(x) = \max \{ \mu(w_i) \}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (27)$$

$F(x)$ Representa a fácies final correspondente ao ponto x no poço não testemunhado. Em outras palavras, a fácies de um ponto qualquer é aquela que possui o maior número de representantes no interior da janela móvel.

8 RESULTADOS

Este trabalho apresenta uma série de perfis e gráficos para dois tipos de dados, reais e dados sintéticos, que serão utilizados para produzir uma interpretação geológica, em termos de fácies de um intervalo de um poço perfurado. A metodologia aqui utilizada para a identificação de fácies, é atingida através da concepção de um algoritmo baseado em lógica Fuzzy, para realizar a codificação dos dados dos perfis de porosidade e perfil sônico é utilizado o gráfico M-N, através do qual se pode realizar a identificação visual da litologia associando os pontos que corresponde aos dados do poço com os pontos fixos dos minerais principais do gráfico M-N. Simultaneamente, foi utilizado o gráfico N-P com o fim de fazer uma melhor análise dos dados dos perfis.

Para o desenvolvimento do algoritmo inteligente com respeito aos dados utilizados apresenta-se uma relação por meio das funções de pertinência e um histograma para os perfis de raio gama, resistividade e os parâmetros P e N de um poço testemunhado que serão utilizados para o desenho do sistema de inferência Fuzzy para todas as fácies de interesse, podendo-se utilizar como forma de identificação para todas as fácies desconhecidas de um poço não testemunhado.

Neste trabalho, apresentam-se dois tipos de aplicação da metodologia desenvolvida. No primeiro caso, utilizam-se perfis sintéticos, que satisfazem o modelo petrofísico (matriz monomineral e ausência de argilosidade na constituição das rochas reservatórios). No caso sintético, aborda-se a utilização isolada do algoritmo de base Fuzzy, isto é, sem a necessidade da informação geológica a priori, para ser avaliada com um poço de teste sintético.

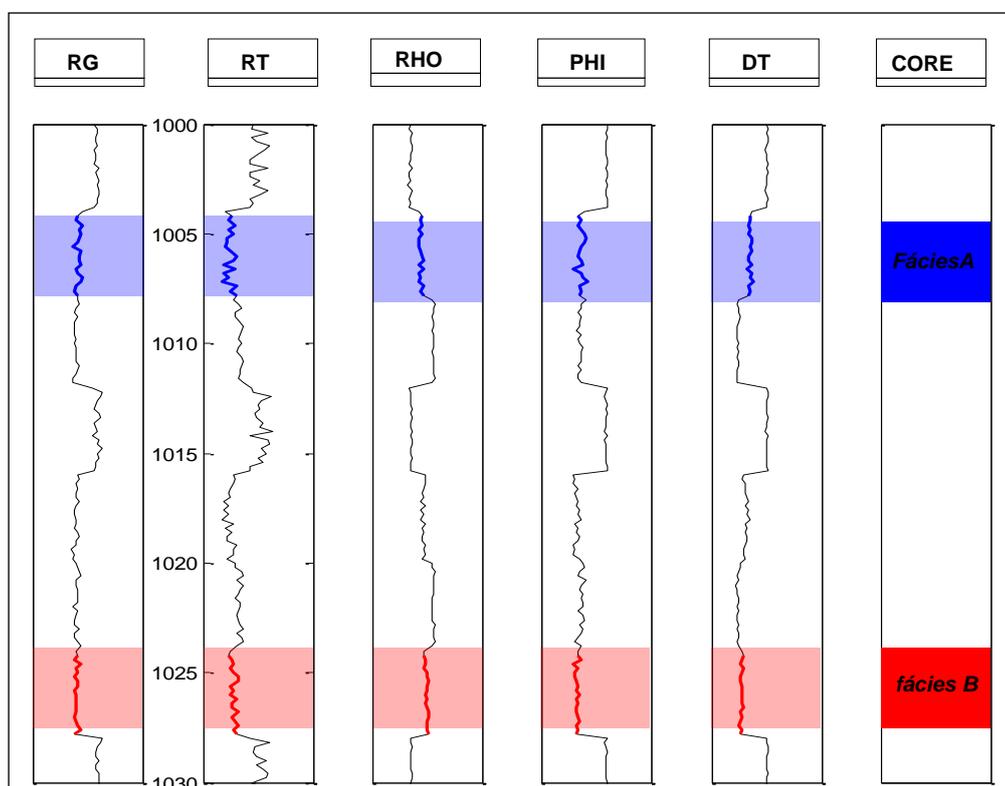
O segundo caso de avaliação da metodologia apresentada, trata da sua utilização com perfis reais. São utilizados os perfis de raio gama, resistividade e porosidade de um poço perfurado na Bacia de Campos. Agora, a informação geológica é necessária para ser inserida ao programa e realizar a identificação de fácies sobre os perfis de raio gama, utilizando sua profundidade como ponto de referência no poço de teste real. Os dados das fácies identificadas incorretamente serão corrigidos por meio de um filtro Fuzzy.

8.1 Dados sintéticos

O exemplo de dados sintéticos aqui utilizados representa um poço que atravessa um conjunto de duas camadas.

A Figura 28 mostra os perfis deste poço de modo que na primeira trilha aparece o perfil de raio gama natural, na segunda, os perfis de resistividade, na terceira o perfil de densidade, e sucessivamente na quarta trilha aparecem os perfis de porosidade neutrônica e sônico, respectivamente. Na quinta trilha é apresentada a descrição de testemunho marcando as profundidades de todas as fácies.

Figura 28- Poço (Testemunhado) – Dados Sintéticos.

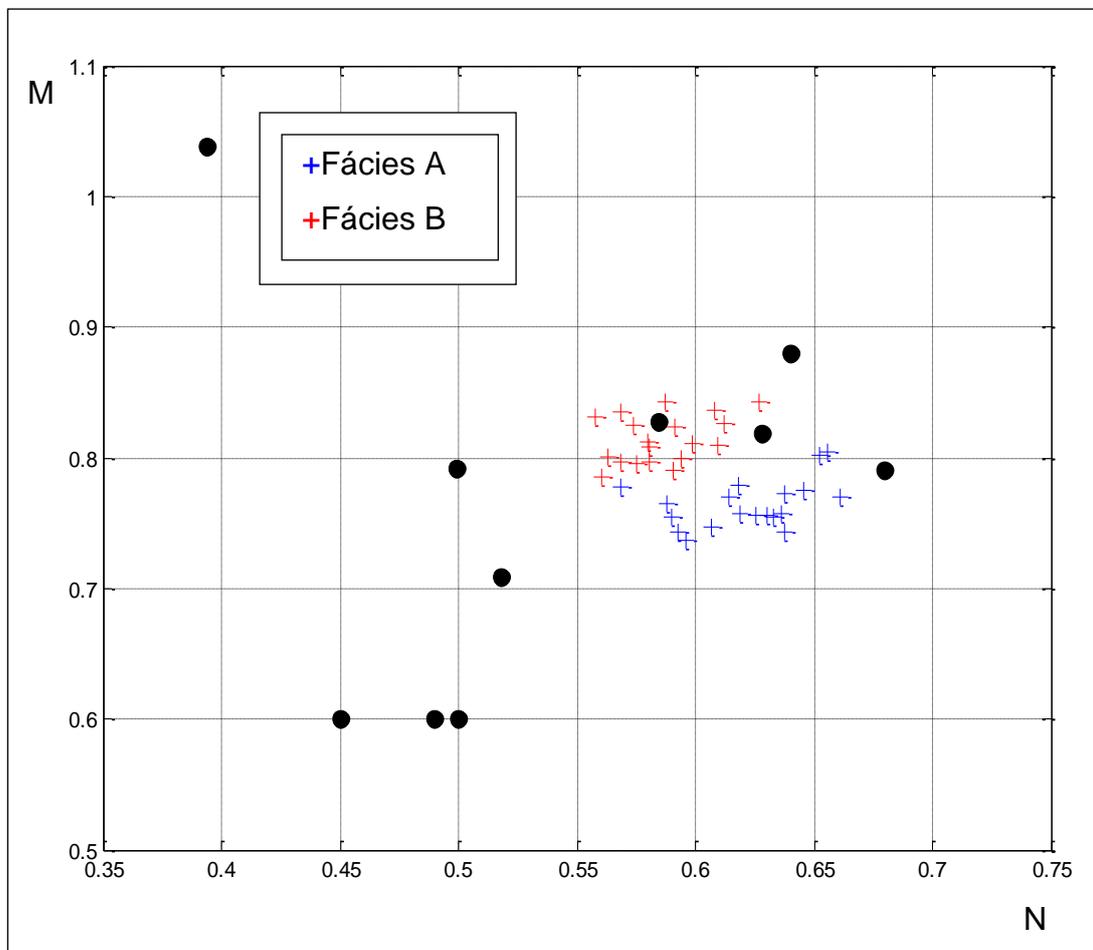


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29 é apresentado o Gráfico M-N para o Poço, considerando a forma convencional de apresentação do Gráfico M-N contendo os dez pontos fixos de minerais, mostrados como círculos pretos, as cruzes em vermelhas e azuis

representam os pares M e N do Poço para as Fácies A e B respectivamente, mostrando uma mistura entre as duas fácies.

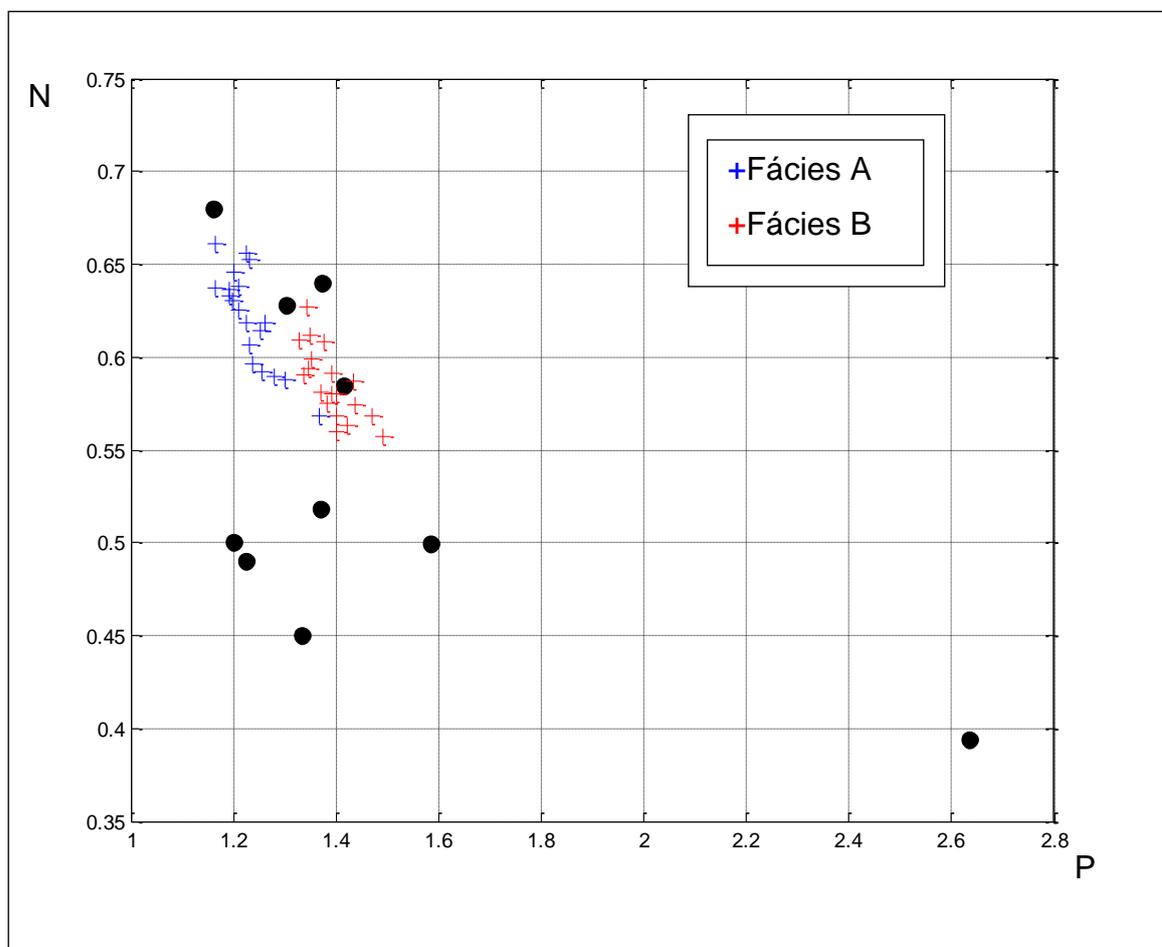
Figura 29- Dados sintéticos, identificação de fácies no Gráfico M-N para o Poço I.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 30 é apresentado o Gráfico N-P para o Poço, considerando a forma convencional de apresentação do Gráfico N-P contendo os dez pontos fixos de minerais, mostrados como círculos pretos, as cruzes em vermelhas e azuis representam os pares N e P do Poço para as Fácies A e B respectivamente, mostrando uma boa separação entre as duas fácies em relação do gráfico M-N.

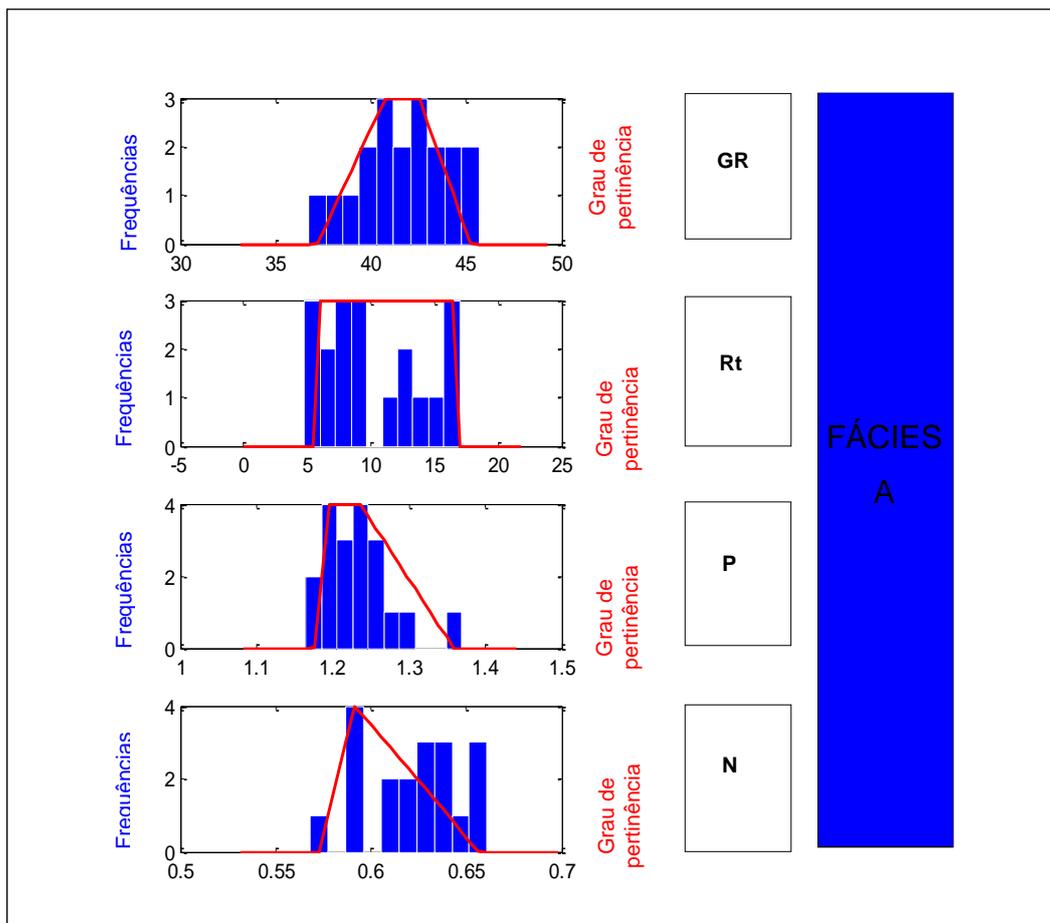
Figura 30- Dados sintéticos, identificação de fácies no Gráfico N-P para o Poço I.



Fonte: Elaborado pelo autor.

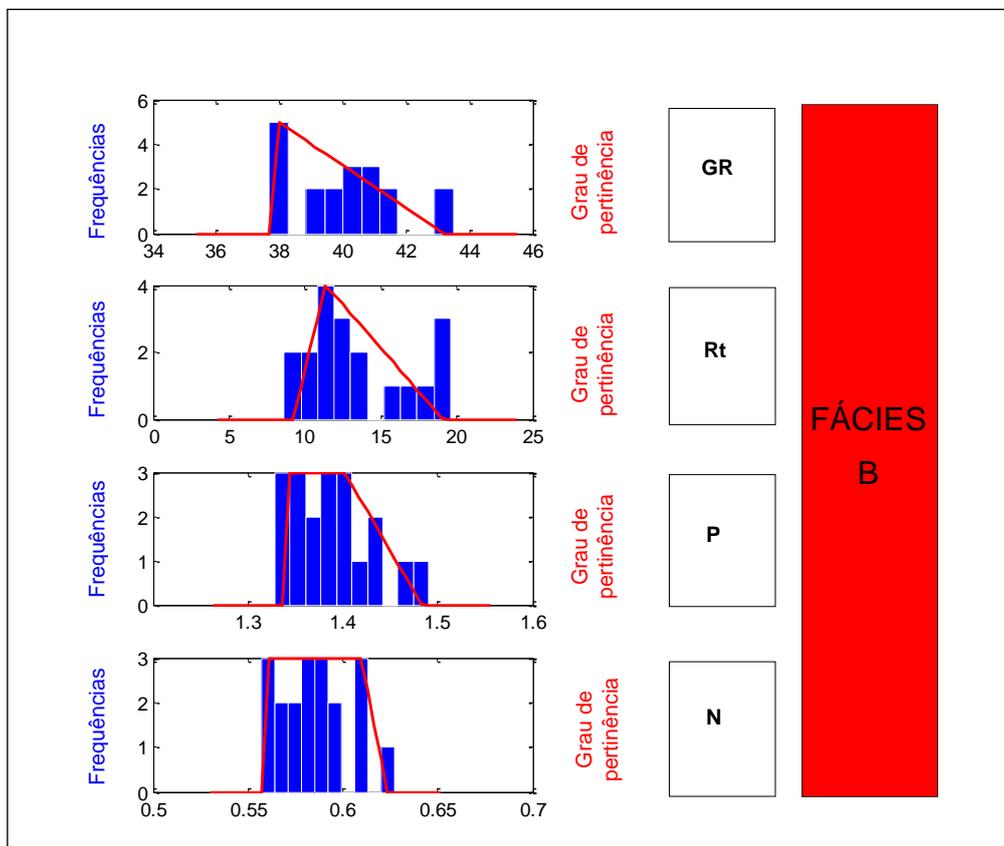
As figuras 31 e 32 Mostram os histogramas criados a partir dos dados do perfil de raios gama natural (GR), do perfil de resistividade (Rt) e dos parâmetros P e N do poço I para cada camada atravessada. Os histogramas estão representados por as barras azuis e é medida em frequências, as funções de pertinência são construídas a partir dos histogramas e estão representadas por as linhas vermelhas em forma de polígono para a fácies A e B respectivamente a escala de medição para as funções de pertinência será obtida dos dados dos perfis para os que existem uma função de pertinência única para cada tipo de perfis.

Figura 31- Criação das funções de pertinência referentes a poço I para a fácies A, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR) e resistividade (Rt) respectivamente, e os parâmetros P e N.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32- Criação das funções de pertinência referentes ao poço I para a fácies B, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.

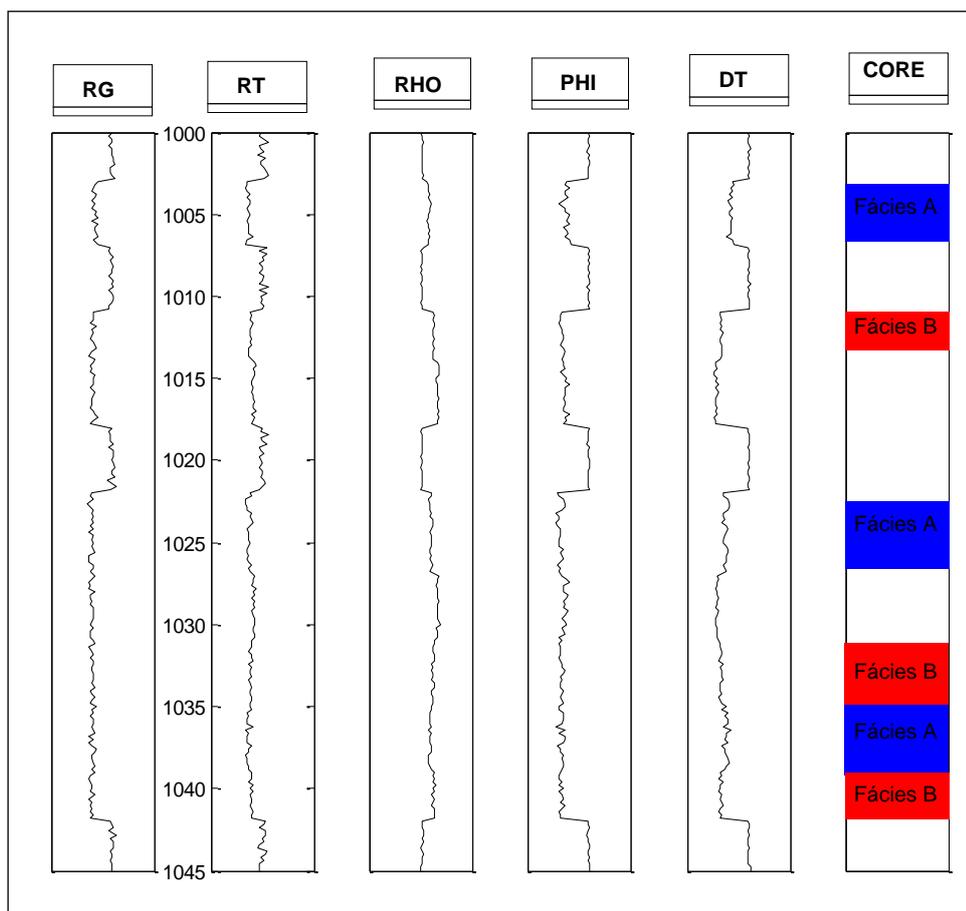


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar a capacidade operacional do algoritmo baseado em lógica Fuzzy, apresenta-se neste trabalho a construção de um segundo conjunto de perfis, a partir do modelo petrofísico, para representar um novo poço (poço teste), denominado como Poço II. Para a realização do modelamento dispõe-se da informação sobre as fácies; a partir da descrição do testemunho e que não será utilizada no processamento da lógica Fuzzy.

A Figura 33 mostra os perfis registrados no Poço II. Na primeira trilha é apresentado o perfil de raio gama natural que será tomado como referência das fácies de interesse. Na trilha 2 é apresentado o perfil de resistividade, Nas trilhas 3, 4, 5, são apresentados os perfis de porosidade (densidade, porosidade neutrônica e sônica). Na trilha 6 é apresentada a descrição do testemunho deste intervalo do poço.

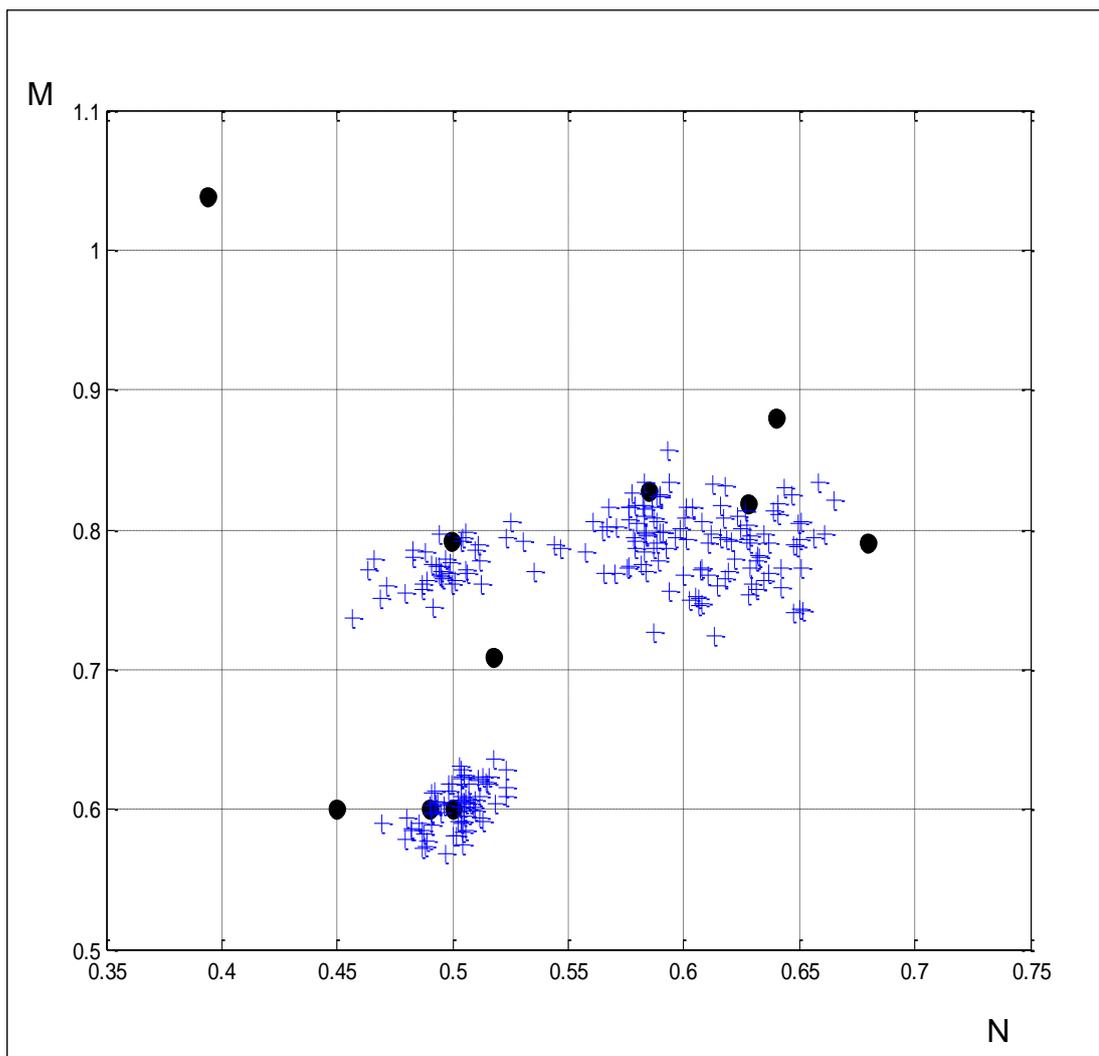
Figura 33- Dados Sintéticos, Camadas representativas das fácies de interesse do Poço II (Poço de teste).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 mostra o Gráfico M-N com todos os pontos do Poço II representados por cruzeiros azuis. Os pontos fixos do Gráfico M-N padrão são representados pelos círculos pretos. Observa-se a dificuldade para a interpretação visual da Figura 34 com a impossibilidade de identificação das camadas de interesse.

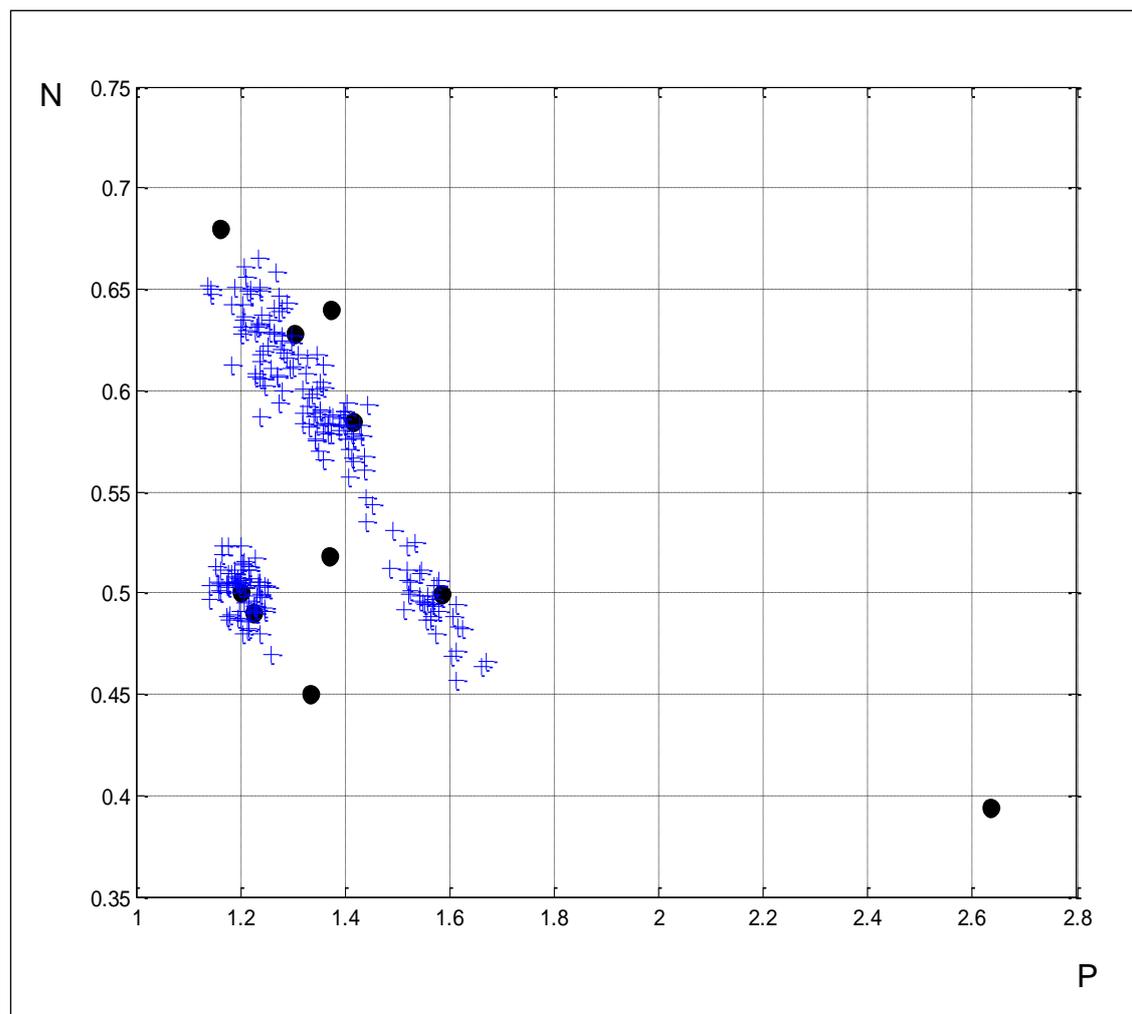
Figura 34- Gráfico M-N modificado para o Poço II.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 35 mostra o Gráfico N-P com todos os pontos do Poço II representados por cruzes azuis. Os pontos fixos do Gráfico N-P padrão são representados pelos círculos pretos. Observa-se a dificuldade para a interpretação visual da Figura 35 com a impossibilidade de identificação da camada de interesse.

Figura 35- Gráfico N-P modificado para o Poço II.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A aplicação das seguintes regras Fuzzy que são realizadas neste exemplo para os dados de diferentes perfis como é o perfil de raio gama, o perfil de resistividade e os parâmetros P e N, μ está representada como os dados de saída fuzzificados para as regras fuzzy, avaliados nas funções de pertinência, μ os subsíndices indicam os perfis correspondentes para todos os dados e o sobre índices as fácies de interesse.

Fácies A

$$f_A = \min \left\{ \mu_{RG}^A, \mu_{Rt}^A, \mu_K^A, \mu_N^A \right\} \quad (27)$$

Fácies B

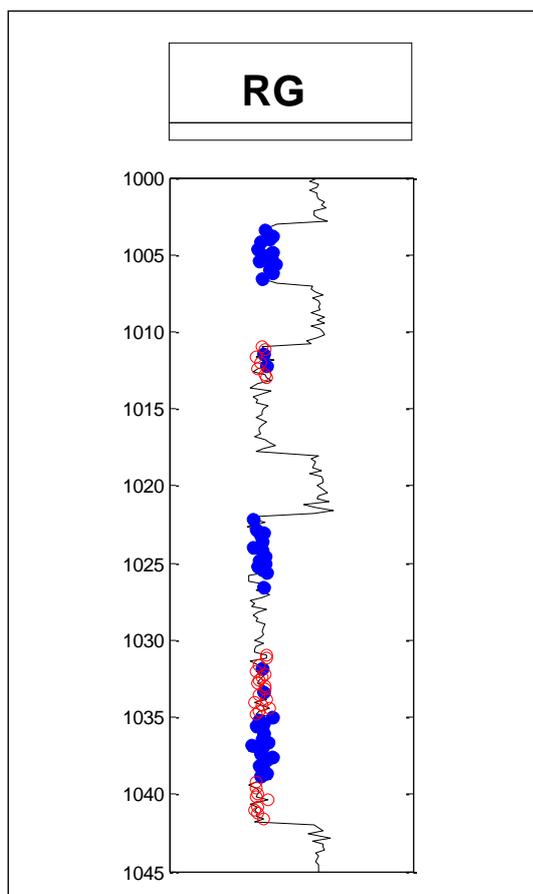
$$f_B = \min \left\{ \mu_{RG}^B, \mu_{Rt}^B, \mu_K^B, \mu_N^B \right\} \quad (28)$$

A figura 36 mostra a identificação das fácies de interesse realizada pelo sistema de inferência Fuzzy. A decisão sobre a qual fácies pertence cada ponto do poço II não testemunhado é produzida pela avaliação da seguinte expressão, como mostrado na equação 27 e 28,

$$F(x) = \max \{f_A, f_B\}, \quad (29)$$

Observe que nos intervalos de profundidades de 1010 a 1015 de 1030 a 1035, alguns pontos das fácies B foram identificados incorretamente. Estes pontos são convenientemente corrigidos com a aplicação do filtro Fuzzy de coerência em profundidade.

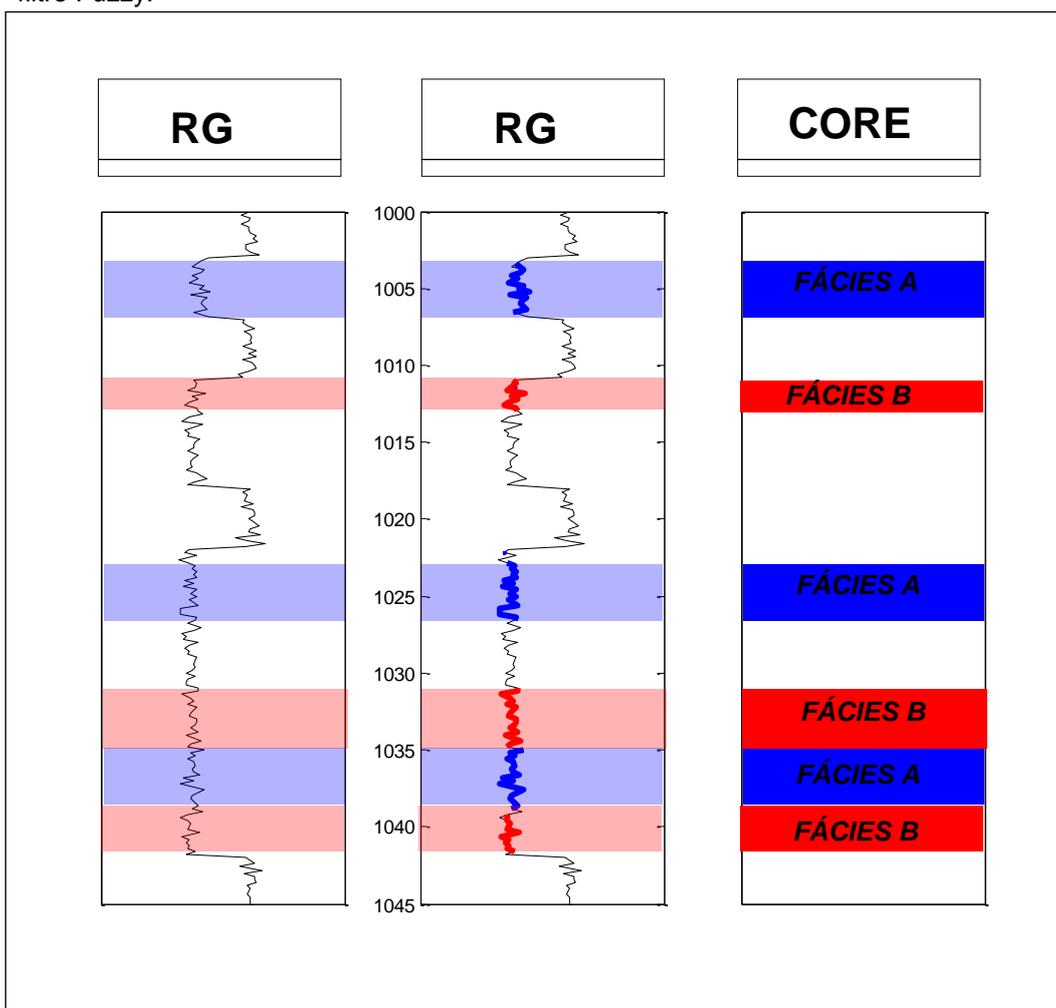
Figura 36-Mostra a identificação das fácies de interesse realizado pelo sistema de inferência Fuzzy.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 37 mostra o resultado final da associação do sistema de inferência Fuzzy ao filtro Fuzzy de coerência em profundidade. Observe que os pontos incorretamente identificados foram corrigidos, no entanto as fácies foram identificadas mostrando na primeira trilha o perfil de raio gama que foi usada como referência em relação a seus valores de profundidade, na segunda trilha o perfil de raio gama natural com as fácies identificadas sobre o perfil, e na terceira trilha o testemunho com as repetitivas fácies do poço II sintético.

Figura 37- Mostra o resultado final da associação do sistema de inferência Fuzzy ao filtro Fuzzy.



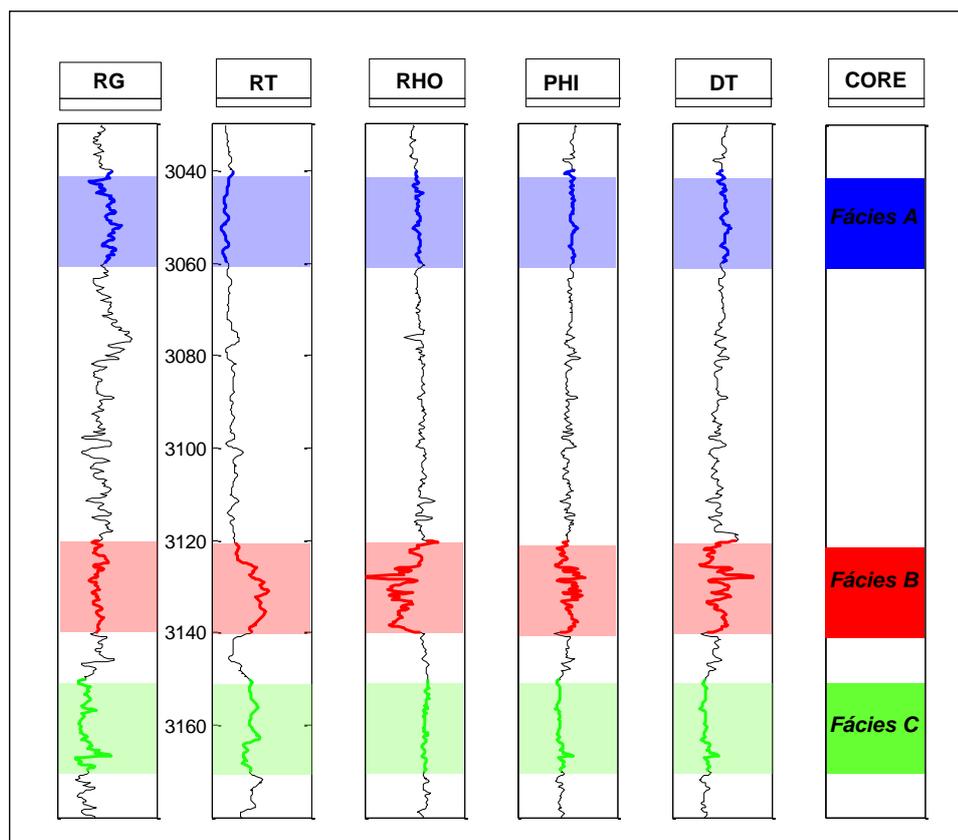
Fonte: Elaborado pelo autor.

8.2 Dados reais.

O comportamento do algoritmo baseado na lógica Fuzzy para a identificação de fácies é o resultado do zoneamento do poço, que depende da identificação de diferentes fatores que influem na formação do poço como é a litologia, a espessura das camadas e a disposição das camadas ao longo da trajetória do poço.

A aplicação desta metodologia com dados reais é mais complexa do que a aplicação com dados sintéticos, devido a que não satisfaz o modelo petrofísico adotado pela geofísica de poço. Assim, para a utilização do algoritmo Fuzzy é necessário a utilização da informação geológica presentes em dois poços testemunhados no campo do Namorado, na bacia de Campos. Os dados dos dois poços utilizados foram o NA04 e o NA11A.

Figura 38- São mostrados, respectivamente, os perfis de raio gama natural, resistividade, densidade porosidade neutrônica e sônico, nas trilhas de 1 a 5. A sexta trilha representa o testemunho descrito do poço para três fácies que são representadas com as cores de azuis, vermelho e verde para as fácies A, B e C respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A descrição geológica das fácies da figura 38 é mostrada na tabela 4, que manifesta a legenda de cores adotada pelo algoritmo para o poço NA11A como pode ser visto abaixo.

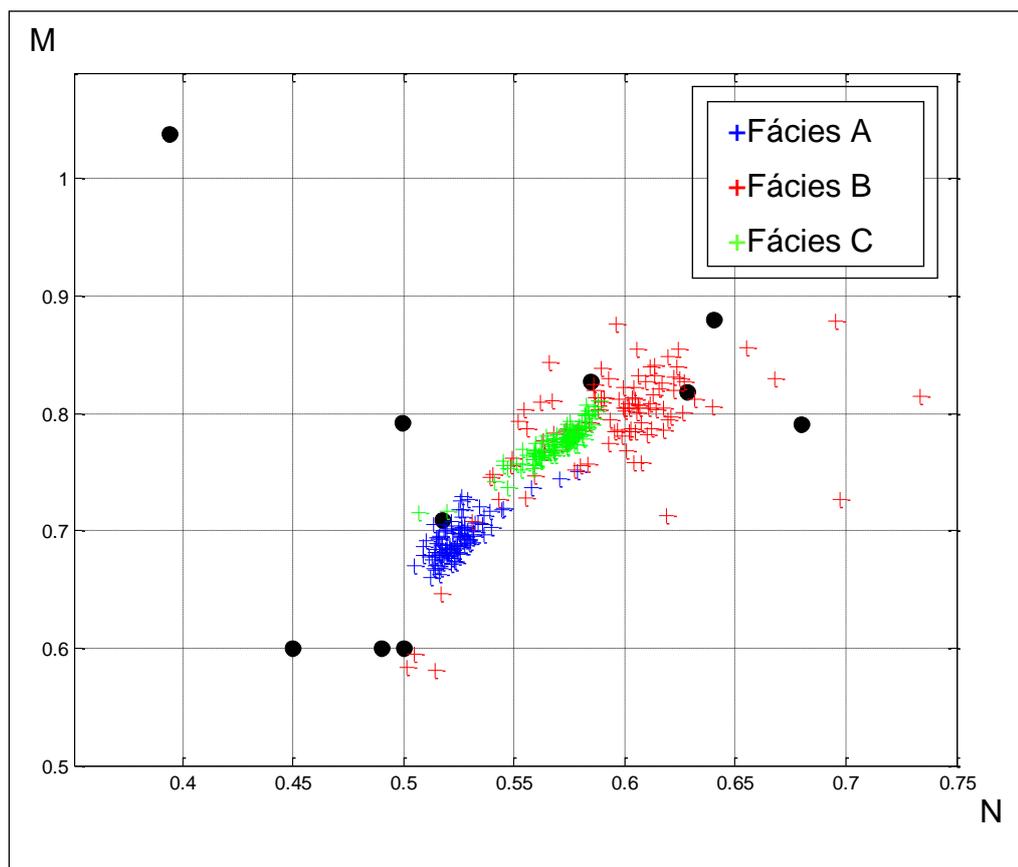
Tabela4- Descrição geológica das fácies da figura 38.

<i>Fácies</i>	<i>Descrição da litologia</i>
A	<p style="text-align: center;">ARENITO FOLHELHO / FINAMENTE INTERESTRATIFICADO</p> <p>Camadas de areia fina, Laminação plana paralelo nos seis mais espessos e que grado para arenito fino / muito finos com ripples às vezes com clibing e estes para siltito e folhelho.</p>
B	<p style="text-align: center;">ARENITO MÉDIO GRADADO</p> <p>(Composição arcoseana bem selecionado, aspecto maciço, gradação às vezes incipiente ou do tipo cauda grossa).</p>
C	<p style="text-align: center;">INTERLAMINADO LAMOSO DEFORMADO/ RÍTMICO</p> <p>(Camadas de até um metro com intercalações de calcilutito, marga e folhelho. Feições de deformação (escorregamento) / Intercalações rítmicas de calcilutito, marga e folhelho em camadas de até 1m de espessura, ricas em planctônicos).</p>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 39 é apresentado o Gráfico M-N para o Poço III, considerando a forma convencional de apresentação do Gráfico M-N contendo os pontos fixos de minerais, mostrados como círculos pretos, as cruces em vermelhas e azuis e verdes representam os pares M e N do Poço III para as Fácies A, Fácies B e C respectivamente.

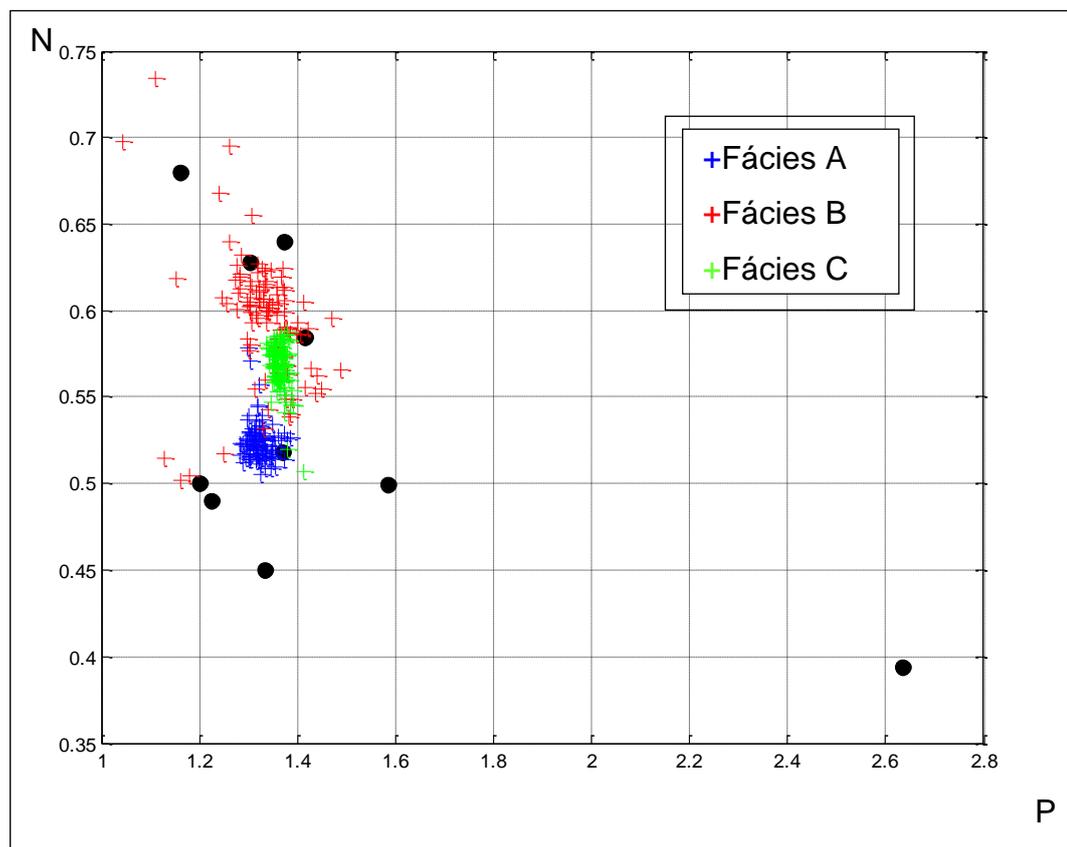
Figura 39- Dados reais, identificação de fácies no Gráfico M-N para o Poço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 40 é apresentado o Gráfico N-P para o Poço III, considerando a forma convencional de apresentação do Gráfico N-P contendo os pontos fixos de minerais, mostrados como círculos pretos, as cruzes em azuis, vermelhas e verdes representam os pares N e P do Poço para as Fácies A, Fácies B e C respectivamente.

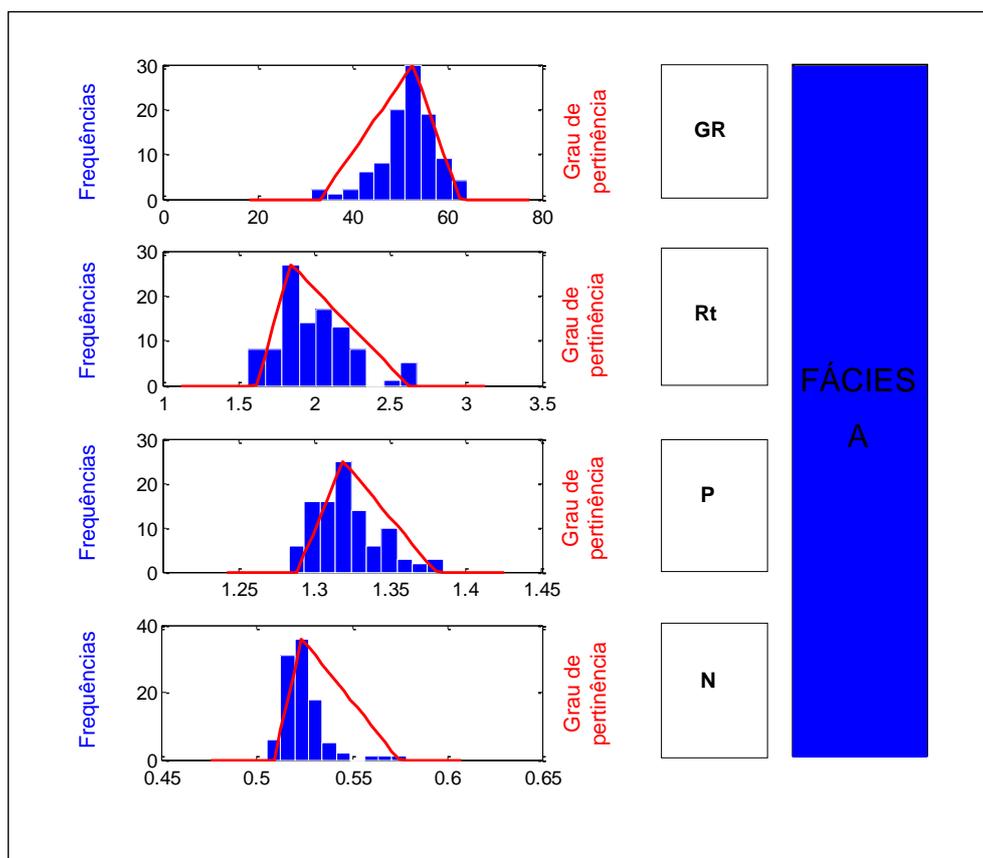
Figura 40- Dados Reais, identificação de fácies no Gráfico N-P para o Poço III.



Fonte: Elaborado pelo autor.

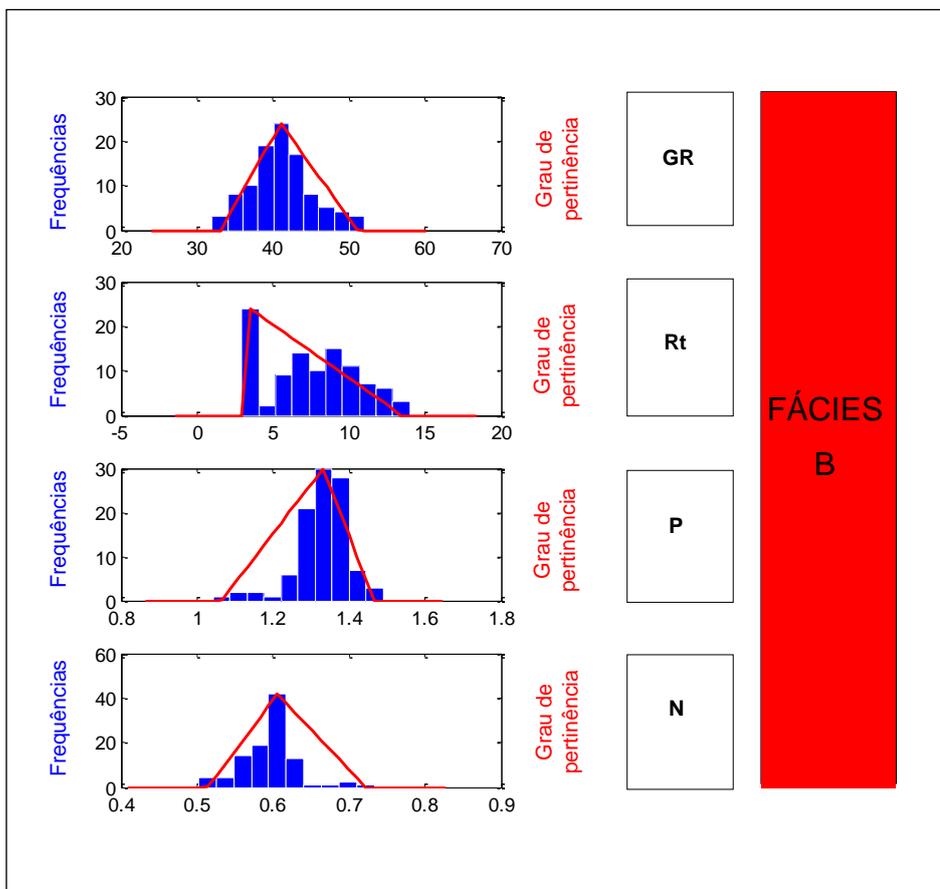
As figuras 41,42 e 43 Mostram os histogramas criados a partir dos dados do perfil de raios gama natural (GR), do perfil de resistividade (Rt) e dos parâmetros K e N do poço III para cada camada atravessada. Os histogramas estão representados por as barras azuis e, as funções de pertinência são construídas a partir dos histogramas e estão representadas por as linhas vermelhas em forma de polígono para a fácies A, B e C respectivamente a escala de medição para as funções de pertinência será obtida dos dados dos perfis para os que existe uma função de pertinência única para cada tipo de perfil.

Figura 41- Criação das funções de pertinência referentes ao poço III para a fácies A, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.



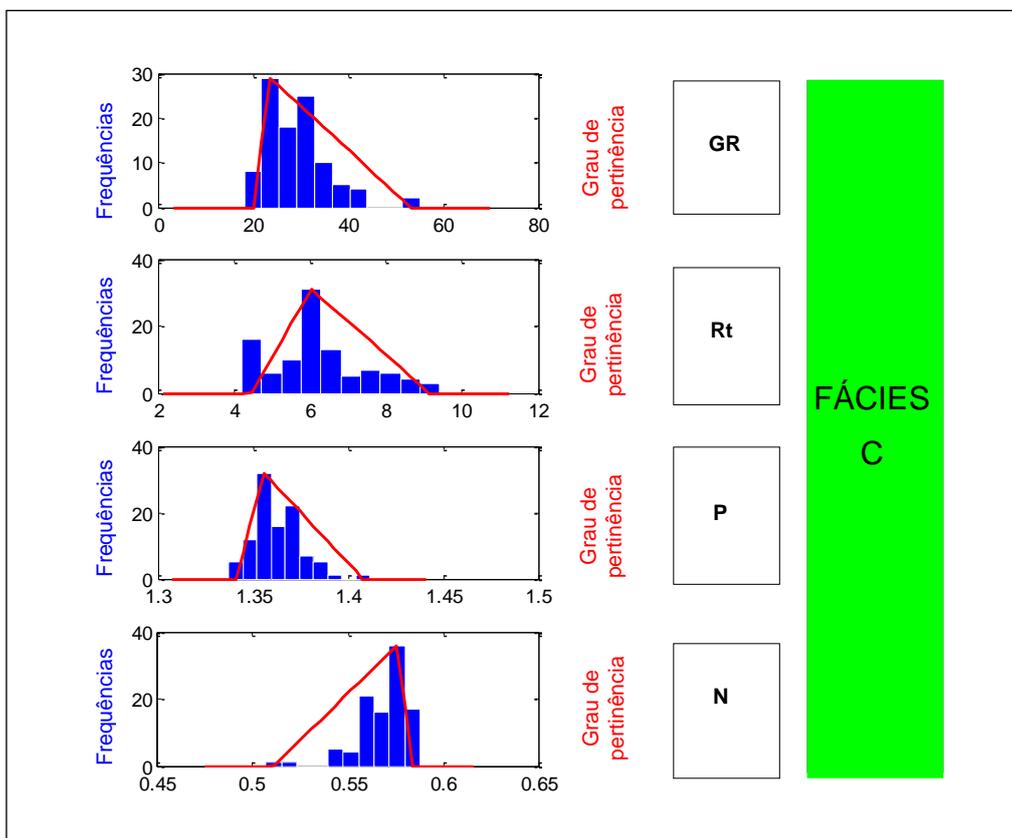
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42- Criação das funções de pertinência referentes ao poço III para a fácies B, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.



Fonte: Elaborado pelo autor

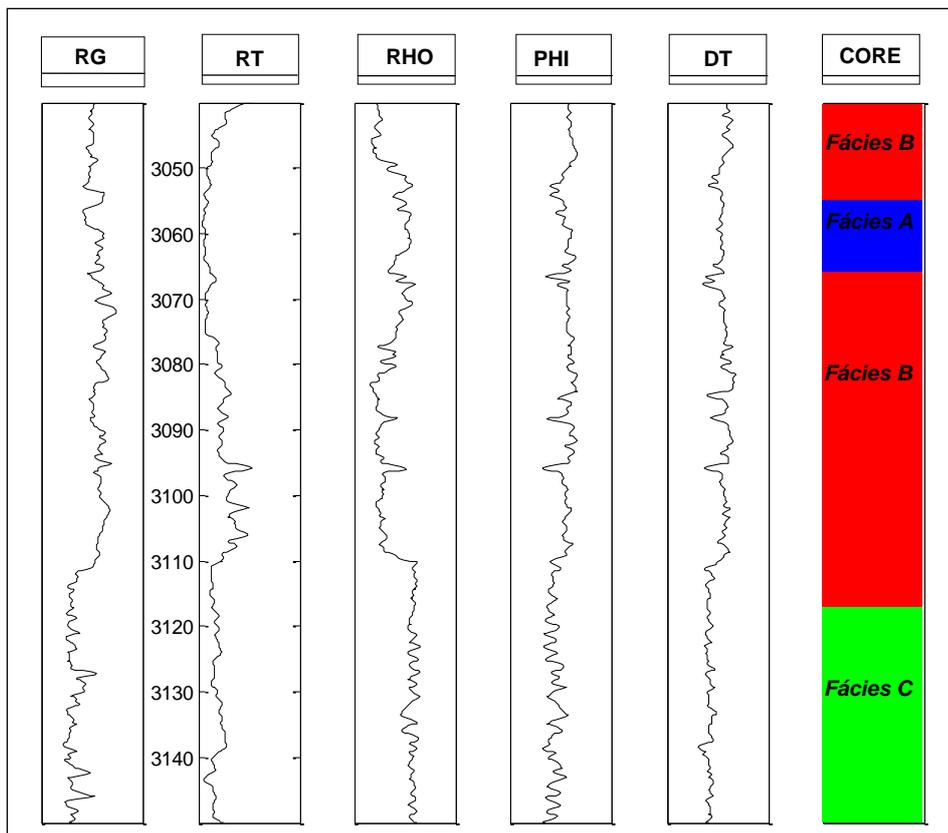
Figura 43- Criação das funções de pertinência referentes ao poço III para a fácies C, a partir dos dados do perfil de raio gama (GR), de resistividade (Rt) e os parâmetros P e N.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 44 mostra os perfis e a descrição de testemunho do segundo poço, que será tomado como poço de teste (Poço IV). Na primeira trilha é apresentado o perfil de raio gama natural que será tomado como referência das fácies de interesse. Nas trilhas 2, 3, 4 e 5, são apresentados o perfil de resistividade, os perfis de porosidade (densidade, porosidade neutrônica e sônico). Na trilha 6 é apresentada a descrição do testemunho deste intervalo do poço. Foi selecionado um intervalo onde figuram as três fácies de interesse como observado na trilha 6 onde aparecem intervalos de ocorrência destas fácies.

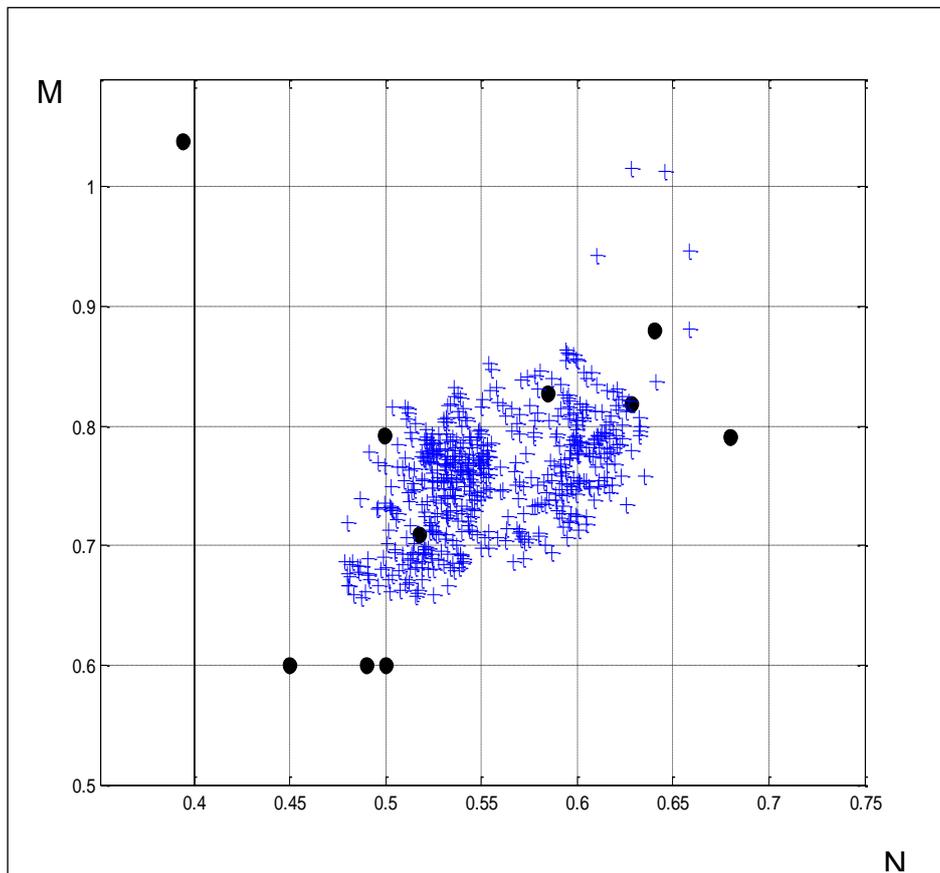
Figura 44- Conjunto de perfis para o Poço IV de teste, Dados reais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 45 apresenta o Gráfico M-N para o Poço IV. Os círculos em preto representam os pontos fixos minerais e as cruzes em azuis os pontos do poço, calculados a partir dos perfis de porosidade, como mostrados na figura anterior. A interpretação visual deste Gráfico M-N, não é coerente com a descrição de testemunho mostrado na Figura 44 e Na tabla 4. Neste caso, a utilização do Gráfico M-N se mostra não realista, com a utilização da informação geológica disponível para este campo obtida a partir da descrição de testemunho do poço IV. Neste caso, fazemos a utilização de um segundo gráfico, o gráfico N-P figura 46 para realizar uma melhor codificação dos dados a ser ingressados no sistema de inferência Fuzzy.

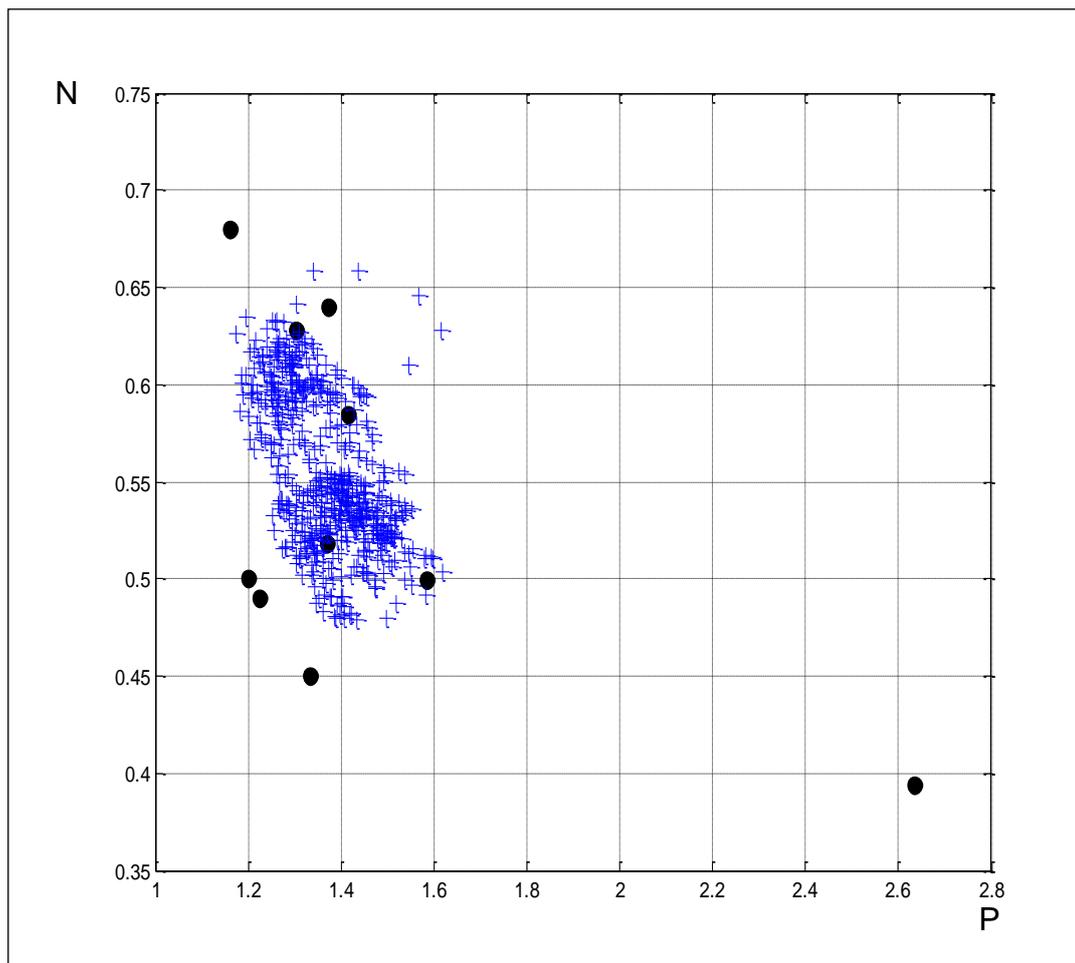
Figura 45-Gráfica M-N modificado para o poço IV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 46 mostra o Gráfico N-P com todos os pontos do Poço IV representados por cruces azuis. Os pontos fixos do Gráfico N-P padrão são representados pelos círculos pretos. Observa-se a dificuldade para a interpretação visual da Figura 45 com a impossibilidade de identificação da camada de interesse.

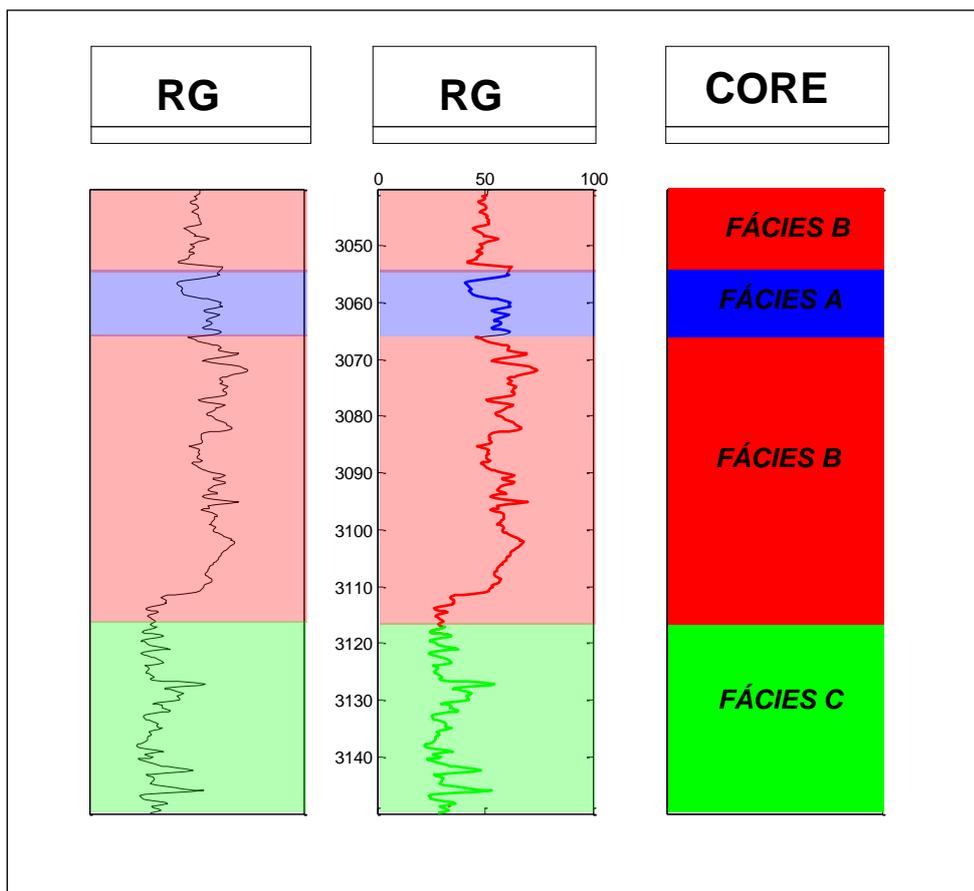
Figura 46- Gráfico N-P modificado para o poço IV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 47 mostra o resultado final do processamento realizado pelo algoritmo de baseado em logica Fuzzy com a produção do zoneamento do intervalo do poço IV. Usando a equação 27, 28 e 29 para o tratamento de dados. A primeira trilha mostra o perfil de raio gama natural original que, é tomado como o perfil de referência. A segunda trilha mostra o perfil de raio gama natural, com a sobreposição da linha na cor verde para os limites da trajetória do poço ocupada pela camada selante. A sobreposição do perfil de raio gama natural pela linha na cor azul e vermelha mostra a localização da camada reservatório. A terceira trilha reproduz a descrição de testemunho mostrada na Figura 47 e utilizada para a validação do zoneamento produzido pelo algoritmo de logica Fuzzy, para esta figura também foi aplicado o filtro Fuzzy obtivendo uma identificação de fácies corretas para a fácies A, B e C.

Figura 47-Mostra o resultado final da associação do sistema de inferência Fuzzy ao filtro Fuzzy para os dados reais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

9 CONCLUSÃO

A identificação de fácies litológicas em poços não testemunhados é o principal objetivo deste trabalho sendo a identificação de fácies uma tarefa muito complexa. As informações obtidas das fácies são usadas na indústria petrolífera e em estudos de sedimentologia. Neste trabalho se apresentou, uma avaliação de informação para poços sintéticos e reais testemunhados tendo em conta as condições geológicas da área onde se encontra o poço. Os dados obtidos em poços testemunhados foram usados para criar e codificar o sistema de inferência fuzzy e assim obter uma identificação de fácies em poços não testemunhados que se encontra em cenários geológicos similares. Isto foi feito transportando os dados dos poços testemunhados para os não testemunhados por meio de um algoritmo comparativo, que usa lógica Fuzzy para realizar a qualificação das fácies correspondente a distintas profundezas do poço não testemunhado nos perfis geofísicos.

A metodologia aqui apresentada descreve como foi possível a utilização de um algoritmo baseado na lógica Fuzzy para a identificação de fácies em poços não testemunhados, usando perfis distintos como dados de entrada para o algoritmo. Também é utilizada uma serie de métodos para realizar a identificação da litologia como e o gráfico M-N com seus pontos fixos calculados a partir dos modelos petrofísico, e os diferentes pontos no gráfico obtidos a partir dos perfis de porosidade que representam pares ordenados identificados como distintas fácies. O gráfico M-N apresentou dificuldade em sua interpretação visual, sendo difícil diferenciar as distintas fácies devido a que os dados não tinham uma boa distribuição no plano do gráfico M-N, razão pela qual foi usado um segundo gráfico chamado gráfico N-P. O gráfico N-P é formado por uma série de pontos fixos obtidos a partir do modelo petrofísico na equação de N e de P, e os pontos que representam as distintas fácies obtidas dos perfis de porosidade. Neste gráfico pudemos observar uma melhor distribuição dos pontos representastes das fácies para o melhoramento da codificação das medidas dos perfis de porosidade, podendo assim fazer uma melhor construção das funções de pertinência para distintos parâmetros de entrada através de histogramas, tendo regras Fuzzy adequadas, e completando assim o algoritmo para ser aplicado no poço não testemunhado. Este algoritmo foi usado tanto no dado real quanto no dado sintético, obtendo a identificação de diferentes fácies em um perfil de raios gama

como referência segundo a profundidade, depois de realizada a defuzzificação do algoritmo também foram identificados alguns pontos errôneos nas fácies no perfil de raio gama pelo qual foi necessária a construção de um filtro Fuzzy e a realização de uma associação com o sistema de inferência Fuzzy para fazer a correção dos pontos errôneos, com isso, foi possível fazer a identificação das fácies de um poço não testemunhado tanto para o dado real quanto para o dado sintético, dando uma solução validada de forma satisfatória a este problema e mostrando a viabilidade da codificação e transporte da informação geológica. Foi possível fazer a identificação de fácies utilizando por primeira vez, o perfil de resistividade e o parâmetro P para a construção do sistema de inferência.

REFERENCIAS.

ALFORD, J.; BLYTH, M. Perfilaje sónico durante la perforación respuestas de corte. **Oilfield Review Primavera**, Schlumberger. Houston, Texas, EU. de 2012:24, n.1, 2012. Disponível em: <http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish12/spr12/01_sonic.pdf>. Acesso em 2015

ARCHE, A. Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria. In: **Consejo superior de investigación científicas**. 1. ed. Madrid, España 2010. p. 23-25.

ARCHIE, G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. **Trans. Am. Inst. Min. Metal. Pet. Eng. Inc.**, v.146, p. 54-62, 1942.

AURRAND-LIONSJ.P.; FOURNIERL.; JARRIP.; ET AL. Application of fuzzy control for ISIS vehicule braking. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL FUZZY SYSTEMS ASSOCIATION IFSA'91, 4. 1991, Bruselas. **Proceedings**. Bruselas:IFSA,1991.

BARBOZA, E.G. **Universidade Federal Rio Grande do Sul**:análise estratigráfica do campo de namorado (bacia de campos) com base na interpretação sísmica tridimensional. 2005. 235 f. Tese (Doutorado em Geociências)-Universidade Federal Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Geociência área de Estratigrafia, Rio Grande do Sul, 2005.

BEASLEY, J.C.; CARL, F.J.; BIZE, E.; BOYD, A.; FRYDMAN, M.; ZERILLI, A.; DRIBUS, J.R.; MOREIRA, J.L.P.; CAPELEIRO, P.A.C. El Play Presalino de Brasil. **Oilfield Review**, Schlumberger, v. 22, p. 28-39.2010.

KUMAR, B; KISHORE, M.Electrofacies classification – a critical approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE & EXPOSITION ON PETROLEUM GEOPHYSICS “Kolkata 2006”, 6th,2006,New Delhi, India. New Delhi, India: 2006. p. 822-825.

BROWN, L.F.; FISCHER, W.L. Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: exemples from Brazilian rift and pull-apart basins. In: PAYTON, C.E (ed.). **Seismic stratigraphy-** applications to hydrocarbon exploration.The American Association of Petroleum Geologist Memoir, 26, p. 213-248.1977.

BURKE, J.A.; CAMPBELL JR, R.L.; SCHIMIDT, A.W.The Litho-porosity cross plot a method of determining rock characteristics for computation of log data. In:SPE ILLINOIS BASIN REGIONAL MEETING, 1969, Evansville, Indiana. Evansville, Indiana, 1969.p.187-198.

BURROUGH, P.A.; MCDONELL,R.A.**Principles of geographical information systems**. Oxford, UK: Oxford University Press, 1998. 333p.

CHEVRON BRASIL LTDA. **Atividade de produção de petróleo no campo de Frade, Bacia de Campos IN**: estudo de impacto ambiental– EIA. [S. l.: s. n.], 2006

ECONOMIABR. O pré-sal e o etanol são nossos. Disponível em: <http://www.economiabr.com.br/Eco/Eco_pre-sal.htm>. Acesso em: 2015.

ELLIS, D.V; SINGER, J.M. **Singer well logging for earth scientists**. 2. ed. New York, USA: Springer, 2008.p. 644 – 648

GIRÃO, G. N. **Notações de sala de aula**. 2004. Disponível em: <<http://geraldogirao.com/index.htm>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

GONZÁLEZ, M.C. Lógica Difusa una introducción práctica. Técnicas de softcomputing. Blender Foundation Certified Trainer. **Notações de sala de aula**. Disponível em: http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf. Acesso em: 2011.

JANG, R.; SUN, C. Y MITSUTANI, E. **Neuro-fuzzy and soft computing, a computational approach to learning and machine intelligence**. Nueva Jersey, USA: Prentice Hall,1997.

LUTHI, S. M. **Geological well logs** – their use in reservoir modeling. Springer. 2001. 340 p.

MENEZES, S.X. ADAMS, T. Ocorrências de resistividades anômalas no Campo de Namorado, Bacia de Campos. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**. v.4, p. 183-188,1990.

MIRANDA, P.; BARBOSA, M.; KRONBAUER,D. **Universidade Federal de Mato Grosso do Sul**: Sistema de Controle Difuso de Mamdani Aplicações: Pêndulo Invertido e outras. 2003. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Análise de sistemas) -Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Departamento de Computação e Estatística Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Mato Grosso do Sul, 200

RANGEL, H.D. ; MARTINS, C.C. Principais compartimentos exploratórios, Bacia de Campos. In: **Searching for Oil and Gas in the Land of Giants**. (ed.) Rio de Janeiro. Schlumberger p.32-40. 1998.

SAGGAF, M. M.; NEBRIJA, E. L. A Fuzzy logic approach for the estimation of facies from wire-line logs. S.l: **AAPG Bulletin**, v.87, n.7, p. 1223-1240. 2003.

SELLEY,R.C.**An introduction to sedimentology**. London,UK: Academic Press, 1976.

SERRA, O. AND ABBOTT, H. T. The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphic. In: ANNUAL FALL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION,55th 1980,Dallas, Texas. Dallas, Texas,1980.19p.

SOUZA JR.; O.G. **Université Paris**: Stratigraphie séquentielle et modelisation probabiliste de reservoirs dún Cone Sous-marin. Profond (Champ de Namorado,

Brésil) – Intégration des Données Géologiques et Geophysiques. 1997. 215 f. Thèse (Douctorat) - **Université Paris**, Paris, 1997.

WEBER, L; KLEIN, P. A. T. **Aplicação da lógica fuzzy em software e hardware**. Canoas: Ed.ULBRA, 2003.

WENTWORTH, C. K. A Scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, v. 30. p. 377–392.1922.

WYLLIE, M.R.J.; GREGORY, A.R.; GARDNER, L.W. Elastic waves velocities in heterogeneous and porous media. **Geophysics**, v.21 n.1, 41–70. 1956.

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex system. **IEEE Transaction on System Man and Cybernetics**, v.1, p. 28– 44, 1965.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning. part i, ii, iii. In: _____. **Learning systems and intelligent robots information science**. California, USA: Springer US, 1974.p.8-9:199–249, 301–357, 43–80.

ZIMMERMANN, H.J. **Fuzzy sets, decision making, and expert sytems**. Boston, USA: Kluwer Academic publishers. 1987. 335p.