

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais (PPGEM)

**ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE CARVÃO A PARTIR DE PERFILAGEM GEOFÍSICA E SEU USO NO
PLANEJAMENTO DE LAVRA A CURTO PRAZO**

George Olufunmilayo Gasper

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais-PPGEM

**ESTIMATIVA DE QUALIDADE DE CARVÃO A PARTIR DE PERFILAGEM GEOFÍSICA E SEU USO NO
PLANEJAMENTO DE LAVRA A CURTO PRAZO**

George Olufunmilayo Gasper

Dissertação realizado no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre
2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para Obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Vlândia Cristina de Souza

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa, pela orientação na elaboração desse trabalho, pela disposição, pelo estímulo, toda paciência que teve comigo desde início de curso, oportunidade de crescimento profissional e principalmente pelo seu interesse no meu crescimento e todos nós do LPM.

Ao Profa. Dra. Vlória Cristina de Souza, pela ajuda, as valiosas contribuições para a imensa evolução e crescimento deste trabalho. Por toda paciência que teve comigo.

Ao Prof. Paulo Salvadorette, pelas contribuições de conhecimento para o trabalho.

A todos os amigos e colegas do LPM, especialmente Anuar Bergamaschi Pires, pela ajuda e amizade. Ao Ricardo Hundelshausen, Ricardo Rodrigues da Silva, Ricardo Andre Vincenzi e Breno Gorelik.

À secretária do PPGEM, Beatriz Maria Ferraz, pela toda atenção e rapidez sempre a resolver todos meus assuntos administrativos desde início do curso.

A empresa Copelmi Mineração, principalmente Engenheiro Vitor Luconi Rosenhaim e Geólogo Gustavo Bastiani, pelo apoio em campo e disponibilização de importantes informações.

À minha esposa e minha filha, Roseane do Santos Dames Gasper e Georgia Olufemi Mayokun Dames Gasper, pela força e apoio infinito. Sem vocês, eu não tenho razão para viver.

Aos meus Pais, Dr. Paul Messan Gasper e Mrs. Ibilola Olufemi Gasper, pelo apoio infinito desde meu nascimento. Qualquer hora; sei que posso contar com vocês. Sem vocês; eu não estou sendo quem eu sou hoje.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo auxílio financeiro.

À **DEUS**, pelo tudo e a vida.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	x
Resumo	xi
Abstract.....	xii
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Perfílame Geofísica no Carvão	2
1.2 Objetivos dessa Dissertação	4
1.3 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Etapas.....	5
1.5 Organização dessa Dissertação	6
CAPÍTULO 2	7
FUNDAMENTOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA APLICADA A DEPÓSITOS DE CARVÃO.....	7
2.1 Conceitos Básicos.....	8
2.1.1 Volume de Investigaço	8
2.1.2 Profundidade de Investigaço	9
2.1.3 Resoluço Vertical.....	9
2.1.4 Efeito de Poço	10
2.2 Perfilame Elétrica	11
2.2.1 Resistência e Resistividade	11
2.2.2 Influência da Litologia	12
2.2.3 Princípio de Funcioname das Sondas de Resistividade	14
2.2.3.1 Sonda de Resistividade Pontual	14
2.2.3.2 Sonda de Resistividade com Focalizadores.....	15
2.3 Perfilame Nuclear.....	17
2.3.1 Aspectos Fundamentais	17
2.3.1.1 Radioatividade	17
2.3.1.2 Radiação Alfa ou Partícula Alfa	17
2.3.1.3 Radiação Beta ou Partícula Beta	18
2.3.1.4 Radiação Gama	18

2.3.2	Radioatividade nas Rochas.....	18
2.3.3	Removendo os Efeitos Estatísticos	19
2.3.4	Sonda para Medição da Emissão Natural de Raios Gama ou Gama Natural.....	21
2.3.4.1	Princípio de Funcionamento	21
2.3.4.2	Unidades de Medida dos Detectores.....	21
2.4	Respostas Típicas dos Parâmetros Apresentados.....	22
2.5	Uso das Informações de Perfilagem Geofísica.....	22
2.6	Procedimentos de Calibragem, Aferições e de Campo.....	23
2.6.1	Definição do Ponto Inicial (Zero Point)	23
2.6.2	Aferição da Sonda de Resistividade	24
2.6.3	Calibração API para Medições de Radiação Natural de Gama	25
2.6.4	Arquivamento dos Registros	25
2.6.4.1	Arquivamento Digital	25
2.6.4.2	Arquivamento Impresso.....	26
2.7	Análise dos Dados Coletados	26
2.8	Características de Alguns Parâmetros em Carvão	26
2.8.1	Perfil de Resistividade	26
2.8.2	Perfil de Radiação Natural Gama	27
CAPÍTULO 3		28
ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE SONDAGEM COM RECUPERAÇÃO DE TESTEMUNHO, PERFILAGEM GEOFÍSICA E ÁREA DE LAVRA.....		28
3.1	Localização da Área de Estudo.....	28
3.2	Geologia	29
3.2.1	Geomorfologia e Geologia Regional	29
3.2.2	Geologia Local.....	31
3.3	Furos de Sondagem com Recuperação de Testemunhos	35
3.4	Furos de Desmonte	37
3.5	Execução de Perfilagem Geofísica	39
3.5.1	Coleta dos Dados por Perfilagem Geofísica	39
3.5.1.1	Sonda GLOG® - Focused Electric (Guard) Log Sonde	40
3.5.1.2	Registro da Resistividade	41
3.6	Tratamento dos Dados.....	41

3.6.1	Dados de Análise de Recuperação de Testemunhos de Sondagem	41
3.6.1.1	Determinação da Densidade.....	42
3.6.1.2	Determinação do Teor de Cinzas	47
3.6.1.3	Resultados de Análise de Laboratório de Testemunhos de Sondagem.....	49
3.6.2	Tratamento dos Dados obtidos por Perfilagem Geofísica	49
3.6.2.1	Conciliação entre Perfilagem Geofísica e Sondagem.....	50
3.6.2.2	Interpretação de Perfis Geofísicos de Furos de Desmonte	53
3.6.3	Construção de Banco de Dados	54
3.7	Área de Lavra	55
3.7.1	Esquema de Lavra	56
3.7.2	Amostragem em Pilhas de Camadas Lavradas.....	58
CAPÍTULO 4		59
ESTUDO DE CASO		59
4.1	Relação entre os Parâmetros de Qualidade de Carvão e de Perfilagem Geofísica	59
4.2	Equações de Ajuste ou Calibração	60
4.3	Aplicação das Equações nos Furos de Desmonte	62
4.3.1	Camada S.....	63
4.3.2	Camada M1	64
4.3.3	Camada I1	66
4.4	Fator de Diluição	67
4.5	Reconciliação entre Resultados de Análise Laboratorial de Amostras ROM e Perfilagem Geofísica dos Furos de desmonte	68
4.6	Reconciliação entre a Massa Lavrada e Calculada.....	69
CAPÍTULO 5		71
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		71
5.1	Conclusões	71
5.2	Recomendações para os Próximos Trabalhos	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		73
ANEXO A.....		77
ANEXO B.....		79
ANEXO C.....		82

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Uma sonda dentro de um poço	8
Figura 2.2 - Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com o volume de investigação esférico.....	9
Figura 2.3 - Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico.....	10
Figura 2.4 – Efeito de poço que afetam parâmetros medidos pela sonda.....	10
Figura 2.5 – Exemplo do volume (de investigação) para obtenção da resistência.....	11
Figura 2.6 – Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem resistência pontual.....	15
Figura 2.7 - A esquerda é apresentada a distribuição dos eletrodos na sonda e a direita é mostrada o volume de investigação	16
Figura 2.8 - Linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir resistividade com focalizadores	16
Figura 2.9 - Séries radioativas naturais	19
Figura 2.10 - Aleatoriedade das contagens de uma fonte em decaimento radioativo	20
Figura 2.11 – Sumário de respostas de perfilagem geofísica em algumas litologias.....	22
Figura 2.12 – Nivelamento da posição do <i>zero point</i> com o solo ou início do furo (sonda da resistividade)	23
Figura 2.13 – Caixa com valores de resistividade padrão para a calibração de sonda de resistividade.....	24
Figura 2.14 – Caixa com valores de resistividade acoplada à sonda de resistividade	24
Figura 3.1 – Localização de área de estudo (Webber, 2008).....	28
Figura 3.2- Mapa geológico da região do baixo Jacuí com localização da área B3.....	30
Figura 3.3 - Mapa geológico de Área B3 (Webber, 2008).....	32
Figura 3.4- Perfil geológico típico na Área B3.	33
Figura 3.5 - Perfuratriz Sullivan 22 utilizada para fazer os furos de sondagem.....	35
Figura 3.6 - Testemunhos recuperados dentro numa caixa	36
Figura 3.7 - Localização de furo de sondagem com recuperação de testemunhos.....	37
Figura 3.8 - Furo de desmonte e perfuratriz de desmonte respectivamente	37
Figura 3.9 - Localização dos furos de desmonte	39
Figura 3.10 - Sonda GLOG® - <i>Focussed Electric (Guard) Log Sonde</i>	40
Figura 3.11 - Exemplo do perfil obtido com a sonda GLOG®	41

Figura 3.12 - Um trecho de uma coluna estratigráfica de um furo de sondagem na Área B3	42
Figura 3.13 - Preparação de um meio denso com Bromofórmio	44
Figura 3.14 - Meio denso sendo despejado na cuba	44
Figura 3.15 - Coleta do material flutuado com ajuda de uma concha.....	45
Figura 3.16 - Material afundado coletado com ajuda de um cesto.....	46
Figura 3.17 - Pesagem da amostra.....	47
Figura 3.18 - Cadinhos contendo as amostras sendo inseridos no forno de mufla.....	48
Figura 3.19 - Um perfil no formato de texto.....	50
Figura 3.20 - Definição dos trechos do perfil geofísico que pertencem às camadas de carvão (definição de topo e base das camadas).....	51
Figura 3.21 - Definição dos trechos do perfil que pertence às camadas de carvão via conciliação e o cálculo de valores médios dos parâmetros	52
Figura 3.22 - Definição dos trechos do perfil que pertencem às camadas de carvão no um furo de desmonte	54
Figura 3.23 - Esquema de lavra de camada S.....	56
Figura 3.24 - Esquema de lavra de camada M1	57
Figura 3.25 - Esquema de lavra de camada I1	57
Figura 4.1 - Relação entre emissão natural de radiação gama e parâmetros de qualidade do carvão.....	59
Figura 4.2 - Correlação entre valores de densidade e cinzas de amostras de testemunho	60
Figura 4.3 - Correlação entre valores de gama natural e cinzas de amostras de testemunho	61

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Exemplos de valores de resistividade em alguns minerais ou rochas (Telford et al., 1990) ..	12
Tabela 2.2 - Velocidades típicas de perfilagem (Hofmann et al., 1982)	21
Tabela 3.1 - Coordenadas dos furos de sondagem com recuperação de testemunhos.....	36
Tabela 3.2 - Coordenadas dos furos de desmonte	38
Tabela 3.3 - Resultado da análise de laboratório das amostras de testemunhos recuperados, das camadas em investigação na Área B3: S, M1 e I1.....	49
Tabela 3.4 - Valores médios calculados de gama natural e de resistividade das camadas de carvão nos furos de sondagem na Área B3	52
Tabela 3.5 - Valores médios calculados de gama natural e de resistividade das camadas de carvão nos furos de sondagem e resultados de análise laboratorial das amostras de testemunhos recuperados nesses furos de sondagem na Área B3	55
Tabela 3.6 – Valor de massa produzida e área ocupada pelas tiras lavradas: camadas S, M1 e I1.....	56
Tabela 3.7 - Valores de teor de cinzas das amostras ROM de carvão	58
Tabela 4.1 - Valores de cinzas de amostras de testemunhos e densidade: estimativas e erros na previsão da densidade com base nas cinzas laboratório	61
Tabela 4.2 - Valores de gama natural e cinzas de amostras de testemunhos: estimativas e erros na previsão das cinzas das amostras de testemunho com base no gama natural	62
Tabela 4.3 - Camada S: Valores de cinza estimada e de densidade estimada utilizando as equações	63
Tabela 4.4 – Camada M1: Valores de cinza estimada e de densidade estimada utilizando as equações..	65
Tabela 4.5 - Camada I1: Valores de cinza estimada e de densidade estimada utilizando as equações	66
Tabela 4.6 - Valores de cinzas estimadas ponderadas, utilizando-se os valores de espessura de camada de carvão e a espessura média (0,1m) de estéril lavrado durante a lavra	68
Tabela 4.7 - Valores de cinza das amostras da ROM estimados com base na perfilagem gama natural dos furos de desmonte, após correção da reconciliação (dados de diluição)	69
Tabela 4.8 - Cálculos de reconciliação: diferença entre a massa produzida e a calculada por meio de estimativas baseadas em perfilagem gama natural e erros, com respeito ao método tradicional de análises em laboratório de amostras ROM.....	70

Resumo

As técnicas de perfilagem geofísica são amplamente utilizadas na indústria de petróleo e vem se tornando cada vez mais importante no setor mineiro. Em aplicações bem sucedidas, elas podem ser usadas para substituir a análise laboratorial de determinadas variáveis cujo custo muitas vezes é elevado. Por meio delas, podem ser determinadas as propriedades físicas e químicas de camadas de carvão, parâmetros importantes na elaboração do planejamento de lavra, bem como no controle e processamento do minério. Preferencialmente, a análise laboratorial é realizada em amostras obtidas a partir de recuperação de testemunhos de sondagem. Por outro lado, a perfilagem geofísica pode ser muito vantajosa, ajudando a resolver problemas relacionados com a perda de testemunho durante a perfuração. Além disso, ela pode ser aplicada em furos de desmante que não possuem amostras intactas para análise, diminuindo o custo de investigação. Este trabalho estuda a possibilidade de controlar os parâmetros de qualidade de carvão por meio de perfilagem geofísica em furos de desmante. Para isto, foram realizadas coletas de amostras de testemunho de sondagem (furos de exploração), perfilagem destes com gama natural e resistividade, bem como de furos de desmante em áreas testes lavradas em um depósito de carvão conhecido. Os materiais provenientes destas áreas testes foram monitorados e regularmente amostrados até a chegada à correia transportadora de alimentação da usina e os parâmetros físicos e químicos foram determinados em laboratório. Estabelecendo-se um modelo de regressão para estimar os parâmetros de qualidade de carvão (teor de cinza e densidade), com base nos registros geofísicos de perfilagem dos furos de exploração e análises de testemunhos, foi possível prever seus valores (para uma dada camada de carvão do depósito) por meio de perfilagem geofísica de furos de desmante. Os resultados obtidos demonstram que é possível visualizar e estimar a qualidade do carvão que alimenta a usina com a ajuda dos métodos geofísicos e de modelos de calibração. Os modelos mostram que existe uma boa correlação entre o conteúdo radiométrico do carvão, que é expressa pela gama natural, e seus parâmetros de qualidade. O erro relativo das estimativas para teor de cinzas não excedeu $\pm 13\%$. Foi feita a reconciliação entre massa lavrada, ROM (Run of Mine), e a calculada por meio da perfilagem geofísica, obtendo-se, também, erros da ordem de $\pm 10\%$.

Abstract

The geophysical logging techniques are widely used in the petroleum industry and are becoming more important in the mining sector. In successful cases, they can be used to replace laboratory analysis which can be very expensive. Through these techniques, the physical and chemical properties of coal seams, important parameters required in mine planning, control and processing can be determined. Normally, the laboratory analysis is performed on samples obtained from the recovery of core samples during drilling. However, borehole logging can be very advantageous to help solve problems associated with low core sample recovery. It can also be applied in blasting holes. This dissertation investigates the possibility of controlling the quality parameters of coal by means of geophysical logging in blasting holes. Therefore, core drilling samples were recovered and collected in boreholes for exploration and these holes were also logged with natural gamma and resistivity probes. These two set of of data were checked for correlation and a regression model was derived. These regression model provides the means to obtain a physical and/or chemical estimation from the geophysical readings. Blasting holes in the same deposit, located in the area of study, were also geophysically logged as these holes do not provide intact cores for lab analysis The mined coal from these areas of study was tracked until arriving at the conveyor belt, feeding the plant where it was sampled. Establishing a model to estimate the quality parameters of coal (ash content and density), based on records of geophysical logging of boreholes for exploration, recovery and laboratory analyses of core samples, it was possible to predict the values of these materials (for a given coal seam of the deposit) through geophysical logging of blasting holes which were once present in the area, where they were extracted. The results show that it is possible to forecast and estimate the quality of the coal that feeds the plant with the aid of geophysical logging and calibration models obtained. The tools show that there is a good correlation between the radiometric content of coal, which is expressed by natural gamma, and the quality parameters of coal. The relative error of the estimates for ash content did not exceed $\pm 13\%$. In the end, the reconciliation process between the mass extracted, ROM (Run of Mine), and that calculated by using estimates based on geophysical logging was also conducted. The relative error of the estimates in respect to the mass extracted did not exceed $\pm 10\%$.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A avaliação de depósitos minerais é etapa fundamental para desenvolvimento da pesquisa e do planejamento de lavra. Essa etapa que se inicia com campanhas de amostragem tem por objetivo principal determinar o local, tamanho, geometria e qualidade do corpo mineralizado. Os custos de uma campanha de amostragem dependem do método empregado.

As campanhas de amostragem fazem uso de furos de sondagem ou poços com recuperação de testemunhos e, depois, da análise laboratorial de amostras de testemunhos dos próprios furos de sondagem. A amostragem de recurso mineral deve produzir e fornecer o maior número possível de informações com respeito ao depósito em questão, pelo menor custo financeiro e no menor tempo. Esse método de amostragem por sondagem com recuperação de testemunho é direto e confiável, mas o custo e o tempo de operação são elevados. Além disso, durante a perfuração pode ocorrer perda da recuperação do material perfurado, devido à maior friabilidade das rochas, impossibilitando a recuperação mássica integral das formações rochosas. Essa dificuldade leva a necessidade de uma ferramenta ou métodos complementares para melhor descrever os materiais.

A perfilagem geofísica é um método de amostragem indireta e muito eficaz. Pode ser realizada em furos de sondagem e poços, com custo baixo e versatilidade de manuseio, apresentando informações e respostas imediatas em campo. Como a perfilagem geofísica de poço não precisa de uma grande preparação específica em campo, ela pode ser realizada também nos furos de desmonte, tornando mais fácil a aquisição de um grande número de leituras. Sua maior aplicação na mineração nas últimas décadas se deve, em grande parte, a possibilidade desta indicar diferenças nas propriedades físicas e químicas das rochas, ajudando a definir a qualidade dos minérios.

Geralmente, pensa-se que por ser a perfilagem, um método indireto de amostragem (soft data), ela teria uma menor precisão com relação à sondagem com recuperação de testemunhos para o cálculo de recursos e reservas. Neste contexto, esse trabalho visa testar a eficiência da

aplicação de perfilagem geofísica em furos de desmonte, sem recuperação de testemunhos. Os objetivos foram: distinguir carvão das demais litologias (determinando a espessura das camadas), visando quantificar as massas de carvão, bem como seus parâmetros de qualidade, por meio apenas de perfilagem gama natural e resistividade elétrica.

1.1 Perfilagem Geofísica no Carvão

Os trabalhos pioneiros de perfilagem geofísica foram realizados pelos irmãos Schlumberger: Conrad e Marcel. Eles são considerados os inventores da perfilagem elétrica. Conrad desenvolveu um arranjo, chamada de “Schlumberger Array”, que era uma técnica de prospecção de depósitos metálicos. No dia 5 de setembro de 1927, eles baixaram uma sonda elétrica em um poço em Pechelbronn, Alsace, França, criando o primeiro registro de perfilagem ou perfil de resistividade (Hilchie, 1990). Hoje, a técnica encontra aplicações nas mais diferentes áreas de geologia e mineração.

No início, a perfilagem geofísica era quase que, exclusivamente, aplicada à prospecção de petróleo. Ultimamente está se tornando cada vez mais importante no setor de mineração. Em casos de sucesso, ela pode ser utilizada para substituir a análise laboratorial que normalmente tem um custo bem elevado. Através desta técnica é possível determinar as propriedades físicas e químicas dos minerais que estão em avaliação, propriedades que podem ser importantes na etapa de planejamento de lavra e processamento mineral. Quando aplicada corretamente, é uma maneira econômica e eficiente para aumentar a qualidade e quantidade de informações sobre depósitos minerais em exploração, modelagem e estimativa de recursos/reservas (Bond et al., 1971; Kerr et al., 1994; Killeen, 1983; Nelson et al., 1994; Turner et al., 1996; Almeida et al., 2005; Oliveira, 2005).

Precisamente, ela pode ser usada para visualizar os parâmetros qualitativos e ajudar a delinear interfaces de mineral/estéril. Normalmente, a análise em laboratório é realizada em amostras obtidas a partir da recuperação de testemunhos durante a fase de sondagem. No entanto, um registro de perfilagem geofísica pode ser muito vantajoso para ajudar a resolver

problemas devido à baixa recuperação de testemunhos de sondagem (Davies, 1992; Kay et al., 2004; Reeves, 1976). Ele também pode ser aplicado em furos de desmonte.

Foi apenas nos anos 60 que a técnica começou a ser aplicada aos depósitos de carvão. Nessa época, somente o parâmetro de resistividade era utilizado pelos geofísicos para diferenciar rochas estéreis do carvão. O carvão em geral apresenta resistividade naturalmente elevada comparada a rochas estéreis contendo argilas. No caso de depósitos, onde ocorrem rochas estéreis com baixo conteúdo de argilas (tais como arenitos mais puros), a tendência é não se conseguir distingui-los no perfil geofísico. Ainda, a resistividade é um parâmetro que responde não somente à composição mineralógica das rochas, mas, também, ao grau de saturação em água e fraturamento.

Por isso, começaram a ser desenvolvidas outros tipos de sondas para perfilagem. Primeiro, veio a sonda capaz de detectar a radiação natural das rochas. Em seguida, percebeu-se que ainda havia dificuldade de distinguir as rochas estéreis do carvão e a previsão de qualidade do minério era muito precária. Então, foi desenvolvida a sonda gama-gama, a qual possui uma fonte radioativa que irradia energia para o meio, recebendo de volta a radiação retro-espalhada, mensurável por meio de detectores. Como conclusão dos trabalhos nesta ocasião, verificou-se no campo que a contagem retro-espalhada era diretamente proporcional à densidade dos materiais *in situ* e que este parâmetro tem alta correlação com as cinzas e poder calorífico de carvão mineral (Borsaru et al., 1985). O sensor mostrava bem este contraste nos parâmetros medidos, ajudando na identificação e delimitação (definição da espessura) das camadas de carvão, bem como na determinação da densidade. Com isto, outras sondas contendo outros tipos de fontes radioativas mais potentes como a sonda de Prompt Gamma Neutron Activation (PGNA), foram sendo criadas, constatando-se uma melhora nos resultados, em especial no que diz respeito à previsão da qualidade do minério.

Apesar do sucesso da aplicação da sonda gama-gama aos depósitos de carvão (Borsaru & Ceravolo, 1994; Borsaru et al., 2001; Borsaru, 2005; Borsaru & Asfahania, 2007), é importante notar que existem limitações no uso deste tipo de ferramenta, pois ela utiliza uma fonte radioativa. Pode causar acidentes de alta gravidade, com impactos sérios ao meio ambiente e

saúde humana. Existem, por isso, restrições no uso do método que variam de país a país. Há países que utilizam sondas com fontes mais potentes e mais perigosas (fontes nucleares) que aquelas aplicadas no início da década de 60. Por outro lado, há países com restrições severas até mesmo para sondas gama-gama mais simples, tais como as de fonte de césio 137. O Brasil é um desses países com restrições altamente rigorosas e regras que estão bastante criteriosas quanto ao manuseio, transporte e utilização desta sonda.

Frente a estas limitações, no Brasil, pensou-se em voltar a utilizar sondas não nucleares, tal como a de gama natural (contagem total ou gama espectrométrica). Há trabalhos para determinação de qualidade de depósitos de carvão baseada nos parâmetros de resistividade e gama natural somente, onde é possível estimar o conteúdo de cinzas, principal indicador de qualidade de carvão (Das & Kayal, 1981; Souza et al., 2010).

No Brasil, no Rio Grande do Sul, especificamente, tem surgido trabalhos deste tipo também: aplicações sem fonte radioativa (Souza et al., 2010) e com fonte radioativa (Webber et al., 2006) à depósitos de carvão.

1.2 Objetivos dessa Dissertação

Essa dissertação apresenta três metas:

- Avaliar a possibilidade de previsão da qualidade de carvão ROM (Run of Mine) no planejamento de lavra ao curto prazo, baseado em perfilagem de gama natural e resistividade, aplicadas nos furos de desmonte sem recuperação de testemunhos.
- Verificar a reconciliação entre estimativas de qualidade de carvão obtidas via análise de laboratório (método direto) e a perfilagem geofísica (método indireto), com determinação dos erros.
- Medir e reconciliar a massa produzida ROM (Run of Mine) e a calculada por meio de estimativas baseadas em dados de perfilagem de gama natural e resistividade e erros associados.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa dissertação no que concerne à perfilagem geofísica são propor procedimentos e parâmetros de campo adequados para obtenção de informações geofísicas confiáveis, bem como prever massas e qualidade de carvão com acuracidade e precisão, usando os modelos criados com base na perfilagem geofísica.

1.4 Etapas

A seguinte metodologia foi empregada para alcançar os objetivos:

- Estudar e conhecer, a técnica de perfilagem geofísica e suas aplicações.
- Acompanhar uma campanha de sondagem com recuperação de testemunhos e análises de laboratório dos materiais recuperados (campanha de exploração), buscando melhor entender os procedimentos envolvidos nestas etapas.
- Realizar a perfilagem geofísica com a sonda de resistividade e gama natural nos furos de sondagem com recuperação de testemunho, verificando os cuidados que envolvem a prática em campo.
- Interpretar os perfis obtidos na campanha para poder identificar as camadas de carvão, as espessuras dessas camadas e valores de parâmetros de interesse de cada camada.
- Avaliar a correlação entre os parâmetros de interesse medidos por perfilagem geofísica e resultados obtidos por análise laboratório das amostras de recuperação de testemunho de sondagem para criar modelos ou obtenção de funções de ajuste.
- Realizar a perfilagem geofísica com a sonda de resistividade e gama natural nos furos de desmonte sem recuperação de testemunho na uma nova campanha a ser realizada no mesmo depósito de carvão.
- Interpretar os perfis obtidos na nova campanha para poder identificar as camadas de carvão, as espessuras dessas camadas e valores de parâmetros de interesse de cada camada.
- Aplicar os modelos criados anteriormente (na campanha de exploração) nos dados obtidos por perfilagem geofísica nos furos de desmonte sem recuperação de testemunho para prever os parâmetros de qualidade de carvão de cada camada.

- Acompanhar a operação de lavra das camadas de carvão, registrando os valores das massas retiradas ao longo de todo processo.
- Acompanhar as análises de laboratório de amostras de carvão ROM de cada camada de carvão, aplicar as funções de ajuste para prever qualidade e massas.
- Fazer reconciliação entre as estimativas de qualidade e de massas, calculadas por meio de perfilagem geofísica (método indireto) e resultados obtidos por análise de laboratório (direto).

1.5 Organização dessa Dissertação

Os capítulos seguintes estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2 apresenta o tema perfilagem geofísica, incluindo os conceitos gerais e a teoria sobre os sensores de perfilagem geofísica usadas em campo.
- Capítulo 3 apresenta a área de estudo, os métodos de coleta e tratamento de dados por sondagem com recuperação de testemunho e por perfilagem geofísica.
- Capítulo 4 apresenta a aplicação de metodologia em um estudo de caso. Análise dos resultados obtidos também é discutida.
- Capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA APLICADA A DEPÓSITOS DE CARVÃO

A perfilagem geofísica é a realização de um perfil dentro do poço ou furo de sondagem, vertical ou inclinado, com medições de vários parâmetros (físicos e químicos) ao longo da profundidade com uma sonda geofísica. As sondas geofísicas parecem com hastes de metal cujos comprimentos podem variar. Existem vários tipos de sondas, sendo que uma mesma sonda pode medir mais de um parâmetro ao mesmo tempo. Como essas sondas podem ser colocadas nos furos com profundidades que podem chegar até quilômetros, os equipamentos de perfilagem geofísica têm que ser de alta qualidade, resistentes e capazes de medir os parâmetros investigados com boa precisão, mesmo em temperaturas e pressões elevadas. Esses fatores são suficientes para reduzir a desempenho dos cabos, conectores e das sondas.

Os resultados ou medições podem ser apresentados como um gráfico ou arquivo de formato de texto, onde ficam registrados os valores dos parâmetros em função das profundidades do poço ou furo. Em decorrência desses resultados, interpretações importantes podem ser feitas. Elas são:

- Identificação de litologias e correlação estratigráfica.
- Determinação de espessura de estratos, porosidade, saturação de fluidos, permeabilidade, densidade (massa específica), propriedades mecânicas de rochas, movimentação e características físico-químicas das águas subterrâneas;
- Caracterização de fraturas e porosidade secundária.
- Verificação de aspectos construtivos (integridade) de poços.

Existem vários tipos de perfis, mas, nesse trabalho foram levados em consideração apenas os perfis de resistividade e gama natural, para fins, inclusive de determinação da espessura de camada de carvão.

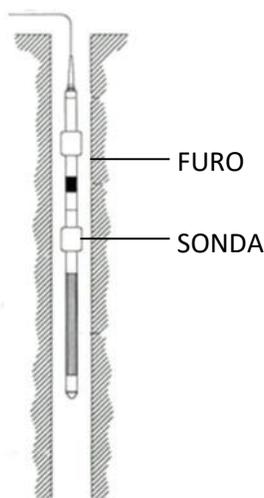


Figura 2.1 - Uma sonda dentro de um poço

2.1 Conceitos Básicos

O desenvolvimento de sondas leva em consideração diversos conceitos, os mais importantes são o volume de investigação, resolução vertical e profundidade de investigação. Esses conceitos estão interligados, sendo que a mudança do valor de um destes fatores afeta os demais.

Nesse item, serão descritos alguns conceitos e definições da perfilagem geofísica para facilitar a compreensão.

2.1.1 Volume de Investigação

O volume de investigação é a campo de atuação em que a sonda de perfilagem recebe as informações via seus detectores. Esse campo é relacionada com três outros conceitos que são profundidade de investigação, resolução vertical e efeito de poço. A figura 2.2 ilustra os principais conceitos. Dependendo como a sonda foi construída, o volume de investigação levaria formas diferentes: esférico, cônico, disco, elipse. O espaçamento entre os eletrodos em sondas elétricas e a distância entre a fonte e receptores nas sondas radioativas, são fatores que definem o volume de investigação.

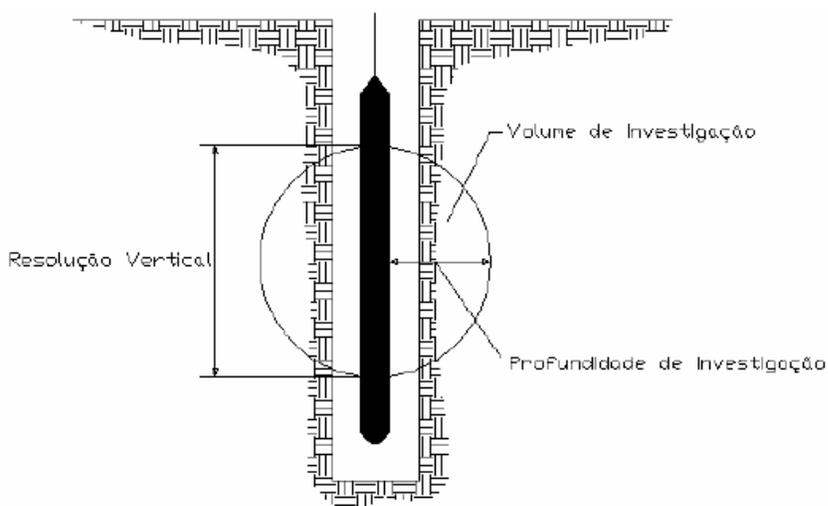


Figura 2.2 - Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com o volume de investigação esférico.

2.1.2 Profundidade de Investigação

A profundidade ou raio de investigação é a distância máxima alcançada pelo volume de investigação em direção perpendicular a sonda.

2.1.3 Resolução Vertical

A resolução vertical é a espessura mínima de um litotipo que a sonda é capaz de medir os parâmetros desse litotipo. É ilustrado graficamente na Figura 2.3. Sondas capazes de medir litotipos poucos espessos são chamadas de sondas de alta resolução.

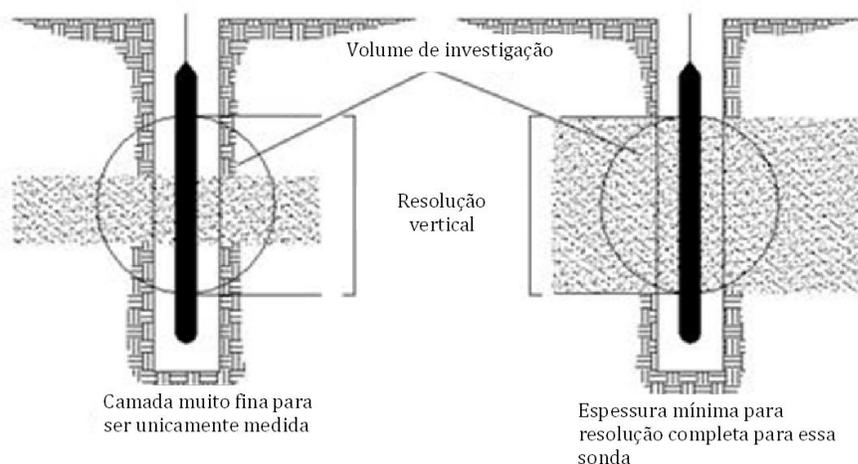


Figura 2.3 - Resolução vertical em uma sonda com volume de investigação esférico

2.1.4 Efeito de Poço

Apesar de equipamentos de perfilagem geofísica serem de boa qualidade, o poço ou furo deve exibir condições favoráveis á pratica da perfilagem geofísica. Vários fatores como mudanças de diâmetro, fluido de perfuração, revestimentos e má qualidade das paredes (se existirem caimentos e formação de cavernas nas paredes), afetam e podem ter efeitos prejudiciais nos parâmetros medidos na leitura do poço ou furo (Figura 2.4).

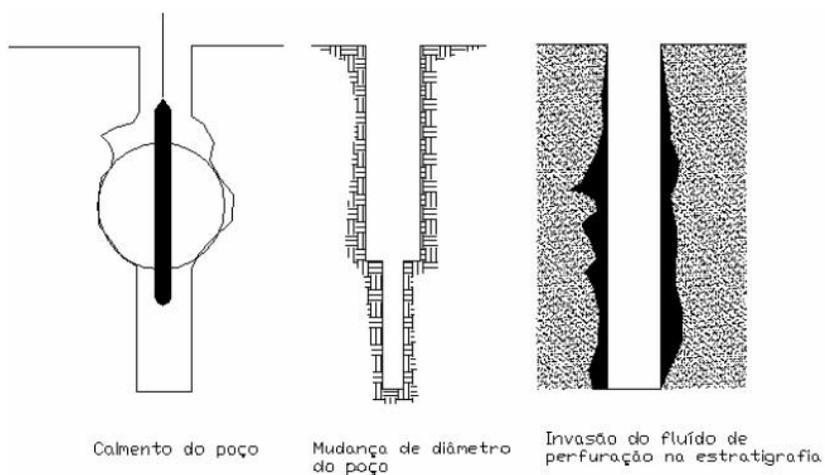


Figura 2.4 – Efeito de poço que afetam parâmetros medidos pela sonda

2.2 Perfilagem Elétrica

A perfilagem elétrica responde ao fluxo de corrente elétrica entre a sonda e as litologias na parede do furo ou poço.

2.2.1 Resistência e Resistividade

A resistência e resistividade são parâmetros diferentes. A diferença deve ser perfeitamente compreendida para processar um registro geofísico. A resistência de um material depende principalmente de dois fatores: de que o material é feito e sua forma. Para um dado material, a resistência é inversamente proporcional à área de seção, por exemplo, um fio grosso de cobre tem uma resistência menor do que um fio fino de cobre (Figura 2.5). Além disso, para um dado material, a resistência é proporcional ao comprimento, por exemplo, um fio longo de cobre tem maior resistência do que um fio curto de cobre. A resistência é uma medida absoluta em ohms em quaisquer condições de volume, temperatura e pressão existente no momento de medida.

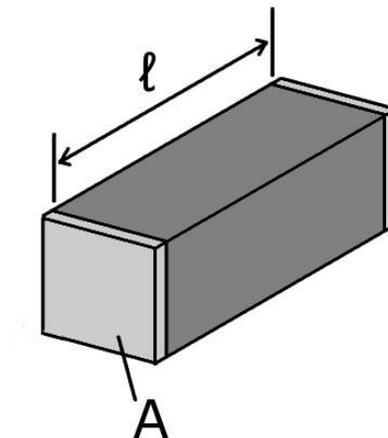


Figura 2.5 – Exemplo do volume (de investigação) para obtenção da resistência

A equação de resistência dada em função de resistividade e volume do material é:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (2.1)$$

onde R é a resistência, ρ é a resistividade, l é o comprimento do material e A é a área de seção.

A resistividade de um dado material homogêneo, medido em dadas condições de temperatura e pressão, é constante e independe do volume. Resistividade é medida em ohms.metro e é definido como a resistência elétrica de um material quando uma corrente de 1 ampere é aplicada em 1 metro de comprimento de material de seção de 1 metro quadrado nas condições normais de temperatura e pressão (Hoffman et. al., 1982).

Na Tabela 2.1, são apresentados valores de resistividades (Telford et al., 1990). Utilizando essa tabela pode se concluir que com apenas um único parâmetro não é possível identificar o tipo de litologia.

Tabela 2.1 - Exemplos de valores de resistividade em alguns minerais ou rochas (Telford et al., 1990)

Mineral / Rocha	Resistividade (variação ou valor médio em ohm.m)
Bauxita	200 – 6000
Água superficial (doce)	10 – 100
Água do mar	0,2
Grafita	$10^4 - 5 \times 10^3$
Granito porfirítico (saturado)	$4,5 \times 10^3$
Diabasio	20 - 5×10^7
Basalto	10 – $1,3 \times 10^7$
Xisto	20×10^4
Gnaisse	3×10^6
Quartzito	10 – 2×10^8
Argilas consolidadas	20 – 2×10^3
Argilas inconsolidadas (úmidas)	20
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenito	1 – $6,4 \times 10^8$
Calcário	50×10^7

2.2.2 Influência da Litologia

As informações exibidas pelos perfis de resistividade mostram o fluxo de corrente elétrica entre a sonda e as litotipos. Esse fluxo de corrente é controlado por dois processos, condução

eletrolítica e a troca de íons. O modo de condução de corrente elétrica varia com respeito a cada litotipo. A porosidade e a salinidade reduzem a resistividade e facilitam a condução de fluxo de corrente. Outros fatores que, também, afetam esse fluxo: a forma, distribuição dos grãos, cimentação e a matriz. Se os poros não são interligados, o fluxo de corrente é reduzido e a resistividade aumenta.

Em 1942, Archie realizou um estudo de resistividade das rochas. Ele estabeleceu que a resistividade de uma rocha (ρ_o), completamente saturada com água salgada, é proporcional à resistividade da água salgada (ρ_w).

$$\rho = F \cdot \rho_w \quad (2.2)$$

onde ρ é a resistividade, ρ_w é a resistividade da água salgada e F é fator de formação.

Ele também estabeleceu a seguinte relação, determinando F e porosidade (ϕ) a partir de várias rochas:

$$F = \phi^{-m} \quad (2.3)$$

onde o expoente m é um fator de ajuste que varia entre 1,8 a 2,0 em arenitos, porém em areias inconsolidadas, esse valor pode chegar a 1,3. Devido a essa dependência do estado da consolidação, o expoente m é chamado de expoente de cimentação (Hearst et al.,1985).

Winsauer et al. (1952) realizaram uma modificação na equação de Archie. Foi feito um estudo com amostras de arenito. A conclusão do estudo deu a equação modificada:

$$F = a \cdot \phi^{-m} \quad (2.4)$$

onde a é outro fator de ajuste.

2.2.3 Princípio de Funcionamento das Sondas de Resistividade

Uma corrente é gerada no equipamento o qual é transmitida ao eletrodo simples na sonda, que é chamado de eletrodo de corrente. A corrente passa entre esse eletrodo, o fluido do poço e a estratigrafia por condução eletrolítica nos fluidos e por troca de íons em minerais argilosos. A corrente aplicada no eletrodo é mantida constante. Então, a diferença de potencial elétrico entre o eletrodo de corrente e um eletrodo de referência aterrado é proporcional à soma das resistências de todos os materiais. A resistência pode ser obtida conforme a equação desenvolvida por George Simon Ohm, lei de ohm, em 1827.

$$R = \frac{E}{I} \quad (2.5)$$

onde E é a diferença de potencial em volts, I corrente em amperes e R é a resistência em ohms.

Nesse método, a resistência medida é a soma entre a resistência do fluido e da estratigrafia. Dependendo do método, a obtenção da resistência não é feita com um volume de investigação fixo ou definível, nesse caso, nenhuma interpretação quantitativa de resistividade pode ser obtida (item 2.2.1).

2.2.3.1 Sonda de Resistividade Pontual

O equipamento de perfilagem resistência pontual é mostrado na Figura 2.6, onde a sonda é provida de um eletrodo de corrente. O tamanho do eletrodo de corrente controla a profundidade de investigação. Se o eletrodo for esférico, o volume efetivo de investigação será aproximadamente cinco vezes o diâmetro do eletrodo (Guyod, 1944). Os eletrodos de equipamentos de medição de resistividade devem, sempre, serem imersos em líquido para que a corrente seja transmitida da sonda para a parede do furo.

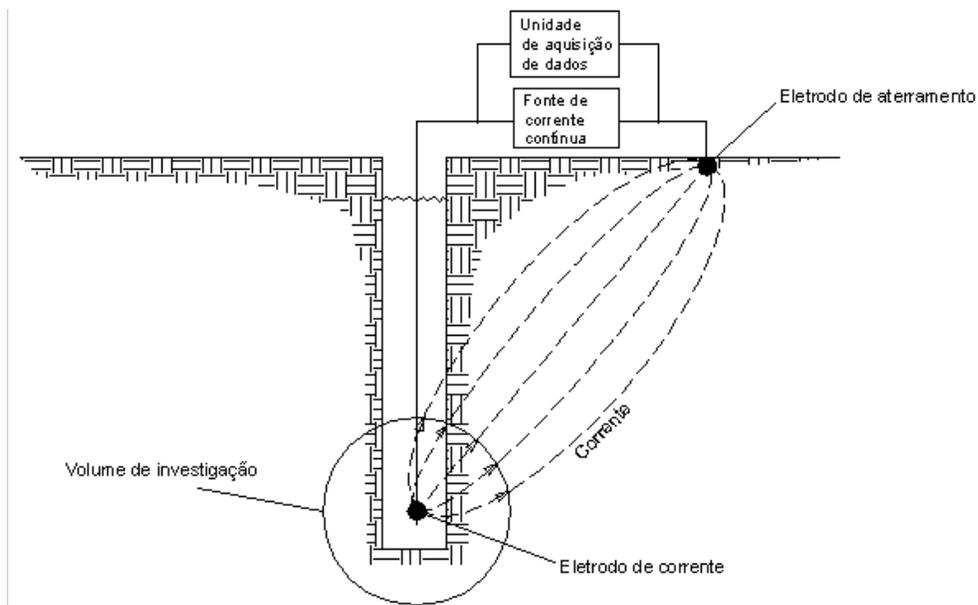


Figura 2.6 – Diagrama esquemático do equipamento de perfilagem resistência pontual

2.2.3.2 Sonda de Resistividade com Focalizadores

Em situações em que as camadas estão pouco espessas, dispositivos focalizadores são usados para poder definir com precisão a camada medida. Em termos de medir a resistividade verdadeira de uma camada, esse tipo de ferramenta é fundamental. Guyod (1951) discutiu os cálculos para resistividade verdadeira em equipamentos de perfilagem com focalizadores. Essas sondas são providas de eletrodos auxiliares (eletrodo focalizadores) colocados acima e abaixo do eletrodo de corrente.

Essas sondas são fornecidas com três eletrodos (isolados entre si), dois eletrodos auxiliares (eletrodo focalizadores) e um eletrodo de corrente que fica no meio dos eletrodos auxiliares (Figura 2.7). Ao eletrodo central é aplicada uma corrente contínua. A corrente é confinada pelos eletrodos focalizadores para que o fluxo de corrente entre o eletrodo central e a estratigrafia tenha forma de disco (Figura 2.3). As vantagens desse tipo de sonda são grande profundidade de investigação e boa resolução vertical.

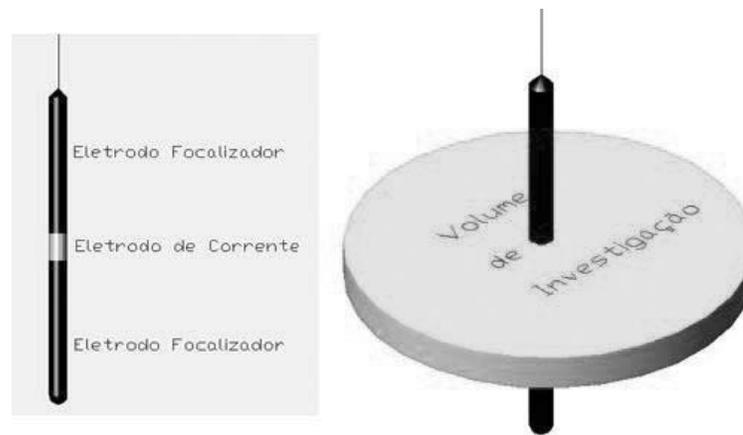


Figura 2.7 - A esquerda é apresentada a distribuição dos eletrodos na sonda e a direita é mostrada o volume de investigação

Todos os três eletrodos são alimentados igualmente por uma tensão dada pela própria sonda. A distribuição das linhas de corrente e equipotenciais se apresentam como mostrado na Figura 2.8, se o potencial elétrico for idêntico nos três eletrodos.

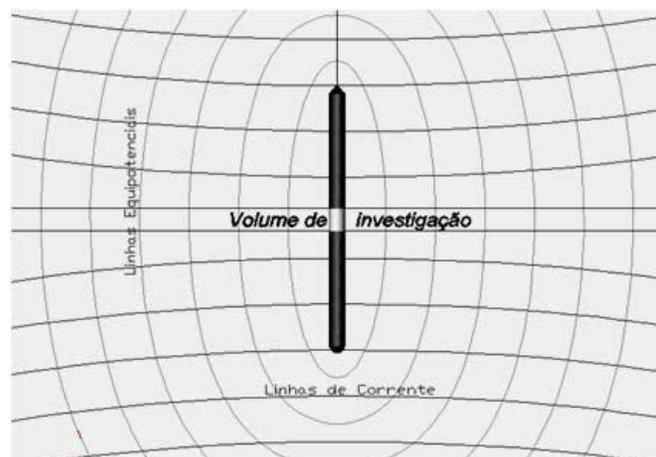


Figura 2.8 - Linhas equipotenciais e de corrente em sondas para medir resistividade com focalizadores

Qualquer mudança de resistividade da camada adjacente ao eletrodo de corrente faz, também, uma mudança do potencial elétrico nesse eletrodo conforme a lei de Ohm. De acordo com a geometria do volume de investigação, que é conhecida de cada fabricante de sonda de perfilagem, a diferença em potencial elétrico é medida e convertida em resistividade.

2.3 Perfilagem Nuclear

Processos nucleares são envolvidos no funcionamento de sondas nucleares para investigar a estratigrafia. Existem sondas que utilizam uma fonte de radiação para investigar a interação entre a radiação e os átomos presentes na rocha e outras sondas que medem a emissão natural de radiação das rochas investigadas.

2.3.1 Aspectos Fundamentais

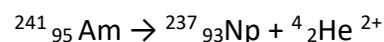
2.3.1.1 Radioatividade

Em 1896, Antoine H. Becquerel (francês) descobriu acidentalmente radioatividade. Ao esquecimento de uma rocha de urânio sobre uma placa fotográfica em local escuro, verificou que a placa enegrecia. Ele chegou à conclusão que a rocha de urânio emitiu “algo” capaz de atravessar papéis escuros e outras substâncias opacas a luz. Ele provou que um núcleo atômico muito energético e instável, por ter excesso de partículas ou energia, tende a estabilizar-se, emitindo algumas partículas.

2.3.1.2 Radiação Alfa ou Partícula Alfa

Um núcleo atômico instável emite uma partícula alfa (α), virando em outro núcleo com número atômico duas unidades menor e número de massa quatro unidades menor. A emissão alfa ou decaimento alfa, portanto, é composta da mesma estrutura de núcleos do átomo de hélio. Uma emissão alfa é igual a um núcleo de hélio, que por sua vez, um núcleo atômico de hélio contém em seu interior dois prótons e dois nêutrons e a diferença entre a emissão alfa e o átomo de hélio é que na emissão alfa ela tem dois elétrons retirados da eletrosfera. Portanto, a partícula alfa tem carga positiva +2 (em unidades atômicas de carga) e quatro unidades de massa atômica.

Um exemplo; é a fissão do amerício 241 em netúnio 237:



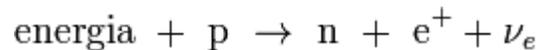
2.3.1.3 Radiação Beta ou Partícula Beta

A radiação beta é uma forma de radiação ionizante emitida por certos tipos de núcleos radiativos. Esta radiação ocorre na forma de partículas beta (β), que são elétrons de alta energia ou pósitrons emitidos de núcleos atômicos no um processo conhecido como decaimento beta. Existem duas formas de decaimento beta, β^- e β^+ .

No decaimento β^- , um nêutron é convertido no um próton, com emissão de um elétron e de um antineutrino de elétron.



No decaimento β^+ , um próton é convertido no um nêutron, com a emissão de um pósitron e de um neutrino de elétron.



2.3.1.4 Radiação Gama

Após a emissão de uma partícula α ou β , o núcleo atômico depois de processo de decaimento, ainda com excesso de energia, procura se estabilizar, emitindo esse excesso em forma de onda eletromagnética, da mesma natureza da luz, denominado radiação gama (γ).

2.3.2 Radioatividade nas Rochas

Desde a formação da terra, os elementos radioativos já eram presentes. Ainda hoje, eles estão em desintegração. Esses elementos estão presentes no solo e nas rochas. Figura 2.9 mostra o decaimento das séries radioativas naturais, e respectivas meias vidas.

SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS

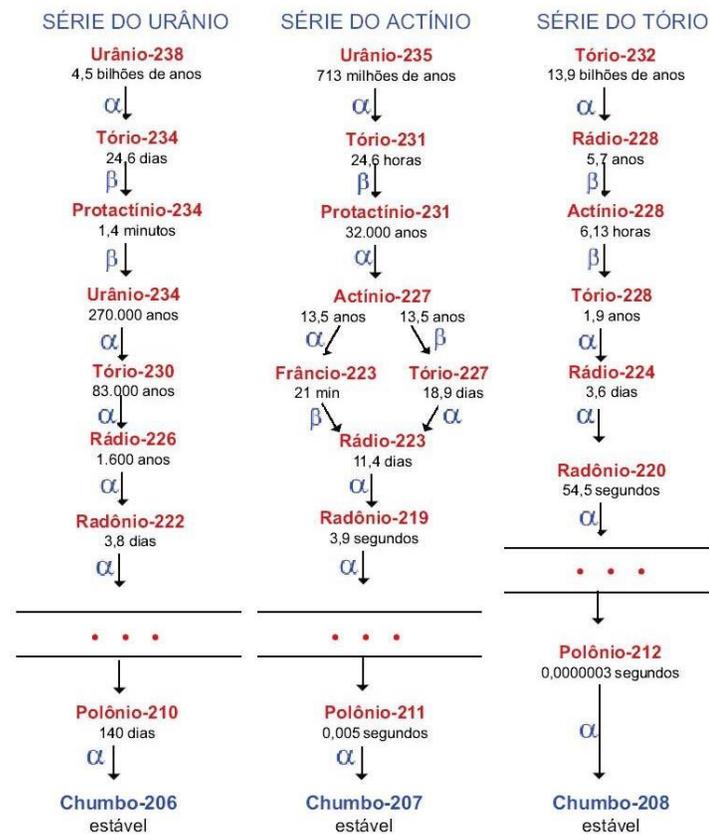


Figura 2.9 - Séries radioativas naturais

A intensidade de radiação gama emitida pelas rochas depende de sua composição química. Xisto tem quantidade significativa de potássio, vai emitir alta emissão de raios gama. Carvão, por sua vez, quase não tem K em sua composição e raramente apresenta urânio e tório, o carvão apresenta as mais baixas emissões de radiação gama natural. É fácil distinguir o carvão de rochas “xistosas” e folhelhos.

2.3.3 Removendo os Efeitos Estatísticos

O decaimento de um núcleo atômico instável libera partículas e produz raios gamas. Esse fenômeno não é constante mensurável como o decaimento ocorre aleatoriamente. Por isso, um decaimento em um particular momento pode ser diferente do outro que for antes ou depois. Na

Figura 2.10, é possível ver e observar as contagens de uma fonte de raios gama de atividade conhecida em decaimento randômico, mostrado em um registro geofísico.

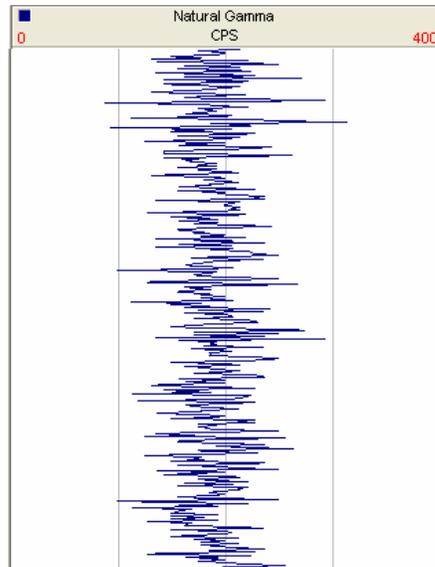


Figura 2.10 - Aleatoriedade das contagens de uma fonte em decaimento radioativo

Os decaimentos randômicos afetam os valores dos dados medidos pela sonda. Esses efeitos de variação estatística devem ser separados dos efeitos das mudanças de litologia.

A contagem média se torna mais representativa quanto mais longo for o período amostrado, o número de contagens aumenta e os efeitos da variação estatística diminuem. Uma boa aproximação do erro estatístico de uma contagem para bases de tempos diferentes é obtida pela seguinte equação (Hofmann et al., 1982):

$$erro = \sqrt{\frac{tempo \cdot contagem\ media}{tempo}} \quad (2.6)$$

O tempo de coleta dos dados e velocidade de perfilagem; são muito importantes. É possível diminuir a variação estatística usando uma grande base de tempo e com baixa velocidade de perfilagem, mas nem sempre isto é muito prático. A Tabela 2.2 apresenta velocidades apropriadas para sondas diferentes.

Tabela 2.2 - Velocidades típicas de perfilagem (Hofmann et al., 1982)

Tipo de Sonda	Velocidade Geral (m/min)	Velocidade para Detalhamento (m/min)
Elétrica	6 – 10	6 – 10
Radiação	3 – 10	2 – 5

Os limites de velocidades mostrados na Tabela 2.2 são indicados para não comprometer a parâmetro em medição.

2.3.4 Sonda para Medição da Emissão Natural de Raios Gama ou Gama Natural

A sonda de emissão natural de raios gama é utilizada frequentemente em depósitos de carvão, em combinação com a sonda de resistividade. A aplicação principal é para identificar as litotipos. Após conseguir estabilizar uma correlação entre o perfil e testemunhos recuperados, o perfil de gama natural é uma boa ferramenta para identificação das camadas de carvão em um depósito. A perfilagem de radiação gama natural pode ser feita em poços ou furos de sondagem preenchidos com líquidos ou vazios e é pouco afetada por irregularidades nas paredes ou revestimento dos poços ou furos.

2.3.4.1 Princípio de Funcionamento

As sondas de emissão natural de raios gama são as mais simples de todas as sondas nucleares. Elas não utilizam fontes radioativas. As sondas só incluem um detector e só detectam emissão natural de raios gama das rochas. Existem vários tipos de detectores que podem ser usados nessas sondas, os cintilômetros, contadores de Geiger-Müller e câmara de ionização. Os cintilômetros são os mais eficientes e usados.

2.3.4.2 Unidades de Medida dos Detectores

Nas sondas de emissão natural de raios gama, a detecção é via cintilômetros. Eles determinam o número de decaimentos por unidade de tempo (CPS – Contagens Por Segundo). Eles são cristais de iodo de sódio ativado com uma pequena porção de tálio que quando forem

ionizados pelas partículas, irão emitir luz visível. A energia de ionização da partícula é proporcional à intensidade dessa luz.

Essa luz é detectada por um tubo fotomultiplicador. O tubo produz um pulso com amplitude proporcional à energia de partícula detectada. Nas sondas, o tudo conta os pulsos sem distinção da faixa de energia, onde realizam a contagem total dos decaimentos.

2.4 Respostas Típicas dos Parâmetros Apresentados

A Figura 2.11 apresenta um sumário de respostas médias dos parâmetros obtidos por perfilagem em algumas formações. Os valores devem ser empregados somente como referência, pois cada sítio geológico apresenta características próprias.

Tipo de rocha		Parâmetro	Raios gama		Densidade		Resistividade ohm.m					
			0	API	150	1	g/cm ³	3	0	10	100	1000
Folhelho	Marinho											
	Não marinho											
Carvão	Betuminoso											
	Inferior											
	Linhito											
	Antracito											
Arenito	Poroso											
	Compacto											
Siltito												
Calcáreo	Poroso											
	Compacto											

Figura 2.11 – Sumário de respostas de perfilagem geofísica em algumas litologias

2.5 Uso das Informações de Perfilagem Geofísica

O uso de perfilagem geofísica vem ganhando espaço no setor de mineração como forma de aumentar a qualidade e quantidade de informação obtida sobre um depósito mineral em investigação. Essas informações são adquiridas via os parâmetros ou combinação dos parâmetros medidos por perfilagem.

Há casos, em que existem correlações entre os parâmetros medidos por perfilagem geofísica e as propriedades físico-químicas do minério investigado, por exemplo, a correlação entre densidade e teor de cinzas no carvão. Os dados de perfilagem geofísica, neste caso, podem

ser usados para aumentar a acuracidade e precisão das estimativas dessas propriedades medidas via método direto (análise de laboratório de amostras de testemunho).

Por outro lado, para que isto ocorra, alguns cuidados, procedimentos, devem ser seguidos, tais como calibrações e aferições. Serão abordados esses procedimentos importantes no item seguinte.

2.6 Procedimentos de Calibragem, Aferições e de Campo

Nesse item, serão abordados os procedimentos de campo nas campanhas de perfilagem geofísica.

2.6.1 Definição do Ponto Inicial (Zero Point)

O *zero point* é o ponto onde começa a medida dos parâmetros e também o ponto inicial de profundidade de poço ou furo para ser perfilado. O *zero point* é sempre dado pelo fabricante da sonda. Esse valor é normalmente igual ao comprimento da sonda, ilustrado na Figura 2.12. O Zero point é sempre no encaixe do cabo do guincho com a sonda.

O valor de *zero point* deve ser colocado com muito cuidado para que os parâmetros medidos correspondam às profundidades certas respectivamente ao longo do poço ou furo.

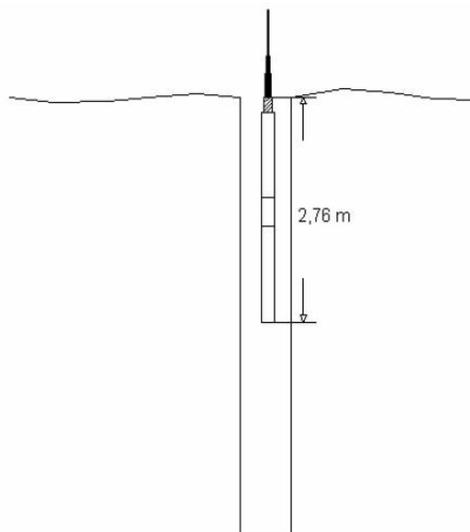


Figura 2.12 – Nivelamento da posição do *zero point* com o solo ou início do furo (sonda da resistividade)

2.6.2 Aferição da Sonda de Resistividade

A aferição normalmente é realizada por meio de um padrão de valores conhecidos do parâmetro a ser medido (Figura 2.13). A aferição deve ser aplicada conforme cada fabricante. Para o caso da resistividade, existe um pequeno circuito eletrônico, composto basicamente por resistências, o qual aplica valores de resistividades conhecidos. Os valores medidos pelo equipamento devem ser os mesmos aplicados pelo padrão.



Figura 2.13 – Caixa com valores de resistividade padrão para a calibração de sonda de resistividade

Para o procedimento de calibração, os conectores devem ser acoplados nos respectivos pontos, conforme mostra a Figura a 2.14.



Figura 2.14 – Caixa com valores de resistividade acoplada à sonda de resistividade

2.6.3 Calibração API para Medições de Radiação Natural de Gama

Há fatores como radiação natural de fundo ou tamanho de detector usado na sonda que podem influenciar as contagens registradas pela sonda de radiação natural de gama. Para realizar comparações entre as contagens com equipamentos diferentes ou contagens realizadas em épocas diferentes, foi criada a norma API (American Petroleum Institute, 1974) que padroniza a contagem com uma fonte de atividade conhecida onde a influência da radiação de fundo e o tipo de detector são eliminados.

É importante notar as posições dos cintilômetros durante a calibração. Levando a fonte de calibração ao longo de todo comprimento da sonda, onde a sonda registrar o maior número de contagens; é a posição de cintilômetro.

Devido ao desgaste e fragilidade do cintilômetro, a calibração API deve ser feita frequentemente. Também a atividade da fonte de calibração deve ser atualizada com o tempo de meia vida que varia conforme o tipo de material radioativo utilizado.

2.6.4 Arquivamento dos Registros

O arquivamento dos registros tem que ser realizado de forma que qualquer usuário possa compreendê-los e vir a utilizá-los. Devem ser registradas todas as informações que possam ser importantes, como fotos e anotações de campo.

2.6.4.1 Arquivamento Digital

Os registros sempre estão mantidos em forma digital, em poucos casos, estão impressos. Nesses casos, os arquivos devem estar dispostos de forma que sejam facilmente compreendidos e encontrados. Eles devem ser mantidos em conjunto com os arquivos de calibração, pois são esses arquivos que mantêm os registros válidos para a época da perfilagem.

2.6.4.2 Arquivamento Impresso

Hoje em dia, Isso não é tão comum. Mas se for a caso, o registro deve apresentar boas condições e completar todas as informações fundamentais como numeração de furo, tipo de perfil, localização da perfilagem e o registro de parâmetros com toda detalhe.

2.7 Análise dos Dados Coletados

É importante que a calibração de qualquer sonda seja realizada segundo os procedimentos adequados a fim de conceder confiabilidade aos dados coletados.

Em perfilagem geofísica, a identificação das litologias é baseada no comportamento de um ou mais parâmetros medidos em conjunto, em geral de dois parâmetros, tais como a resistividade e radiação natural gama. Observam-se estes parâmetros nos litotipos de interesse e verificam-se as diferenças ou similitudes com relação aos litotipos do seu entorno. Para entender esse comportamento, é importante ter conhecimento prévio da área em investigação. O uso dos dados de perfilagem geofísica para definir os litotipos, só pode ser feito depois de estabelecimento de correlações entre os dados geofísicos e os dados de amostragem direta como análises de laboratório de testemunhos de sondagem.

2.8 Características de Alguns Parâmetros em Carvão

O carvão é uma rocha com baixa densidade e alto conteúdo de carbono. Quando carvão é queimado, o que sobra no final; é chamado cinza. Cinza é basicamente conteúdo de impurezas de carvão. Essas impurezas (alumina ou ferro, sílica, entre outros) não geram energia quando carvão é queimado. As quantidades de impurezas presentes em uma camada de carvão são referidas como teor de cinza ou conteúdo de cinza na camada e com a perfilagem geofísica é possível identificar e estimar o conteúdo de cinza.

2.8.1 Perfil de Resistividade

Uma característica que ajuda a distinguir o carvão é sua alta resistividade (na maioria das situações). Porém, é preciso estar atento ao fato dos arenitos também exibirem assinaturas semelhantes. Antracito e linhito podem exibir resistividades baixas, devido ao baixo teor de cinza

(Reeves, 1971). O perfil de resistividade deve ser usado com cuidado ou em conjunto com outro parâmetro quando houver dúvidas. Por isso, também, as sondas de gama natural e resistividade costumam estar acopladas (e assim já são comercializadas).

2.8.2 Perfil de Radiação Natural Gama

A intensidade de radiação gama emitida pelas rochas depende de sua composição química. Xisto tem quantidade significativa de potássio, por isso tende a emitir raios gama. Carvão, por sua vez, quase não tem potássio em sua composição e raramente apresenta urânio e tório: o carvão apresenta as mais baixas emissões de radiação gama natural. Com esta tendência, um perfil exibindo valores baixos de radiação natural de gama é um bom indicador da presença de carvão. Existem casos raros em que carvão contém urânio, nesses casos serão registrados valores altos de radiação natural de gama.

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE SONDAGEM COM RECUPERAÇÃO DE TESTEMUNHO, PERFILAGEM GEOFÍSICA E ÁREA DE LAVRA

Neste capítulo, será apresentada a área de estudo onde foi feito todo trabalho, aplicando a perfilagem geofísica. Será apresentada a geologia local, as etapas de coleta de dados por sondagem com recuperação de testemunhos, análise laboratorial de amostras de testemunhos, as etapas da coleta e do tratamento de dados de perfilagem geofísica e a área de lavra.

3.1 Localização da Área de Estudo

A área de estudo chamada Área B3, se localiza no município de Butiá, aos 86 km de Porto Alegre – Rio Grande do sul, Brasil. O local pertence à empresa Copelmi Mineração Ltda.



Figura 3.1 – Localização de área de estudo (Webber, 2008)

3.2 Geologia

A área B3 situa-se na Depressão Periférica Central do Rio grande do Sul, na zona de transição entre o Escudo e a bacia sedimentar intracratônica.

3.2.1 Geomorfologia e Geologia Regional

O relevo, na zona de ocorrência das camadas de carvão, caracteriza-se por coxilhas alongadas com vertentes suaves passando a áreas planas em zonas de planícies aluvionares. Ao sul do bloco, na zona de domínio do escudo cristalino, o relevo torna-se mais íngreme, com encostas mergulhando para norte em direção à bacia sedimentar.

Regionalmente, a Área B3 situa-se no extremo leste da Bacia Carbonífera Butiá-Leão que está localizada na borda sul da Bacia do Paraná, a maior bacia intracratônica brasileira. Essa bacia carbonífera possui uma área total de 1070 km², sendo dividida pela Falha do Leão que define áreas passíveis de lavra a céu aberto, a leste, caso da Área B3 e áreas passíveis de lavra em subsolo a oeste, no caso as Minas do Leão (CPRM, 1984, Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná).

Na região da Área B3, afloram sedimentitos gonduânicos depositados, principalmente, durante as eras Paleozóica e Mesozóica, sendo limitados ao sul pelo escudo Sul-rio-grandense e, ao norte, pelas escarpas dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral.

O mapa geológico regional com as unidades estratigráficas é apresentado na Figura 3.2, onde são demonstradas as diversas formações geológicas ocorrentes na região.

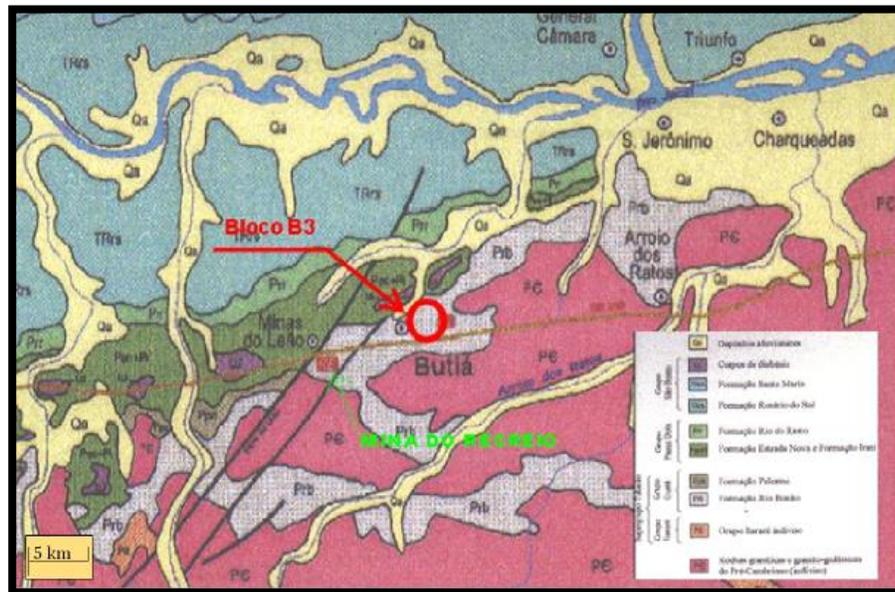


Figura 3.2- Mapa geológico da região do baixo Jacuí com localização da área B3

(Webber, 2008)

Os depósitos de carvão localizam-se estratigraficamente na Formação Rio Bonito pertencente ao Grupo Guatá de idade Permiana Inferior. Essa Formação no estado do Rio Grande do Sul é composta por três sequências sedimentares denominadas sequência basal, sequência média e sequência superior.

A sequência superior é constituída por uma sedimentação pelítica, sendo que, na mesma, localizam-se as jazidas de carvão de Charqueadas, Butiá-Leão, Faxinal, Gravataí e Chico Lomã.

Além de siltitos, argilitos e camadas de carvão, ocorrem na base dessa sequência sedimentitos imaturos e relativamente grosseiros relacionados a deslizamentos subaquáticos e canais que carreavam detritos para dentro das turfeiras. Essas rochas foram denominadas, informalmente, de pedra-areia, e petrograficamente são paraconglomerados cujos clastos de quartzo e feldspato estão imersos em uma matriz pelítico-carbonosa.

De uma maneira genérica, o ambiente deposicional, onde foram geradas as camadas de interesse econômico (Formação Rio Bonito), é caracterizado por canais meandantes com camadas de carvão de origem lacustre, sotopostas a um espesso pacote pelítico. Posteriormente, toda a bacia foi recoberta por sedimentação marinha, marcando a transgressão permiana.

3.2.2 Geologia Local

A bacia carbonífera de Butiá está inserida no contexto da Bacia Sedimentar do Paraná. Na região, afloram rochas sedimentares gonduânicas depositadas, principalmente, durante as eras Paleozóica e Mesozóica, com cobertura de sedimentos quaternários associados.

Na área B3, distinguem-se as seguintes unidades litoestratigráficas: Granito Butiá, Embasamento Metamórfico Indiferenciado, Formação Rio Bonito, Formação Palermo, Formação Irati, Formação Serra Geral e Sedimentos Recentes.

As unidades geológicas que ocorrem na área são caracterizadas de forma sucinta a seguir:

- Granito Butiá: o denominado Granito Butiá tangencia a porção sul da Área B3/B4. Caracteriza-se por sua textura granular grosseira, cores avermelhadas com mineralogia composta por acentuada proporção de feldspato alcalino e quartzo, com escassa biotita.
- Embasamento Metamórfico Indiferenciado: utiliza-se esta denominação para as rochas metamórficas registradas nos diversos furos de sondagem, identificados na Área B4, desde gnaisses, xistos até quartzitos.

À medida que tais rochas estão inseridas no um contexto de tectônica de *horst* e *grabens* as mesmas estão fortemente influenciadas por fenômenos cataclásticos, tendo por conseqüência hidrotermalização, formação de milonitos e uma forte foliação cataclástica, impedindo, localmente, a própria identificação da rocha original. O hidrotermalismo se manifesta pela extensiva formação de epidotização e silicificação.

A Formação Rio Bonito é a principal unidade estratigráfica da área, sendo que, nesta formação, está inserido o pacote carbonoso de interesse econômico. Trata-se de uma unidade litoestratigráfica de idade Permo-carbonífera, depositada sobre um substrato topograficamente irregular do embasamento granítico. O pacote carbonoso foi gerado em um ambiente lacustre não oxidante, sempre associado a intercalações pelíticas de coloração normalmente escura. A deposição dos pelitos efetuou-se num ambiente aquático calmo, relacionado à subsidência lenta e gradual da Bacia do Paraná, como evento amplo e regional. Escorregamentos subaquáticos de

material mais grosseiro, denotando períodos de maior instabilidade da bacia, também, ocorreram.

Litologicamente, a Formação Rio Bonito é constituída por siltitos, argilitos, folhelhos com intercalações de camadas de carvão, pertencentes à fácies de topo da formação. Na base desse pacote, predominam paraconglomerados e arenitos grosseiros. Pequenas variações faciológicas decorrentes de microambientes sedimentares, também, ficaram registradas nas rochas da área.

A Área B3 apresenta um zoneamento em função da profundidade das camadas de carvão e aumento da espessura do pacote carbonoso. Em toda essa zona, a Formação Palermo ocorre sobre o pacote carbonoso.

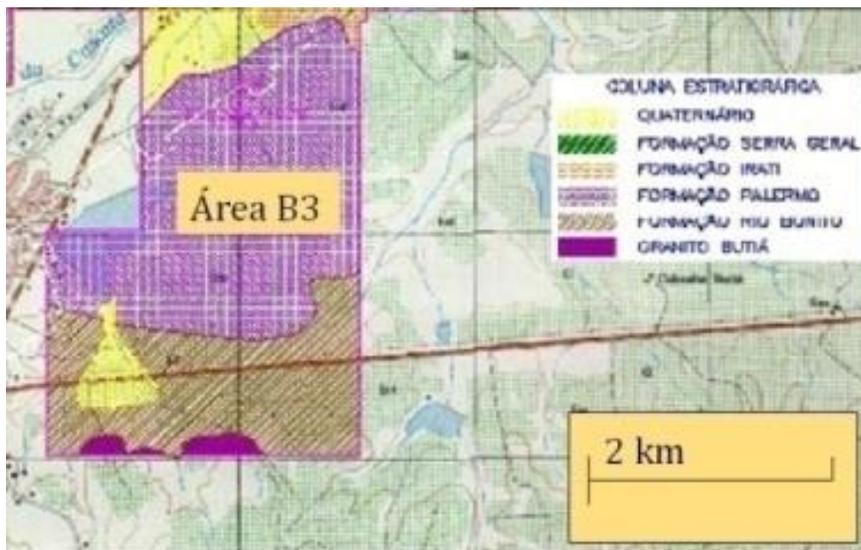


Figura 3.3 - Mapa geológico de Área B3 (Webber, 2008)

A cobertura da jazida é composta, em média, por 1 m de solo argiloso que se sobrepõe a 10 m de siltitos com níveis de arenito fino pertencentes à Formação Palermo e uma espessura variável de 15 a 20 m de folhelhos de coloração cinza médio a escura pertencente à sequência deposicional pelítica da Formação Rio Bonito.

Sotoposta a essa litologia, ocorre a primeira camada de carvão, denominada Camada A. A espessura média da cobertura da área sobre a Camada A varia de 25 a 35 metros. A cobertura apresenta-se muito alterada pela ação intempérica conferindo características friáveis ao pacote

e favorecendo a descobertura para a lavra a céu aberto sem a necessidade de desmonte por explosivos em sua maior parte.

O pacote carbonoso da Área B3 é composto por quatro camadas de carvão principais, denominadas A, S, M1/M2 e I1, alcançando uma espessura média de pacote carbonoso de 21,4m. O perfil geológico médio da área B3 é apresentado na Figura 3.4 (Gerência de geologia e pesquisa – Copelmi Mineração Ltda. Relatório de Pesquisa. DNPM, 1984).

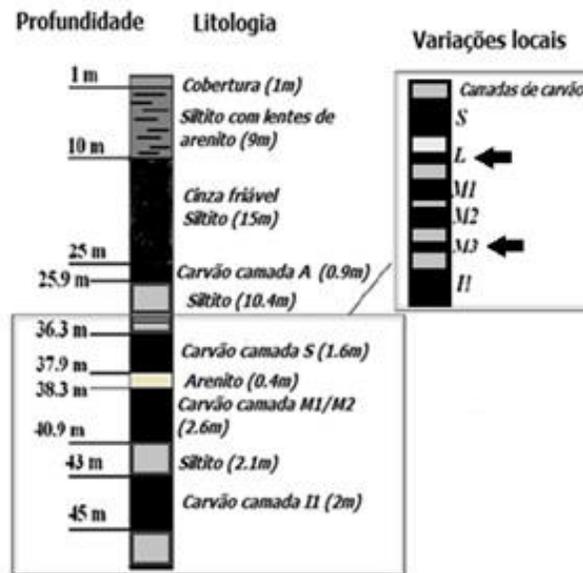


Figura 3.4- Perfil geológico típico na Área B3.

A Camada A ocorre, na área, apenas como registro estratigráfico, com espessura total de até 0,9 m, sendo composta por alternância de leitos de vitrênio com leitos de siltito carbonoso, de aspecto friável, evidenciando baixo grau de diagênese. São características dessa camada a grande quantidade de nódulos de pirita e vênulas de carbonato. Essa camada apresenta-se contínua, principalmente, na porção norte da área com aumento de espessura e melhoria de qualidade. O estéril intermediário entre as Camadas A e S é constituído por siltitos cinza, friável a fragmentado, com algumas gradações carbonosas, apresentando espessura média de 10,4 m, passíveis de desmonte com o uso de explosivos, podendo ser realizado desmonte mecânico no meio desta camada, como ocorre atualmente na Área B2 (Mina do Butiá Leste).

A Camada S apresenta espessura média de 0,98 m, normalmente sem presença de estéril intermediário, exceto em alguns furos com pequenos níveis de siltito (0,11 m), devendo ser minerada sem seletividade. Nessa camada, predomina o carvão brilhante resultado da grande quantidade de vitrinita, com raros *partings* de siltito carbonoso. É comum a presença de leitos de vitrênio e grandes nódulos de pirita.

O estéril intermediário entre as Camadas S e M1/M2 é constituído por paraconglomerados, denominado de pedra-areia, com espessura média de 0,84 m e que será excluído por seletividade durante a lavra. Essa rocha foi formada por fluxos de detritos para o interior da bacia durante a deposição do pacote carbonoso.

A Camada M1/M2 possui espessura média de 1,58 m, com intercalação de *parting* de siltito carbonoso. Quando a espessura desse *parting* for menor que 0,25 m entre as Camadas M1 e M2 esse será incorporado ao carvão. Quando maior este será removido por seletividade. Com relação à qualidade do carvão, a Camada M1 é composta pela alternância de leitos de carvão brilhante, fosco e siltito carbonoso. A Camada M2 caracteriza-se pela alta razão CC/CT (camada de carvão/camada total), próxima de 100%, com predomínio de carvão do tipo brilhante. Essa camada apresenta-se mais homogênea na porção norte da área, com pequenas variações de espessura. Na porção sul, são comuns variações de espessura dessa camada, e/ou erosão sindeposicional, fenômenos comuns na borda da bacia.

Por sua vez, o estéril intermediário entre as Camadas M1/M2 e I1 é constituído por siltitos cinza, por vezes paraconglomerático, com espessura média de 4,03 m, passível de desmonte por explosivos.

A Camada I1 possui espessura média de 1,20 m, que, a princípio, será minerada como camada total. Nessa camada, predomina os carvões foscos com média a baixa concentração de vitrinita. Esta camada está presente na maioria dos novos furos realizados na campanha de 2006, exceto na porção sul da área, onde, pela condição de borda de bacia, a camada não ocorre.

A sequência basal ao pacote carbonoso é constituída por intercalações de siltitos e paraconglomerados depositados em ambiente de alta energia. Nesse pacote, eventualmente,

ocorre uma camada de carvão de interesse econômico denominado Camada I2, cuja continuidade e aproveitamento estão em investigação (Gerência de geologia e pesquisa – Copelmi Mineração Ltda. Relatório de Pesquisa. DNPM, 1984).

A geologia não é complexa e o entendimento do comportamento das camadas que compõem o depósito de carvão é conhecido. Dessa forma, o modelo geológico é de domínio da equipe técnica facilitando a interpretação dos furos de sondagem, emprestando confiabilidade ao modelo estabelecido. A lavra de carvão em áreas próximas, na Mina do Recreio e do Butiá Leste, permite assumir as premissas do modelo geológico para avaliação dos recursos de carvão.

3.3 Furos de Sondagem com Recuperação de Testemunhos

A campanha de furos de sondagem com recuperação foi composta de 10 furos (de comprimento variando entre 60 e 80m) dispostos em malha irregular, com espaçamento variando entre 200 e 600m (média de 300m). Os furos foram feitos com sondas roto percussivo tipo Sullivan 22 da Joy (Figura 3.5) sendo que o diâmetro dos furos executados foram de 2'' padrão NW. Todos os furos foram feitos com recuperação de testemunhos, isto é, a cada manobra das hastes de sondagem com um cilindro de material de no máximo 3 m de comprimento era sacado fora do furo e disposto em caixas de testemunhos (Figura 3.6). Essas amostras foram analisadas em laboratório, obtendo-se os dados de densidade e teores de cinzas.



Figura 3.5 - Perfuratriz Sullivan 22 utilizada para fazer os furos de sondagem



Figura 3.6 - Testemunhos recuperados dentro duma caixa

As coordenadas de furos de sondagem são mostradas na Tabela 3.1 e na Figura 3.7, observa-se a localização dos furos.

Tabela 3.1 - Coordenadas dos furos de sondagem com recuperação de testemunhos.

Furo	Coordenada Norte	Coordenada Leste
B3-12	409712.13	6669126.50
B3-13	409248.56	6669099.04
B3-18	409724.83	6670656.33
B3-22	409830.64	6670346.79
B3-29	409381.78	6668067.81
B3-34	409901.70	6068972.00
B3-36	409567.34	6366256.23
B3-37	410325.10	6556623.65
B3-38	410993.56	6068972.00
B3-Z1	410272.52	6189563.63

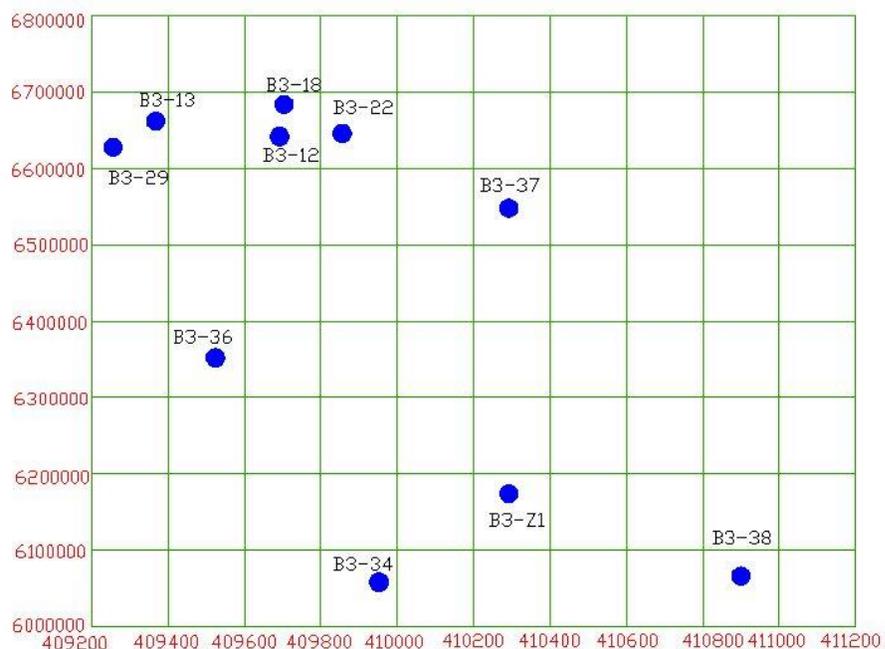


Figura 3.7 - Localização de furo de sondagem com recuperação de testemunhos

3.4 Furos de Desmorte

A campanha de furos de desmorte foi composta de 35 furos (de comprimento variando entre 18 e 20m) dispostos na uma área de lavra de 50 x 50m com espaçamento de furos de 10 x 10 metros. Esses furos foram feitos acima de bancada. Os furos foram feitos com diâmetros de 7 cm com perfuratriz da equipe de desmorte da mina (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Furo de desmorte e perfuratriz de desmorte respectivamente

As coordenadas de furos de desmonte são mostradas na Tabela 3.2 e na Figura 3.9, observa-se a localização dos furos.

Tabela 3.2 - Coordenadas dos furos de desmonte

Furo	Coordenada Norte	Coordenada Leste
B3-200	409328.97	6668991.60
B3-201	409336.54	6668998.22
B3-202	409344.39	6669004.36
B3-203	409352.17	6669010.51
B3-204	409359.84	6669016.82
B3-205	409367.54	6669023.20
B3-206	409374.79	6669016.22
B3-207	409367.16	6669010.01
B3-208	409359.29	6669003.64
B3-209	409351.65	6668997.22
B3-210	409343.86	6668991.00
B3-211	409336.31	6668984.58
B3-212	409351.08	6668984.08
B3-213	409358.90	6668990.32
B3-214	409366.65	6668996.82
B3-215	409374.48	6669003.31
B3-216	409381.99	6669009.31
B3-217	409389.18	6669002.34
B3-218	409381.51	6668996.21
B3-219	409373.85	6668989.87
B3-220	409366.08	6668983.56
B3-221	409358.49	6668977.11
B3-222	409350.10	6668970.50
B3-223	409357.87	6668963.76
B3-224	409364.70	6668957.77
B3-225	409373.27	6668976.58
B3-226	409380.70	6668982.94
B3-227	409388.82	6668989.14
B3-228	409396.66	6668995.81
B3-229	409404.41	6668989.48
B3-230	409395.69	6668982.77
B3-231	409387.96	6668976.81
B3-232	409380.00	6668970.61
B3-233	409372.18	6668964.36
B3-234	409364.70	6668957.77

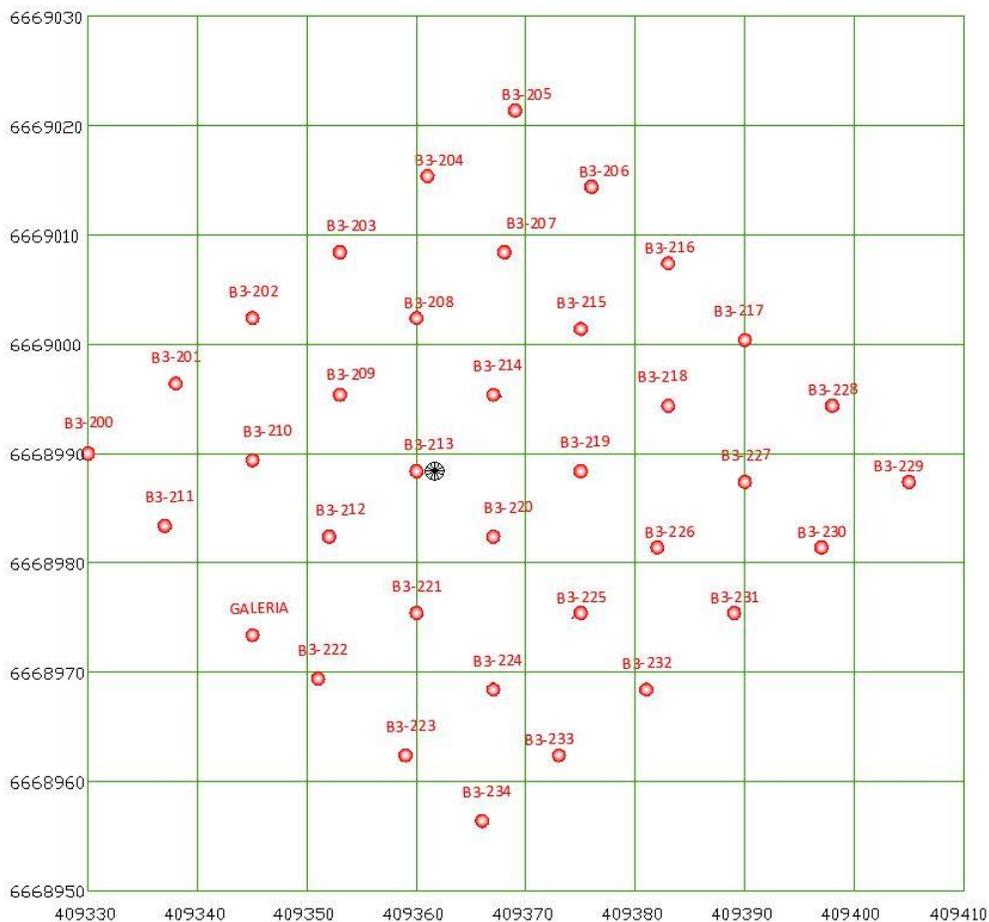


Figura 3.9 - Localização dos furos de desmorte

3.5 Execução de Perfilagem Geofísica

A perfilagem geofísica foi realizada em duas campanhas. A primeira campanha foi dos furos de sondagem com recuperação de testemunhos: 10 furos foram perfilados com as sondas de resistividade e emissão natural de radiação gama. A segunda campanha ocorreu nos furos de desmorte, na uma área de lavra de 50 m x 50 m: 35 furos foram perfilados com as mesmas sondas.

3.5.1 Coleta dos Dados por Perfilagem Geofísica

A sonda aplicada nos furos para obter registros dos perfis de resistividade e emissão natural de radiação gama é chamada sonda GLOG® (*Focussed Electric (Guard) Log Sonde*).

3.5.1.1 Sonda GLOG® - Focused Electric (Guard) Log Sonde

Essa sonda mede a resistividade das formações litológicas com o uso de focalizadores (item 2.2.3.2). Na sonda, é incorporado um cintilômetro para também medir a emissão natural de radiação gama (item 2.3.4.2).

A sonda exibe um volume de investigação em formato disco (Figura 2.7), possuindo focalizadores de corrente com uma resolução vertical do tamanho do eletrodo de corrente (localizado entre os focalizadores) que tem um comprimento de 10 cm (de acordo com a fabricante da sonda).

O manuseio da sonda é simples e sem cuidados especiais, pois seu funcionamento requer pequenas correntes elétricas.

A sonda possui um comprimento de 2,76 m, um diâmetro de 38 mm e um peso de aproximadamente 8 kilogramas. Na Figura 3.10, uma ilustração da sonda GLOG® dentro um furo.

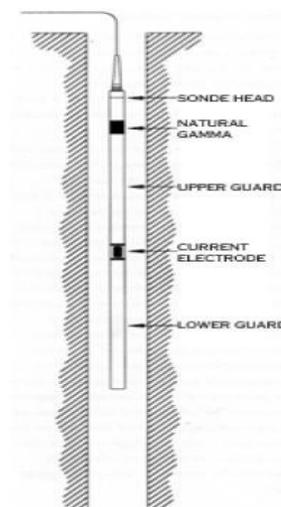


Figura 3.10 - Sonda GLOG® - Focussed Electric (Guard) Log Sonde

3.5.1.2 Registro da Resistividade

Na maioria dos casos, a perfilagem é realizada do fim de furo até o início. As medidas feitas pela sonda são recebidas por um equipamento denominado unidade de aquisição que as envia para o computador.

É mostrado em Figura 3.11, um registro de emissão natural de radiação gama (esquerda) representada pela linha azul com uma escala em API e resistividade das formações litológicas, (direita) representada pela linha preta com uma escala em ohm.m. Na coluna central, aparece a profundidade do perfil.

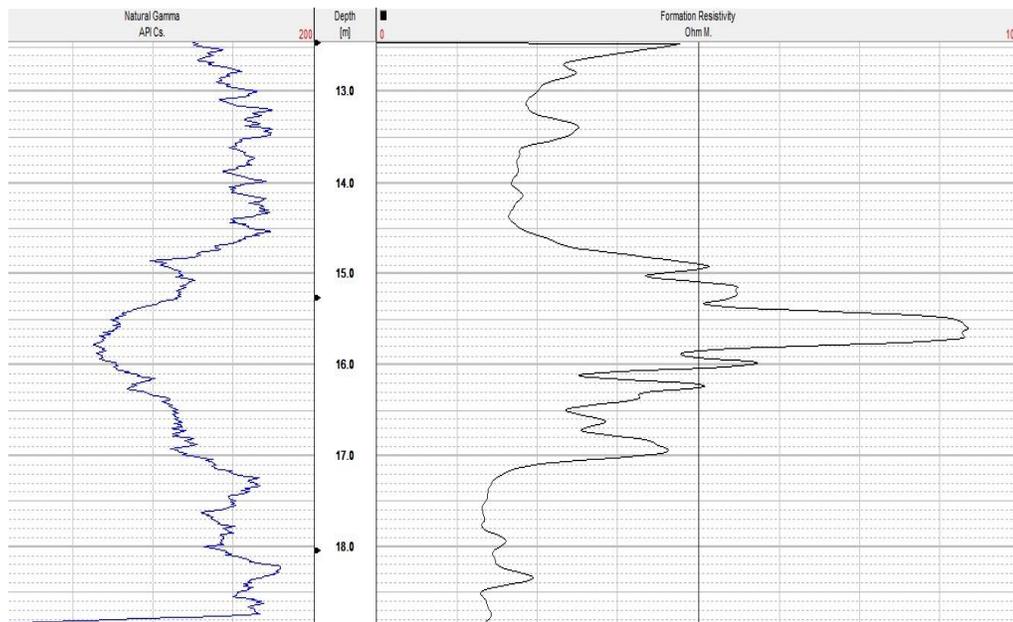


Figura 3.11 - Exemplo do perfil obtido com a sonda GLOG®.

3.6 Tratamento dos Dados

Existem dois grupos diferentes de dados da área investigada para serem tratados. São os dados de sondagem com recuperação de testemunhos e os dados de perfilagem geofísica.

3.6.1 Dados de Análise de Recuperação de Testemunhos de Sondagem

As informações de interesse dos testemunhos recuperados são obtidas via análise laboratorial. Antes de serem levados para análise, os testemunhos (Figura 3.6) foram usados para

descrever a coluna estratigráfica em cada furo de sondagem. Isso é um método direto e muito eficaz para obter informações e usá-las para modelar e avaliar um depósito quando houver recuperação total de testemunhos. Apresenta-se na Figura 3.12, um trecho de uma coluna estratigráfica da Área B3.

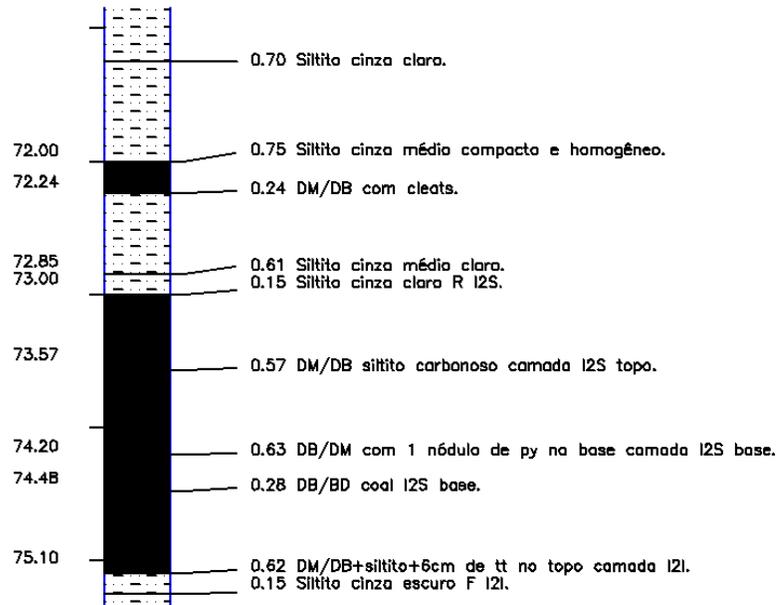


Figura 3.12 - Um trecho de uma coluna estratigráfica de um furo de sondagem na Área B3

Após o passo de construção de coluna estratigráfica, foram tiradas amostras para o laboratório. As amostras foram compostas de todo material recuperado que incluiu as partes representativas de camadas de carvão, além do material em torno de 15 cm acima e abaixo de cada camada de carvão e todo outro material descoberto como arenito e siltito. A análise laboratorial das amostras envolveu a determinação da densidade (ρ) pelo método afunda – flutua e determinação a conteúdo de teor de cinzas (Cz). O trabalho de análise laboratório das amostras foi feito pela própria empresa, Copelmi Mineração Ltda.

3.6.1.1 Determinação da Densidade

Para a determinação da densidade das amostras, seguiu-se a norma ISO 7936 “Coal Cleaning Tests – General Directions for the Determination and Presentation of Float and Sink

Characteristics” que descreve os procedimentos e utensílios necessários para determinar características de flutuabilidade de carvões em meios de densidade relativa diferentes. Seguindo Webber (2008), o procedimento se iniciou com o espalhamento do material sobre um material impermeável para uma secagem parcial para facilitar a posterior homogeneização da amostra.

Para a obtenção dos meios com densidade relativa contrastante foi utilizada uma mistura de água e Bromofórmio (CHBr_3), cuja elevada densidade relativa de aproximadamente $2,76 \text{ g/cm}^3$ permite a obtenção de diversos meios densos. De acordo com a norma seguida, foram preparados nove meios densos de densidade 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1 e $2,2 \text{ g/cm}^3$. Para facilitar a preparação dos meios, foi utilizada a seguinte equação que auxilia na determinação dos volumes necessários:

$$V_m = V_t \cdot \frac{\rho_t - \rho_p}{\rho_m - \rho_p} \quad (3.1)$$

onde V_m é o volume de Bromofórmio necessário, V_t é o volume da mistura desejada (volume do recipiente), ρ_m é a densidade relativa do líquido mais denso, ρ_t é a densidade desejada da mistura e ρ_p é a densidade relativa do líquido menos denso.

Na Figura 3.13, é possível observar a preparação de um meio denso com o uso de Bromofórmio e na Figura 3.14 o meio denso sendo despejado na cuba usada para a separação do material.



Figura 3.13 - Preparação de um meio denso com Bromofórmio



Figura 3.14 - Meio denso sendo despejado na cuba

O teste iniciou com a introdução da amostra na cuba contendo o meio denso de menor densidade ($1,4 \text{ g/cm}^3$). Uma leve agitação manual facilita a flutuação de material preso e após

alguns minutos de espera foi possível coletar o material flutuado com a ajuda de uma concha (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Coleta do material flutuado com ajuda de uma concha

O material flutuado foi lavado e secado para retirar qualquer resíduo do meio denso e após a sua pesagem foi armazenado para a futura análise de teor de cinzas.

O material afundado é coletado com ajuda de um cesto adaptado ao interior da cuba e despejado em uma base para secagem e descontaminação do meio denso (Figura 3.16).



Figura 3.16 - Material afundado coletado com ajuda de um cesto

Após a completa secagem do material afundado, ele foi levado até o meio denso de densidade relativa imediatamente superior ($1,5 \text{ g/cm}^3$) e repetiu-se todo o processo até o meio denso de densidade $2,2 \text{ g/cm}^3$.

Tendo o peso da massa flutuada em cada uma das frações, incluindo a massa afundada no meio denso de $2,2 \text{ g/cm}^3$, estimou-se a massa total da amostra, então, sabendo as densidades dos meios, massa das frações e massa total, calculou-se a média ponderada para estimar a densidade natural das amostras de acordo com:

$$\rho = \sum_{n=1}^N \rho_{tn} \cdot \frac{m_{tn}}{M}, \quad n = 1, \dots, N, \quad (3.2)$$

onde ρ é a densidade da amostra, ρ_{tn} é a densidade do meio denso n , m_{tn} é a massa da amostra flutuada no meio denso n e M é a massa total da amostra. Neste cálculo, a fração de massa que afundou no meio denso de densidade $2,2 \text{ g/cm}^3$ foi considerada flutuada em um meio denso hipotético de densidade $2,3 \text{ g/cm}^3$.

3.6.1.2 Determinação do Teor de Cinzas

Para a determinação do Teor de Cinzas (Cz) foram seguidos os passos descritos na norma NBR 8289 de dezembro de 1983, intitulada “Carvão Mineral – Determinação do Teor de Cinzas”. O método baseia-se na determinação da massa do resíduo mineral, resultante da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos da amostra em forno mufla, sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera.

Segundo Webber (2008), o procedimento iniciou com a calcinação e pesagem dos cadinhos usados para armazenamento das amostras. Com o auxílio de uma espátula, coletou-se aproximadamente 1 g de amostra (m_1) com precisão de 0,0001 g. Nesta etapa, é necessário coletar uma amostra duplicada. A pesagem da amostra pode ser vista na Figura 3.17.



Figura 3.17 - Pesagem da amostra

Os cadinhos (amostra mais duplicata) são colocados no forno de mufla a uma temperatura de 775 ± 25 °C, primeiramente, próximos da entrada do forno por 2 minutos para evitar arraste mecânico de material. Após os 2 minutos, os cadinhos são posicionados no interior do forno e lá mantidos por 60 minutos. Passado esse tempo, confere-se se houve a combustão completa pela inspeção visual em busca de pontos negros no material. Quando não há combustão completa, os

cadinhos são devolvidos ao forno e mantidos lá por mais 30 minutos. Na Figura 3.18, mostra-se uma imagem dos cadinhos sendo colocados no interior do forno mufla.



Figura 3.18 - Cadinhos contendo as amostras sendo inseridos no forno de mufla

Após serem retirados do forno de mufla, os cadinhos são posicionados sobre uma placa de amianto para a redução de temperatura. Logo que a temperatura dos cadinhos alcança a temperatura ambiente, são efetuadas as pesagens (m_2).

Para a determinação dos resultados, foram utilizadas as seguintes equações:

$$\% \text{ de cinzas (base úmida)} = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100 \quad (3.3)$$

e

$$\% \text{ de cinzas (base úmida)} = \frac{\% \text{ de cinzas (base úmida)}}{100 - U_A} \quad (3.4)$$

onde m_1 é a massa da amostra em gramas, m_2 é a massa do resíduo após a queima em gramas e U_A é a percentagem da umidade de análise ou de higroscopia (conforme a NBR 8293).

3.6.1.3 Resultados de Análise de Laboratório de Testemunhos de Sondagem

Os resultados das análises de laboratório das amostras de testemunhos recuperados podem ser observados na Tabela 3.3, principalmente para as camadas de carvão.

Tabela 3.3 - Resultado da análise de laboratório das amostras de testemunhos recuperados, das camadas em investigação na Área B3: S, M1 e I1.

Furo	Camada	Cinza Laboratório (%)	Densidade Laboratório (g/cm ³)
B3-12	M1	46,30	1,69
B3-13	M1	44,90	1,66
B3-18	M1	47,60	1,66
B3-22	M1	56,60	1,80
B3-29	M1	47,40	1,65
B3-29	I1	48,50	1,75
B3-34	S	46,50	1,73
B3-34	I1	51,40	1,85
B3-36	I1	49,10	1,74
B3-37	S	48,90	1,72
B3-37	M1	48,10	1,77
B3-37	I1	52,70	1,77
B3-38	M1	45,70	1,63
B3-Z1	S	50,50	1,75
B3-Z1	M1	47,30	1,72

É importante ser notado que só foram levadas em consideração as informações e resultados que pertencem às camadas de S, M1 e I1, pois são as camadas em investigação na área a ser lavrada. Além disso, existem algumas camadas que não apresentam resultados de análise de laboratório, geralmente por conta da baixa recuperação de testemunho nestes trechos, o que impediu sua análise (resultados na Tabela 3.3).

3.6.2 Tratamento dos Dados obtidos por Perfilagem Geofísica

Primeiramente, foi feito a conciliação entre os perfis de perfilagem geofísica de sondagens e as colunas estratigráficas criadas usando os testemunhos recuperados das sondagens. Em seguida, os perfis geofísicos das sondagens que estavam no formato gráfico (Figura 3.11), foram

convertidos em formato texto. Após a conversão, foi feito os cálculos dos valores dos parâmetros medidos para cada formação. Na Figura 3.19, apresenta-se um perfil no formato de texto.

VERS. 2.0 : CWLS LOG ASCII STANDARD - VERSION 2.0			
COMP.	COPELMI	:	COMPANY NAME
WELL.	B3 - 210	:	WELL NAME
FLD.	BUTIA	:	FIELD NAME
#-----			
~CURVE INFORMATION			
#MNEMO.	UNIT	API CODE	CURVE DESCRIPTION
#-----			
DEPTH.M	:	0	Depth
RES.Ohm M.	:	1	Formation Resistivity
NGAM.API Cs.	:	2	Natural Gamma
#-----			
~A	DEPTH	RES	NGAM
	3.06	25.67	475.74
	3.07	25.69	473.50
	3.08	25.75	468.20
	3.09	25.82	475.84
	3.10	25.89	474.41
	3.11	25.96	478.69
	3.12	26.05	480.73
	3.13	26.13	478.49
	3.14	26.20	150.83
	3.15	26.29	156.84
	3.16	26.38	154.09
	3.17	26.51	153.58
	---	---	---

Figura 3.19 - Um perfil no formato de texto

No caso de furos de desmonte, não existe recuperação de testemunhos. Por outro lado, observando os perfis na tela do computador e sabendo como os parâmetros medidos se comportam quando existe uma camada de carvão, foi possível identificar cada uma delas e determinar a sua profundidade e espessura. Em seguida, foi feito a conversão ao formato de texto para os cálculos dos valores dos parâmetros medidos para cada camada de carvão.

3.6.2.1 Conciliação entre Perfilagem Geofísica e Sondagem

O objetivo de conciliação entre um perfil de perfilagem e a coluna estratigráfica definida pela sondagem, é para ver a resposta de cada uma e determinar se elas são idênticas. Elas devem ser idênticas, pois foram obtidos no mesmo furo. A conciliação ajuda a estimar o valor médio dos parâmetros medidos por perfilagem geofísica para cada camada de carvão e outras formações de interesse. Em seguida, é mostrado como a conciliação foi feita. Foi visto que na região de camadas de carvão, a emissão natural de radiação gama diminui e a resistividade aumenta. Então, foi

possível definir os trechos do perfil que correspondem às camadas de carvão de interesse (Figura 3.20).

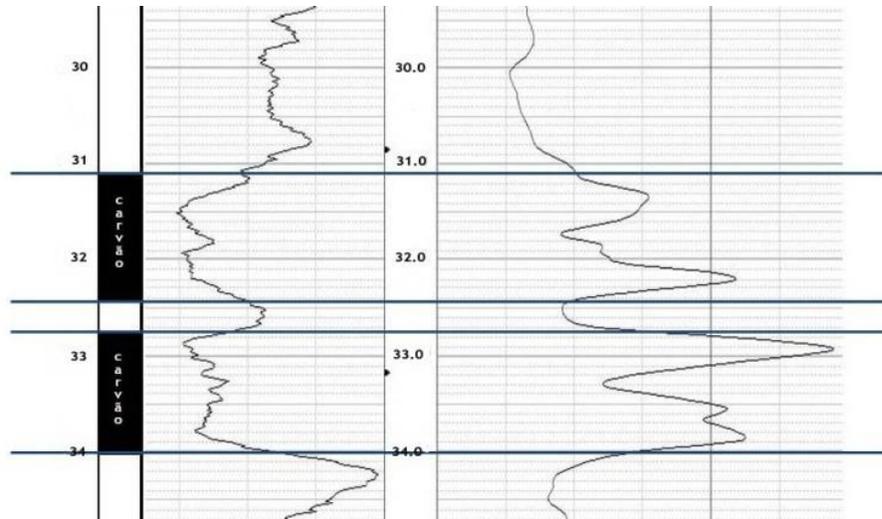


Figura 3.20 - Definição dos trechos do perfil geofísico que pertencem às camadas de carvão (definição de topo e base das camadas)

Na Figura 3.20, as linhas azuis delimitam as camadas de carvão e indicam a profundidade do topo e base de cada camada baseados nas informações dadas pela sondagem. Sabendo as profundidades exatas das camadas, foi possível calcular o valor médio da emissão natural de radiação gama e da resistividade respectivamente, entre o topo e a base de cada camada de carvão, utilizando o perfil geofísico em formato texto.

Na Figura 3.21, é mostrado como foi feito o cálculo de valor médio dos parâmetros, o gama natural e a resistividade da primeira camada de carvão. Os valores lidos no intervalo demarcado são usados para definir o valor médio.

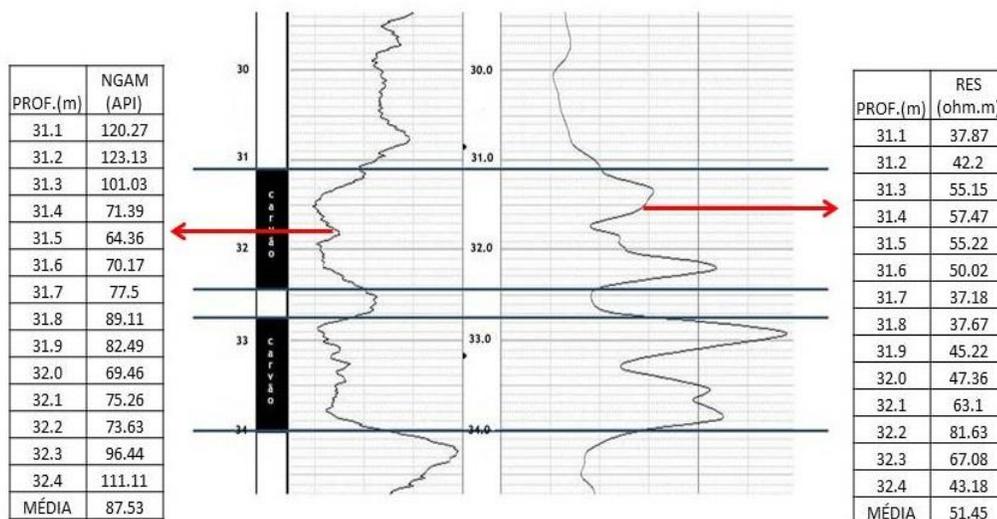


Figura 3.21 - Definição dos trechos do perfil que pertence às camadas de carvão via conciliação e o cálculo de valores médios dos parâmetros

Tabela 3.4 - Valores médios calculados de gama natural e de resistividade das camadas de carvão nos furos de sondagem na Área B3

Furo	Camada	Resistividade (ohm.m)	Gama Natural (API)
B3-12	M1	47,70	85,60
B3-13	M1	33,90	57,00
B3-18	M1	16,70	74,70
B3-22	M1	37,80	122,00
B3-29	M1	51,20	94,90
B3-29	I1	58,10	91,20
B3-34	S	33,70	88,40
B3-34	I1	24,30	106,00
B3-36	I1	28,00	90,70
B3-37	S	6,70	98,50
B3-37	M1	12,50	91,40
B3-37	I1	10,10	100,50
B3-38	M1	39,80	88,70
B3-Z1	S	33,10	91,10
B3-Z1	M1	35,90	87,80

3.6.2.2 Interpretação de Perfis Geofísicos de Furos de Desmonte

Com respeito aos furos de desmonte, não existe recuperação de testemunhos. Seguindo o princípio em que a emissão natural de radiação gama diminui e a resistividade aumenta quando aparece uma camada de carvão, foi possível definir os trechos do perfil que pertence às camadas. Com a orientação do geólogo da empresa, verificou-se que havia apenas três camadas de carvão (S, M1 e I1) na área a ser lavrada, onde foram feitos os 35 furos de desmonte que foram perfilados. Isso também foi visto em todos os perfis de furos de desmonte (ANEXO C).

A prática de determinação do topo e da base da camada para poder determinar a espessura de uma camada de carvão, é baseada sobre uma regra fundamental. Cada um é determinado como um ponto médio entre dois pontos de inflexão na anomalia de resistividade no início e no final de uma camada de carvão. Essa regra é adotado para evitar interpretação errada devido à interferência da litologia do teto e chão da camada nos registros geofísicos e também tendo em conta o volume de investigação dado pela sonda utilizada. Às vezes, pode haver algum desvio a esta regra, mas isso é baseado no critério do intérprete do perfil.

Após a identificação das camadas, o processo de tratamento foi o mesmo dado aos perfis dos furos de sondagem.

A Figura 3.22 apresenta a definição de trechos do perfil que pertencem às camadas de carvão no um furo de desmonte.

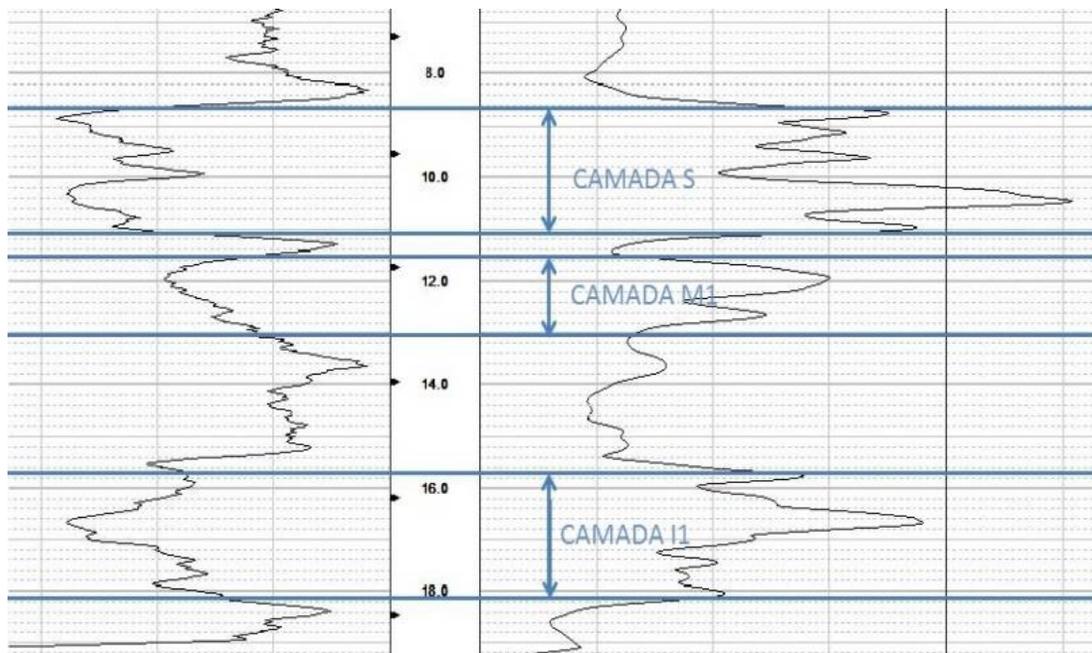


Figura 3.22 - Definição dos trechos do perfil que pertencem às camadas de carvão no um furo de desmonte

3.6.3 Construção de Banco de Dados

Dois bancos de dados foram construídos: o primeiro com base em dados de furos de sondagem com recuperação de testemunho, contendo resultados de análises de laboratório e de perfilagem com resistividade e gama natural. O segundo consistiu dados de perfilagem com resistividade e gama natural nos furos de desmonte (Tabela B.1). Nos dois bancos de dados, somente foram contempladas as camadas S, M1 e I1, pois foram aquelas que foram lavradas durante este estudo. A combinação de Tabela 3.3 e 3.4 cria uma tabela única de dados dos furos de sondagem (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Valores médios calculados de gama natural e de resistividade das camadas de carvão nos furos de sondagem e resultados de análise laboratorial das amostras de testemunhos recuperados nesses furos de sondagem na Área B3

Furo	Camada	Resistividade (ohm.m)	Gama Natural (API)	Cinza Laboratório (%)	Densidade Laboratório (g/cm ³)
B3-12	M1	47,70	85,60	46,30	1,69
B3-13	M1	33,90	57,00	44,90	1,66
B3-18	M1	16,70	74,70	47,60	1,66
B3-22	M1	37,80	122,00	56,60	1,80
B3-29	M1	51,20	94,90	47,40	1,65
B3-29	I1	58,10	91,20	48,50	1,75
B3-34	S	33,70	88,40	46,50	1,73
B3-34	I1	24,30	106,00	51,40	1,85
B3-36	I1	28,00	90,70	49,10	1,74
B3-37	S	6,70	98,50	48,90	1,72
B3-37	M1	12,50	91,40	48,10	1,77
B3-37	I1	10,10	100,50	52,70	1,77
B3-38	M1	39,80	88,70	45,70	1,63
B3-Z1	S	33,10	91,10	50,50	1,75
B3-Z1	M1	35,90	87,80	47,30	1,72

3.7 Área de Lavra

Usou-se uma área de 50 x 50m, junto ao talude, onde foram lavradas só três camadas (S, M1 e I1). Cada camada foi lavrada em três partes (três tiras), pesada e estocada em separado. A camada I1 só teve duas partes lavradas porque houve um deslizamento no talude, enterrando a terceira parte de camada I1.

Antes de iniciar a operação de lavra e logo após, a área era medida pela equipe de topografia, sendo toda área, portanto, georreferenciada. Assim, utilizando a software AutoCAD[®], foi possível calcular a área (m²) que cada camada ocupava. Sabendo a densidade média do carvão e a espessura da camada no local, era possível calcular as respectivas massas lavradas. A Tabela 3.6 apresenta os valores de massas dados pelo controle de produção da usina.

Tabela 3.6 – Valor de massa produzida e área ocupada pelas tiras lavradas: camadas S, M1 e I1

Camada	Parte	Massa Produzida (t)	Área (m ²)
S	1	1875	672
S	2	1938	882
S	3	1718	896
M1	1	1171	657
M1	2	1271	1008
M1	3	1838	785
I1	1	1168	686
I1	2	1983	926

3.7.1 Esquema de Lavra

Na Figura 3.23, é mostrado o esquema de lavra de camada S.

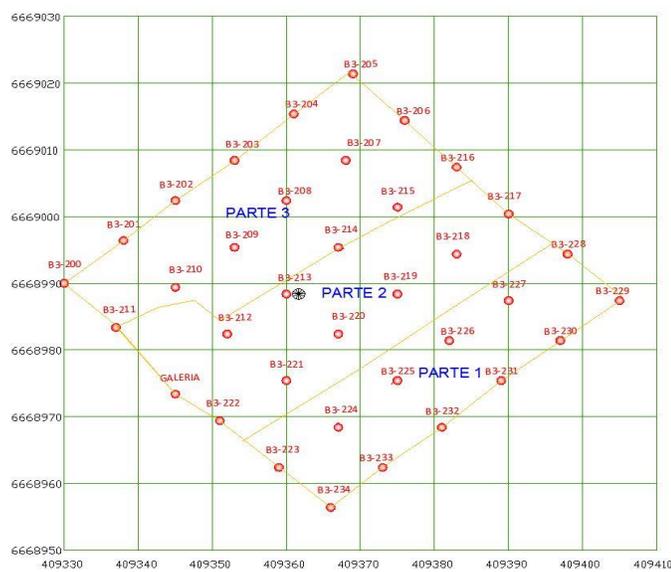


Figura 3.23 - Esquema de lavra de camada S

Na Figura 3.24, é mostrado o esquema de lavra de camada M1.

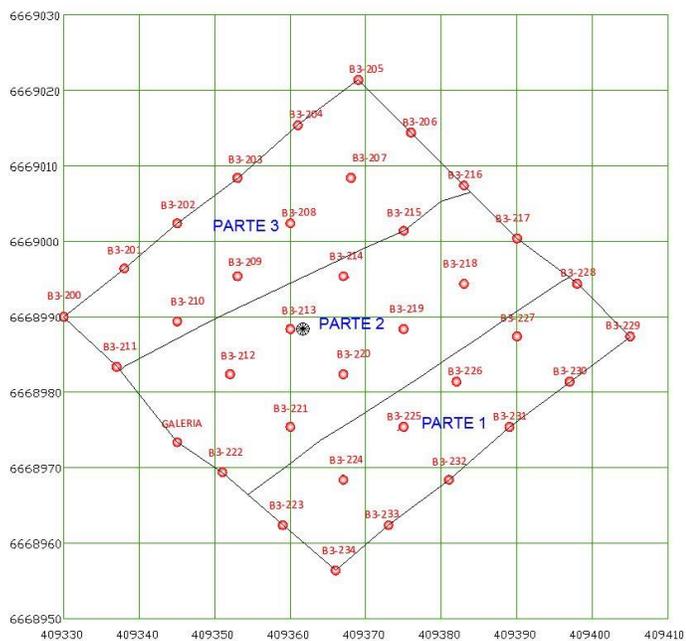


Figura 3.24 - Esquema de lavra de camada M1

Na Figura 3.25, é mostrado o esquema de lavra de camada I1.

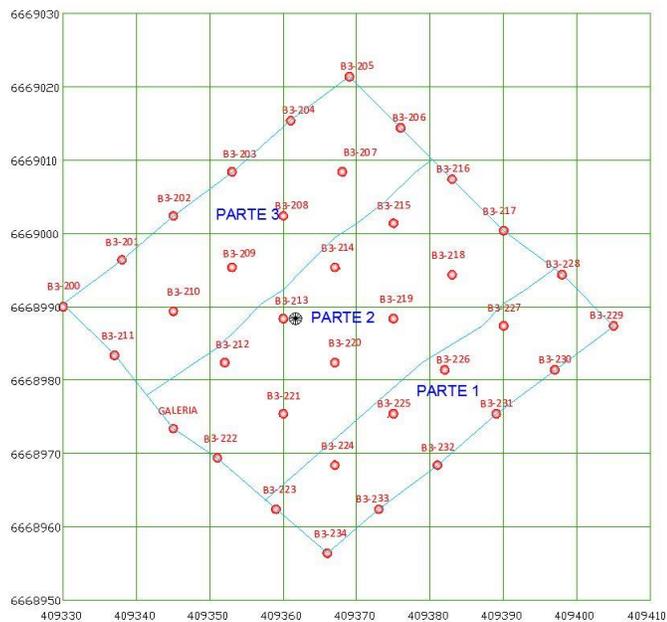


Figura 3.25 - Esquema de lavra de camada I1

3.7.2 Amostragem em Pilhas de Camadas Lavradas

De cada pilha, foram coletadas amostras ROM, levadas ao laboratório para determinar os teores de cinzas (%). Os resultados de análise laboratório das amostras ROM de carvão apresentam-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Valores de teor de cinzas das amostras ROM de carvão

Camada	Parte	Cinzas ROM (%)
S	1	47.57
S	2	48.58
S	3	53.31
M1	1	53.52
M1	2	51.51
M1	3	60.03
I1	1	51.60
I1	2	58.20

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, será discutida a metodologia e analisados os resultados.

4.1 Relação entre os Parâmetros de Qualidade de Carvão e de Perfilagem Geofísica

A qualidade do carvão, em questão, é estimada de acordo com determinados parâmetros (físicos e químicos) como a densidade, teor de cinzas, etc. Geralmente, os valores destes parâmetros são obtidos por meio de análises laboratoriais de amostras de testemunhos recuperados em furos de sondagem. **O mais importante de todos os parâmetros de qualidade de carvão, é o teor de cinzas que é representado em % peso do resíduo de combustão.** Então, um alto valor de teor de cinzas implica no um menor valor econômico de carvão em questão.

Os equipamentos de perfilagem geofísica podem medir vários parâmetros entre eles a emissão natural de radiação gama, a radiação gama retro espalhada, resistividade, dentre outros. O comportamento desses parâmetros pode ser correlacionado com os parâmetros de qualidade de carvão. A Figura 4.1 apresenta-se a relação entre os parâmetros de interesses (físicos e químicos).

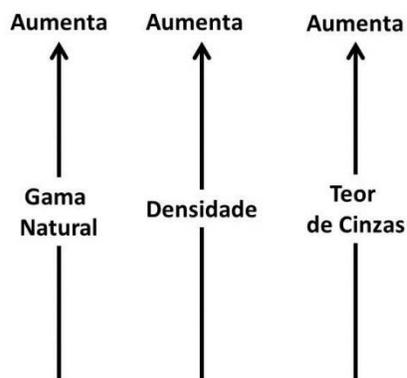


Figura 4.1 - Relação entre emissão natural de radiação gama e parâmetros de qualidade do carvão

4.2 Equações de Ajuste ou Calibração

De Tabela 3.6, foram estabelecidas duas equações com base em correlações:

- (i) Correlação entre os dados de densidade e cinzas de amostras de testemunho analisadas em laboratório, $y = 0,0149x + 1,0012$, sendo x as cinzas (%) e y a densidade (g/cm^3).
- (ii) Correlação entre os valores de gama natural das camadas de carvão (provenientes da perfilagem dos furos de sondagem) e cinzas de amostras de testemunho analisadas em laboratório, $y = 0,1761x + 32,704$, sendo x a contagem de gama natural (API) e y as cinzas (%).

A Figura 4.2 mostra a correlação existente entre os valores de densidade e cinzas de amostras de testemunho analisadas em laboratório. O coeficiente de regressão dessa correlação ficou em torno de 0,6 (R^2), sendo que o erro relativo para as estimativas de densidade ficou dentro do intervalo de $\pm 5\%$ para a campanha de furos de sondagem com recuperação de testemunhos (Tabela 4.1).

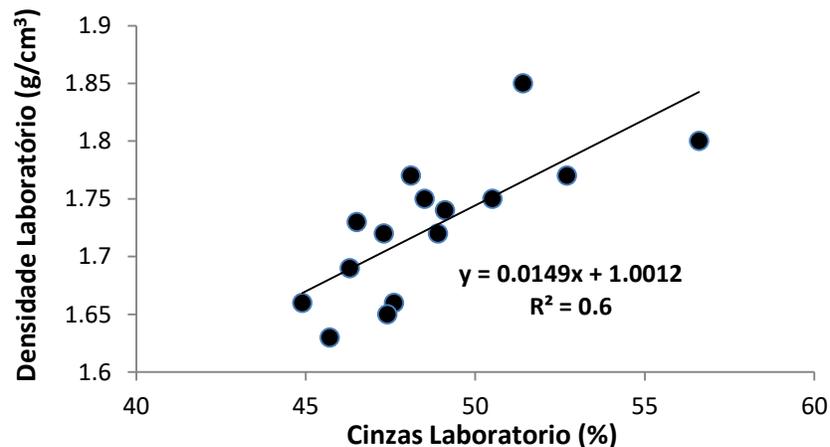


Figura 4.2 - Correlação entre valores de densidade e cinzas de amostras de testemunho

Tabela 4.1 - Valores de cinzas de amostras de testemunhos e densidade: estimativas e erros na previsão da densidade com base nas cinzas laboratório

Furo	Camada	Cinza Lab. (%)	Densidade Laboratório (g/cm ³)	Densidade Estimada (g/cm ³)	Erro Absoluto (g/cm ³)	Erro Relativo (%)
B3-12	M1	46,3	1,69	1,69	0,00	0,06
B3-13	M1	44,9	1,66	1,67	0,01	0,62
B3-18	M1	47,6	1,66	1,71	0,05	3,04
B3-22	M1	56,6	1,8	1,84	0,04	2,47
B3-29	M1	47,4	1,65	1,71	0,06	3,48
B3-29	I1	48,5	1,75	1,72	-0,03	-1,49
B3-34	S	46,5	1,73	1,69	-0,04	-2,08
B3-34	I1	51,4	1,85	1,77	-0,08	-4,48
B3-36	I1	49,1	1,74	1,73	-0,01	-0,41
B3-37	S	48,9	1,72	1,73	0,01	0,57
B3-37	M1	48,1	1,77	1,72	-0,05	-2,94
B3-37	I1	52,7	1,77	1,79	0,02	0,93
B3-38	M1	45,7	1,63	1,68	0,05	3,20
B3-Z1	S	50,5	1,75	1,75	0,00	0,21
B3-Z1	M1	47,3	1,72	1,71	-0,01	-0,82

A Figura 4.3 mostra a correlação existente entre valores de gama natural e cinzas de amostras de testemunho analisadas em laboratório. O coeficiente de regressão ficou em torno de 0,7 (R^2), sendo que o erro relativo para as estimativas de cinzas ficou no intervalo de $\pm 6\%$ (Tabela 4.2). Ou seja, a despeito da baixa correlação obtida entre cinzas e gama natural, os valores mostrados na Tabela 4.2 resultaram em erros pequenos.

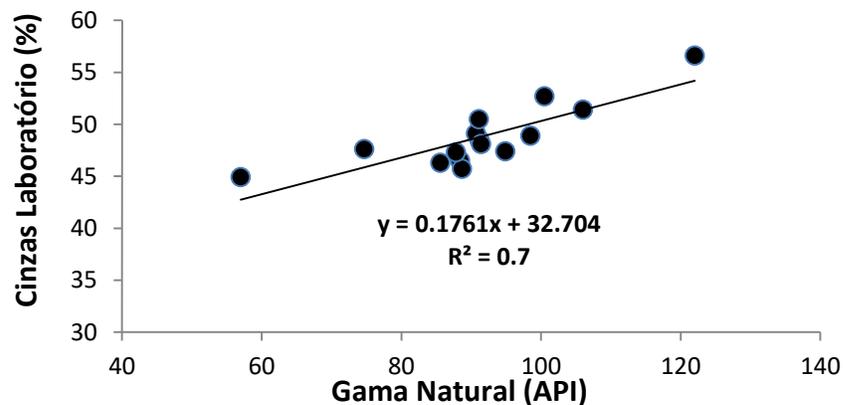


Figura 4.3 - Correlação entre valores de gama natural e cinzas de amostras de testemunho

Tabela 4.2 - Valores de gama natural e cinzas de amostras de testemunhos: estimativas e erros na previsão das cinzas das amostras de testemunho com base no gama natural

Furo	Camada	Gama Natural (API)	Cinza Laboratório (%)	Cinza Estimada (%)	Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
B3-12	M1	85,60	46,30	47,78	1,48	3,19
B3-13	M1	57,00	44,90	42,74	-2,16	-4,81
B3-18	M1	74,70	47,60	45,86	-1,74	-3,66
B3-22	M1	122,00	56,60	54,19	-2,41	-4,26
B3-29	M1	94,90	47,40	49,42	2,02	4,25
B3-29	I1	91,20	48,50	48,76	0,26	0,54
B3-34	S	88,40	46,50	48,27	1,77	3,81
B3-34	I1	106,00	51,40	51,37	-0,03	-0,06
B3-36	I1	90,70	49,10	48,68	-0,42	-0,86
B3-37	S	98,50	48,90	50,05	1,15	2,35
B3-37	M1	91,40	48,10	48,80	0,70	1,45
B3-37	I1	100,50	52,70	50,40	-2,30	-4,36
B3-38	M1	88,70	45,70	48,32	2,62	5,74
B3-Z1	S	91,10	50,50	48,75	-1,75	-3,47
B3-Z1	M1	87,80	47,30	48,17	0,87	1,83

A resistividade não possui nenhuma correlação simples e linear com conteúdo de cinzas ou a densidade das amostras de testemunhos da sondagem. A resistividade só foi aplicada com a gama natural para identificar o topo e a base das camadas de carvão (Item 3.5.2.1).

4.3 Aplicação das Equações nos Furos de Desmonte

Como cada camada foi lavrada em três partes, é lógico que os furos de desmonte também serão divididos em três partes com referência as posições deles dentro da área de lavra com 10 a 13 furos em cada parte.

As equações de ajuste ou calibração foram aplicadas em todos os furos de desmonte em cada parte. Primeiro, foi aplicada a equação de previsão de cinzas com base no gama natural. Em seguida, os valores de cinzas estimadas foram colocados na equação de previsão de densidade com base na cinza estimada.

Então, as equações de item 4.2 levaram as formas:

$$CZ_{Est.} = 0.1761.GN + 32.704 \quad (4.1)$$

e

$$\rho_{Est.} = 0.0149.CZ_{Est.} + 1.0012 \quad (4.2)$$

onde $CZ_{Est.}$ é Cinza Estimada, GN é Gama Natural e $\rho_{Est.}$ é Densidade Estimada.

4.3.1 Camada S

Foram aplicadas as equações em furos de desmonte para estimar a cinza e a densidade de camada S em cada parte lavrada. No final, foi calculado o valor médio de espessura, de cinza estimada e densidade estimada para cada parte que foi lavrada. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Camada S: Valores de cinza estimada e de densidade estimada utilizando as equações

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
S	1	B3-223	1,50	73,79	45,70	1,68
S	1	B3-224	1,50	98,91	50,12	1,75
S	1	B3-225	1,90	78,27	46,49	1,69
S	1	B3-226	1,80	80,87	46,95	1,70
S	1	B3-227	1,50	86,04	47,86	1,71
S	1	B3-228	1,50	87,72	48,15	1,72
S	1	B3-229	1,60	89,77	48,51	1,72
S	1	B3-230	1,20	71,26	45,25	1,68
S	1	B3-231	1,30	84,51	47,59	1,71
S	1	B3-232	1,30	80,15	46,82	1,70
S	1	B3-233	1,10	74,46	45,82	1,68
S	1	B3-234	1,40	91,41	48,80	1,73
Média			1,47		47,34	1,71

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
S	2	B3-212	1,50	91,44	48,81	1,73
S	2	B3-213	1,10	81,64	47,08	1,70
S	2	B3-214	1,10	77,97	46,43	1,69
S	2	B3-216	1,10	72,17	45,41	1,68
S	2	B3-217	1,20	101,52	50,58	1,75
S	2	B3-218	1,10	79,92	46,78	1,70
S	2	B3-219	1,60	86,68	47,97	1,72
S	2	B3-220	1,20	79,60	46,72	1,70
S	2	B3-221	1,20	84,49	47,58	1,71
S	2	B3-222	1,20	90,09	48,57	1,72
Média			1,23		47,59	1,71

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
S	3	B3-200	1,10	82,14	47,17	1,70
S	3	B3-201	1,10	73,99	45,73	1,68
S	3	B3-202	1,00	82,12	47,17	1,70
S	3	B3-203	1,10	84,75	47,63	1,71
S	3	B3-204	1,30	90,36	48,62	1,73
S	3	B3-205	1,40	80,19	46,83	1,70
S	3	B3-206	1,30	80,57	46,89	1,70
S	3	B3-207	1,00	75,90	46,07	1,69
S	3	B3-208	1,00	72,19	45,42	1,68
S	3	B3-209	0,80	77,07	46,28	1,69
S	3	B3-210	1,20	77,39	46,33	1,69
S	3	B3-211	1,00	78,20	46,48	1,69
S	3	B3-215	1,00	68,95	44,85	1,67
Média			1,10		46,57	1,70

4.3.2 Camada M1

Foram aplicadas as equações em furos de desmonte para estimar a cinza e a densidade de camada M1 em cada parte lavrada. No final, foi calculado o valor médio de espessura, de cinza estimada e densidade estimada para cada parte que foi lavrada. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Camada M1: Valores de cinza estimada e de densidade estimada utilizando as equações

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
M1	1	B3-223	0,50	81,53	47,06	1,70
M1	1	B3-224	0,90	123,21	54,40	1,81
M1	1	B3-225	0,70	81,11	46,99	1,70
M1	1	B3-226	1,00	92,72	49,03	1,73
M1	1	B3-227	1,40	98,29	50,01	1,75
M1	1	B3-228	1,10	95,51	49,52	1,74
M1	1	B3-229	1,20	94,21	49,29	1,74
M1	1	B3-230	0,70	77,00	46,26	1,69
M1	1	B3-231	1,10	80,04	46,80	1,70
M1	1	B3-232	0,70	84,17	47,53	1,71
M1	1	B3-233	0,60	78,88	46,59	1,70
M1	1	B3-234	1,00	140,81	57,50	1,86
Média			0,91		49,25	1,74

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
M1	2	B3-211	0,70	92,55	49,00	1,73
M1	2	B3-212	0,70	85,45	47,75	1,71
M1	2	B3-213	0,50	94,35	49,32	1,74
M1	2	B3-214	0,70	99,85	50,29	1,75
M1	2	B3-215	0,80	81,04	46,98	1,70
M1	2	B3-216	0,70	88,07	48,21	1,72
M1	2	B3-217	0,50	79,29	46,67	1,70
M1	2	B3-218	1,10	95,01	49,44	1,74
M1	2	B3-219	0,60	93,61	49,19	1,73
M1	2	B3-220	0,60	79,79	46,76	1,70
M1	2	B3-221	0,50	108,45	51,80	1,77
M1	2	B3-222	0,50	77,72	46,39	1,69
Média			0,65		48,44	1,72

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
M1	3	B3-200	1,20	90,31	48,61	1,73
M1	3	B3-201	1,40	88,99	48,38	1,72
M1	3	B3-202	0,70	90,27	48,60	1,73
M1	3	B3-203	1,80	99,04	50,14	1,75
M1	3	B3-204	1,00	109,26	51,94	1,78
M1	3	B3-205	1,20	100,05	50,32	1,75
M1	3	B3-206	1,00	101,80	50,63	1,76
M1	3	B3-207	0,80	100,18	50,35	1,75
M1	3	B3-208	0,80	99,50	50,23	1,75
M1	3	B3-209	1,20	93,60	49,19	1,73
M1	3	B3-210	1,00	86,33	47,91	1,72
Média			1,10		49,66	1,74

4.3.3 Camada I1

Foram aplicadas as equações em furos de desmonte para estimar a cinza e a densidade de camada I1 em cada parte lavrada. No final, foi calculado o valor médio de espessura, de Cinza estimada e densidade estimada para cada parte que foi lavrada. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Camada I1: Valores de cinza estimada e de densidade estimada utilizando as equações

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
I1	1	B3-223	0,80	105,43	51,27	1,77
I1	1	B3-224	0,90	92,60	49,01	1,73
I1	1	B3-225	0,90	98,50	50,05	1,75
I1	1	B3-227	0,80	90,39	48,62	1,73
I1	1	B3-228	0,80	89,81	48,52	1,72
I1	1	B3-229	0,80	97,09	49,80	1,74
I1	1	B3-230	0,70	94,16	49,29	1,74
I1	1	B3-231	0,80	91,03	48,73	1,73
I1	1	B3-232	0,80	88,12	48,22	1,72
I1	1	B3-233	0,80	92,24	48,95	1,73
I1	1	B3-234	0,90	98,29	50,01	1,75
Média			0,82		49,32	1,74

Camada	Parte	Furo	Espessura (m)	Gama Natural (API)	Cinza Estimada (%)	Densidade Estimada (g/cm ³)
I1	2	B3-212	0,90	86,21	47,89	1,71
I1	2	B3-213	0,80	85,74	47,80	1,71
I1	2	B3-214	0,80	95,16	49,46	1,74
I1	2	B3-215	1,20	95,95	49,60	1,74
I1	2	B3-216	1,00	88,57	48,30	1,72
I1	2	B3-217	1,00	94,17	49,29	1,74
I1	2	B3-218	1,00	100,62	50,42	1,75
I1	2	B3-219	1,20	92,67	49,02	1,73
I1	2	B3-220	0,80	94,01	49,26	1,74
I1	2	B3-221	1,20	98,95	50,13	1,75
I1	2	B3-222	1,30	94,86	49,41	1,74
Média			1,02		49,14	1,73

4.4 Fator de Diluição

Durante a lavra das camadas de carvão, o estéril é lavrado junto (diluição). O valor médio de diluição nas camadas fica na margem de 0.1m de estéril incorporado ao carvão ROM. Por causa disso, foram ponderadas as cinzas médias estimadas das camadas, utilizando-se os valores de espessura de camada de carvão e espessura de estéril lavrado durante a lavra. Para obter os valores médios de cinzas do estéril, foi feita análise laboratorial das amostras de estéril no teto de camada S, entre a camada S-M1, M1-I1 ("partings") e na base da camada I1. As cinzas e densidade variam entre 70 a 87% com uma média de 80% e de 1,9 a 2,4 g/cm³ com uma média de 2 g/cm³ respectivamente.

Para ponderar as cinzas da camada da parte lavrada:

$$CZ_P = \frac{(CZ_{Est} \cdot Esp_c) + (CZ_e \cdot Esp_e)}{Esp_c + Esp_e} \quad (4.3)$$

onde CZ_P é a cinza média ponderada para a parte lavrada, CZ_{Est} é a cinza média estimada da camada da parte lavrada, Esp_c é a espessura média da camada da parte lavrada, CZ_e é a cinza de estéril e Esp_e é a espessura de estéril que é igual a 0,1m. A Tabela 4.6 apresenta-se os valores de cinzas estimadas ponderadas.

Tabela 4.6 - Valores de cinzas estimadas ponderadas, utilizando-se os valores de espessura de camada de carvão e a espessura média (0,1m) de estéril lavrado durante a lavra

Camada	Parte	Cinza Est. (%)
S	1	49,42
S	2	50,03
S	3	49,36
M1	1	52,29
M1	2	52,65
M1	3	52,19
I1	1	52,65
I1	2	51,90

No cálculo da massa produzida, também foi colocado o fator de diluição. As espessuras médias das camadas levaram um aumento de 0,1m, em média, correspondente ao estéril com uma densidade média de 2 g/cm³. Para calcular a massa produzida:

$$(A \cdot Esp_c \cdot \rho_{Est}) + (A \cdot Esp_e \cdot \rho_e) \quad (4.4)$$

onde A é a área de parte lavrada, Esp_c é a espessura média da camada da parte lavrada, ρ_{Est} é a densidade média estimada da camada da parte lavrada, Esp_e é a espessura de estéril que é igual a 0.1m e ρ_e é a densidade média do estéril.

4.5 Reconciliação entre Resultados de Análise Laboratorial de Amostras ROM e Perfilagem Geofísica dos Furos de desmonte

A Tabela 4.7 mostra os resultados para a previsibilidade das cinzas das partes lavradas de cada camada de carvão na área de estudo. O erro máximo relativo para as estimativas das cinzas foi aproximadamente 13%, considerando as oito partes lavradas. Por outro lado, das oito fatias, para cinco o erro relativo foi menor do que 4%. Acredita-se que devido à própria curva de calibração ter uma correlação baixa ($R^2=0,7$), esses são bons resultados. Ainda, quando observada a curva de calibração densidade versus cinzas (ambos dados provenientes de laboratório), cuja correlação é menor ($R^2=0,6$), ocorre um problema de imprecisão nestes dados. Com respeito aos dois ensaios, densidade e cinzas, embora eles sigam a norma internacional e brasileira respectivamente, sabe-se que estes são questionáveis. Diversos são os motivos, citam-se alguns: (i) a massa ensaiada com respeito à massa total do intervalo do testemunho que se quer

representar é pequena; (ii) faixas de teores de cinzas do depósito estudado está acima de 40% (a imprecisão é grande); (iii) a faixa de temperatura indicada para ensaio de cinzas poderia ter que ser diferente daquele indicada na norma para atingir maiores precisões. Quanto ao ensaio de densidade, podemos garantir, embora ele siga a ISO 7936 não se aplicaria os carvões do depósito B3, pois se tratam de camadas pouco espessas, muito friáveis (perda por finos) e com grandes variações locais. Portanto, embora para a empresa estes ensaios sejam satisfatórios, para fins de uso como valores de referência para validação de dados de perfilagem, eles deixam a desejar (a precisão e acuracidade dos dados de laboratório não foram divulgadas).

É certo que a densidade versus cinza possui elevada correlação, isto foi constatado em depósitos brasileiros (Webber et al., 2009) e no mundo (Kayal & Christoffel, 1989).

Tabela 4.7 - Valores de cinza das amostras da ROM estimados com base na perfilagem gama natural dos furos de desmonte, após correção da reconciliação (dados de diluição)

Camada	Parte	Cinza ROM (%)	Cinza Est. (%)	Erro Abs. (g/cm ³)	Erro Rel. (%)
S	1	47,57	49,42	1,85	3,89
S	2	48,58	50,03	1,45	2,98
S	3	53,31	49,36	-3,95	-7,42
M1	1	53,52	52,29	-1,23	-2,29
M1	2	51,51	52,65	1,14	2,21
M1	3	60,03	52,19	-7,84	-13,06
I1	1	51,60	52,65	1,05	2,04
I1	2	58,20	51,90	-6,30	-10,83

4.6 Reconciliação entre a Massa Lavrada e Calculada

Finalmente, na Tabela 4.8, são mostrados os dados usados no cálculo de reconciliação, considerando as diluições ocorridas no processo de lavra, tal que as espessuras registradas nos perfis sofrem um aumento de 0,1m, em média, correspondente a materiais estéreis de topo e base da camada com densidade média de 2 g/cm³. O erro máximo relativo para as estimativas das massas foi aproximadamente 10%, considerando as oito partes lavradas.

Ainda, a Tabela 4.8 mostra que a massa total produzida, registrada pela usina, foi de 12.962 t, sendo a massa recalculada, com base nos valores médios de densidade estimados por gama natural, em torno de 12.805 t, ou seja, resultando em uma diferença global de apenas 1%.

Tabela 4.8 - Cálculos de reconciliação: diferença entre a massa produzida e a calculada por meio de estimativas baseadas em perfilagem gama natural e erros, com respeito ao método tradicional de análises em laboratório de amostras ROM

Camada	Parte	Massa Produzida (t)	Área (m ²)	Espessura (m)		Densidade (g/cm ³)		Massa Recalculada (t)	Erro Absoluto (t)	Erro Relativo (%)
				Carvão	Estéril	Estim. Carvão	Lab. Estéril			
S	1	1875	672	1,47	0,1	1,71	2	1824	-51	-2,74
S	2	1938	882	1,23	0,1	1,71	2	2032	94	4,83
S	3	1718	896	1,10	0,1	1,70	2	1855	137	7,96
M1	1	1171	657	0,91	0,1	1,74	2	1172	1	0,06
M1	2	1271	1008	0,65	0,1	1,72	2	1329	58	4,53
M1	3	1838	785	1,10	0,1	1,74	2	1659	-179	-9,71
I1	1	1168	686	0,82	0,1	1,74	2	1116	-52	-4,45
I1	2	1983	926	1,02	0,1	1,73	2	1819	-164	-8,26
Total(t)		12.962						12.805		

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse capítulo apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento dessa dissertação e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Foi possível construir modelos tanto para previsão de cinzas como para previsão de densidade, a partir da perfilagem geofísica com gama natural, pois há uma correlação entre os parâmetros de interesse. Como podemos analisar pelos resultados, as estimativas das cinzas com base no gama natural, apresentam um erro relativo máximo de 13%.

A reconciliação entre massa lavrada, ROM e a calculada, por meio de estimativas baseadas em perfilagem geofísica, foi feita também. O erro relativo das estimativas com respeito à massa lavrada não excedeu 10%.

Assim, a reconciliação poderia ser feita com base apenas na perfilagem de furos de desmonte com gama natural tanto para a massa minerada como para a qualidade do ROM.

A perfilagem geofísica com gama natural e resistividade, portanto, mostrou-se como uma técnica bastante viável para obtenção de informações necessárias ao planejamento de lavra em curto prazo neste depósito, podendo, inclusive ser realizada em furos de desmonte com vistas à previsão da qualidade do carvão ROM.

Ainda, nota-se que das oito fatias, para cinco o erro relativo foi menor do que $\pm 4\%$. Acredita-se que devido à própria curva de calibração ter uma correlação baixa ($R^2=0,7$), esses são bons resultados. Ainda, pensa-se que, quando observada à curva de calibração densidade versus cinzas (ambos dados provenientes de laboratório), cuja correlação é menor ($R^2=0,6$), haja, em realidade, um problema de imprecisão nos dados de laboratório e/ou quanto à amostragem, uma vez que esta é feita nas pilhas e não nas correias de alimentação da usina (como deve ser feito). Com respeito aos dois ensaios, densidade e cinzas, embora eles sigam a norma internacional e brasileira respectivamente, sabe-se que estes são questionáveis. Diversos são os motivos, citam-

se alguns: (i) a massa ensaiada com respeito à massa total do intervalo do testemunho que se quer representar é pequena; (ii) faixas de teores de cinzas do depósito estudado está acima de 40% (a imprecisão é grande, leia-se a norma NBR 8289): (iii) a faixa de temperatura indicada para ensaio de cinzas poderia ter que ser diferente daquele indicada na norma para atingir maiores precisões enfim. Quanto ao ensaio de densidade, podemos dizer, embora ele siga a ISO 7936 não se aplicaria aos carvões do depósito B3, pois se tratam de camadas pouco espessas, muito friáveis e com grandes variações locais. Portanto, embora para a empresa estes ensaios sejam satisfatórios, para fins de uso como valores de referência para validação de dados de perfilagem, eles realmente deixam a desejar. Levantados todos estes fatores limitadores, os resultados com perfilagem (sem fonte radioativa) foram muito bons.

5.2 Recomendações para os Próximos Trabalhos

Nos próximos estudos desse tipo, seria importante aumentar o número de furos de sondagem, ou seja, o número de amostras para as camadas de carvão investigados. Assim, a correlação entre os parâmetros físicos e químicos poderia, também, ser melhorada.

A fim de melhor validar os dados de perfilagem, o fator chave seria primeiramente, melhorar a precisão dos dados de referência, os quais são baseados em ensaios de laboratório. Sabe-se que, de acordo com trabalhos em depósitos de carvão fora e no Brasil, a densidade sempre apresenta uma elevada correlação com o conteúdo de cinzas. Uma alternativa seria enviar as amostras para laboratório para fins de determinação do conteúdo de matéria inorgânica (exemplo, por difratometria de raios-x quantitativa – Rietveld e/ou microscopia óptica) e verificar se esta correlação cinza de laboratório versus gama natural melhoraria. Caso isto ocorresse, inclusive, como atualmente não se tem alternativas melhores viáveis para determinação de densidade de materiais friáveis em laboratório, esta seria prevista indiretamente pela perfilagem com gama-gama.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). *Carvão Mineral – Determinação do Teor de Cinzas*. NBR 8289, Origem: ABNT 1:13.01-001/83, CB-1 – Comitê Brasileiro de Mineração e Metalurgia, CE-1:13.01 – Comissão de Estudo de Ensaio de Carvão Mineral. 4 p.

Almeida, T., Braga, M.A., Silva, J.C., Salvadoretti, P., Webber, T. & Costa, J.F.C.L. (2008), *Estimativa de densidades a partir de perfilagem geofísica efetuada em furos de sondagem em jazidas de ferro da Companhia Vale Do Rio Doce, Minas Gerais*. Anais do V Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Subterrânea (IBRAM), Belo Horizonte, Brasil. v.1, p. 1-8.

Archie, G. E. (1942). *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics*. Trans, AIME, v. 146. p. 54-62.

Bond, L. O., Alger, R. P. & Schmidt, A. W. (1971), *Well Log Interpretation in Coal Mining and Rock Mechanics*. Soil Mechanics Engineering Transactions (AIME Transactions), v.250, p. 355-362.

Borsaru, M., Charbucinski, J., Eisler, P. L. & Youl, S. F. (1985). *Determination of ash content in coal by borehole logging in dry boreholes using gamma-gamma methods*. Geoexploration, v. 23, n. 4, p. 503-518.

Borsaru, M. & Ceravolo, C. (1994), *A Low Activity Spectrometric Gamma-Gamma Borehole Logging Tool for the Coal Industry*. Nuclear Geophysics, v.8, p. 343-350.

Borsaru, M., Biggs, M., Nichols, W. & Bos, F. (2001), *The Application of Prompt-Gamma Neutron Activation Analysis to Borehole Logging for Coal*. Applied Radiation and Isotopes, v.54, p. 335-343.

Borsaru, M. (2005), *Selected Topics in Nuclear Geophysics*. Proceedings of the 2005 Romanian Academy, Series A, v.6, p. 1-11.

Borsaru, M. & Asfahania, J. (2007), *Low-Activity Spectrometric Gamma-Ray Logging Technique for Delineation of Coal/Rock Interfaces in Dry Blastholes*. Applied Radiation and Isotopes, v.65, p. 748-755.

CPRM (1984), *Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná*.

Das, L. K. & Kayal, J. R. (1981). *A Method of Estimating Ash Content of Coal from Combined Resistivity and Gamma – Ray Logs*. *Geoexploration*, 19. p. 193-200.

Davies, A. L. (1992), *Geophysics at the Coal-Face*. *Exploration Geophysics*, v. 23, p. 87-96.

DNPM (1984), Gerência de Geologia e Pesquisa – Copelmi Mineração Ltda, *Relatório de Pesquisa*.

Guyod, H. (1944). *The Single-Point Resistance Method*. *Oil Weekly*. v. 114 n. 12.

Guyod, H. (1951). *The Shielded-Electrode Method*. *World Oil*. 143 p.

Hearst, J. R., Nelson, P. H. & Paillett, F. L. (1985). *Well Logging for Physical Properties*. 2ª ed., John Wiley and Sons, Ltd. p. 70-73.

Hilchie, D. W. (1990). *Wireline: A History of the Well Logging and Perforating Business in the Oil Fields*. Boulder, Colorado: Privately Published. 200 p.

Hoffman, G. L., Jordan, G. R. & Wallis, G. R. (1982). *Geophysical Borehole Logging Handbook for Coal Exploration*. Alberta (CAN), The Coal Mining Research Centre. 270 p.

ISO – International Organization For Standardization (1985). *Coal Cleaning Tests – General Directions for the Determination and Presentation of Float and Sink Characteristics*. ISO/DIS 7936, ISO/TC 27,UDC 662.66:620.168.33, 31 p.

Kayal, J. R. & Christoffel, D. A. (1989). *Coal Quality From Geophysical Logs: Southland Lignite Region, New Zealand*. *The Log Analyst*, v. 27, n. 3, p. 343-352.

Kay, M., Dimitrakopoulos, R. & Fullagar, P. (2004), *Integration of Conventional and Downhole Geophysical Data in Metalliferous Mines*. Leuangthong, O. & Deutsch, C. V. (editors), *Geostatistics Banff*, p. 351-361.

Kerr, T. L., O’Sullivan, P., Podmore, D. C., Turner, R. & Waters, P. (1994), *Geophysics and Iron Ore Exploration: Examples from the Jimlebar and Shay Gap-Yarrie regions, Western Australia*. In:

Geophysical signatures of Western Australian Mineral Deposits: Geology Key Centre, University of Western Australia. Dentith M.C., Frankcombe, K.F., Ho, S.E., Shephard, J.M., Groves, D.I., & Trench, A. (editors), n. 26, p. 355-367.

Killeen, P. G. (1983), *Borehole Geophysics for Mining and Geotechnical Application*. In: Proceedings of a Symposium in Toronto, Canadá. Killeen, P.G. (editor), p. 85-87.

Liu, J. & Harvey, A. H. (1982). *Coal Logging in the People's Republic of China*. The Log Analyst, v. 23, n. 2, 3 p.

Nelson, P. H. & Johnston, D. (1994), *Geophysical and Geochemical Logs from a Copper Oxide Deposit*, Santa Cruz project, Casa Grande, Arizona. Geophysics, v.59, p. 1827-1838.

Oliveira, L. J. de. (2005), *Avaliação do uso de perfilagem geofísica para obtenção de informações secundárias para utilização em co-estimativas de variáveis geológico-mineiras*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.144.

Reeves, D.R. (1971). *In Situ Analysis of Coal by Borehole Logging Techniques*. CIM Trans., 74: p. 61-69.

Reeves, D.R. (1976), *Application of Wire-Line Logging Techniques of Coal Exploration*. Proc. Int. Coal Exploration Symp. London, 1st, p. 112-128.

Reeves, D.R. (1981). *Coal Interpretation Manual*. BPB Instruments, East Leake, England.

Souza, V.C.G., Salvadoretti, P., Costa, J. F. C. L., Beretta, F., Koppe, J. C., Carvalho Júnior, J. A., Basegio, T. M. & Bastiani, G. A. (2010). *Estimativa de Qualidade de Carvão por Meio de Perfilagem Geofísica de Gama Natural e Resistividade*. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), v. 63, p. 653-660.

Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Second Edition. 285 p.

Turner, G., Ramsay, R., Wellington, A., Fogarty, S. & King, G. (1996), *Drilling 50m Diameter Holes with Geophysics: A Case Study of Downhole EM at Kambalda, Western Australia*. In: The Role of Mine Geophysics in Resource Evaluation. In: Pre-Convention Workshop, 66th Ann. Int'l. Mtg., Soc. Expl. Geophysics.

Webber, T., Salvadorette, P., Costa, J. F. C. L. & Koppe, J. C. (2009). *Estimativa de Parâmetros Indicadores de Qualidade de Carvão a partir de Perfilagem Geofísica*. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), v. 62(3), jul. set, p. 283-289.

Webber, T., Salvadorette, P., Oliveira, L. J., Costa, J. F. C. L., Koppe, J. C., Carvalho Júnior, J. A. & Bastiani, G. A. (2006). *Estimativa de Parâmetros Indicadores de Qualidade de Carvão a partir de Perfilagem Geofísica*. Mina do Cerro, Cachoeira do Sul/RS. In: IV Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Subterrânea: IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte. p. 1-13.

Webber, T. (2008). *Estimativa de Qualidade de Carvão usando Krigagem dos Indicadores Aplicados a Dados Obtidos por Perfilagem Geofísica*. Dissertação de Mestrado, PPGE3M – EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), p. 57-60, 74-79.

Winsauer, W. O., Shearin, H., Mason Jr., P. H. & Williams, M. (1952). *Resistivity of Brine-Saturated Sand in Relation to Pore Geometry*. Bull. AAPG, v. 36, n. 2, p. 253-277.

ANEXO A

Especificações das sondas utilizadas para realização do trabalho – Fabricante Robertson Geologging Limited

Sonda GLOG

Sonda para medição de resistividade focalizada e medição de emissão de radiação gama natural. Abaixo é apresentado o diagrama da sonda (Figura A.1) e as respectivas especificações (Tabela A.1)

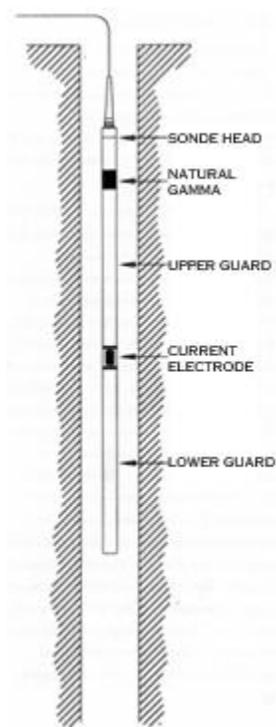


FIGURA A.1 – Diagrama da sonda GLOG

Tabela A.1 – As Especificações da sonda GLOG®

ESPECIFICAÇÕES	
Diâmetro	38mm
Comprimento	2,75m
peso	8kg
Temperatura máxima	70°C
Pressão Máxima	20MPa
Elétrodo de corrente	10cms
Elétrodos focalizadores	2 x 1m
Tensão de referência	Fio terra em superfície.
Escala de medida	1 a 10×10^3 ohm.m
Detector de radiação gama natural (contagem total)	50mm x 25mm NaI(Tl) Sintilômetro

ANEXO B

Tabela B.1 – Valores médios calculados de gama natural e de resistividade das camadas de carvão nos furos de desmonte na Área B3

Furo	Camada	De (m)	Até (m)	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Gama Natural (API)
B3-200	S	8,20	9,40	1,20	53,65	82,14
B3-200	M1	9,80	11,00	1,20	75,88	90,31
B3-200	I1	14,70	16,00	1,30	49,52	91,37
B3-201	S	8,00	9,20	1,20	70,54	73,99
B3-201	M1	10,20	10,90	0,70	77,86	88,99
B3-201	I1	14,60	15,60	1,00	61,85	95,41
B3-202	S	8,20	9,50	1,30	74,83	82,12
B3-202	M1	9,80	10,50	0,70	97,25	70,27
B3-202	I1	14,70	16,00	1,30	66,01	90,90
B3-203	S	8,50	9,90	1,40	77,51	84,75
B3-203	M1	10,10	11,20	1,10	75,89	92,04
B3-203	I1	14,80	16,30	1,50	60,18	88,75
B3-204	S	8,20	9,70	1,50	77,50	90,36
B3-204	M1	9,80	10,50	0,70	89,78	109,26
B3-204	I1	14,90	16,20	1,30	72,27	90,14
B3-205	S	8,20	9,80	1,60	94,32	80,19
B3-205	M1	10,00	10,50	0,50	92,77	100,05
B3-205	I1	14,60	15,80	1,20	71,86	88,93
B3-206	S	8,20	9,50	1,30	76,31	80,57
B3-206	M1	9,70	10,30	0,60	86,58	80,80
B3-206	I1	14,60	15,80	1,20	71,96	93,41
B3-207	S	8,40	9,40	1,00	70,66	75,90
B3-207	M1	9,60	10,20	0,60	74,82	100,18
B3-207	I1	14,60	16,10	1,50	59,06	90,23
B3-208	S	8,30	9,40	1,10	85,68	72,19
B3-208	M1	9,60	10,30	0,70	82,62	99,50
B3-208	I1	14,80	16,10	1,30	61,46	92,28
B3-209	S	8,70	9,90	1,20	80,41	77,07
B3-209	M1	10,10	10,80	0,70	92,72	73,60
B3-209	I1	14,60	16,10	1,50	61,29	97,89
B3-210	S	8,30	9,60	1,30	80,62	77,39
B3-210	M1	9,90	10,70	0,80	77,72	86,33
B3-210	I1	14,60	15,90	1,30	65,57	85,29
B3-211	S	8,20	9,30	1,10	75,68	78,20
B3-211	M1	9,80	10,50	0,70	78,08	92,55
B3-211	I1	14,70	15,90	1,20	64,41	87,38

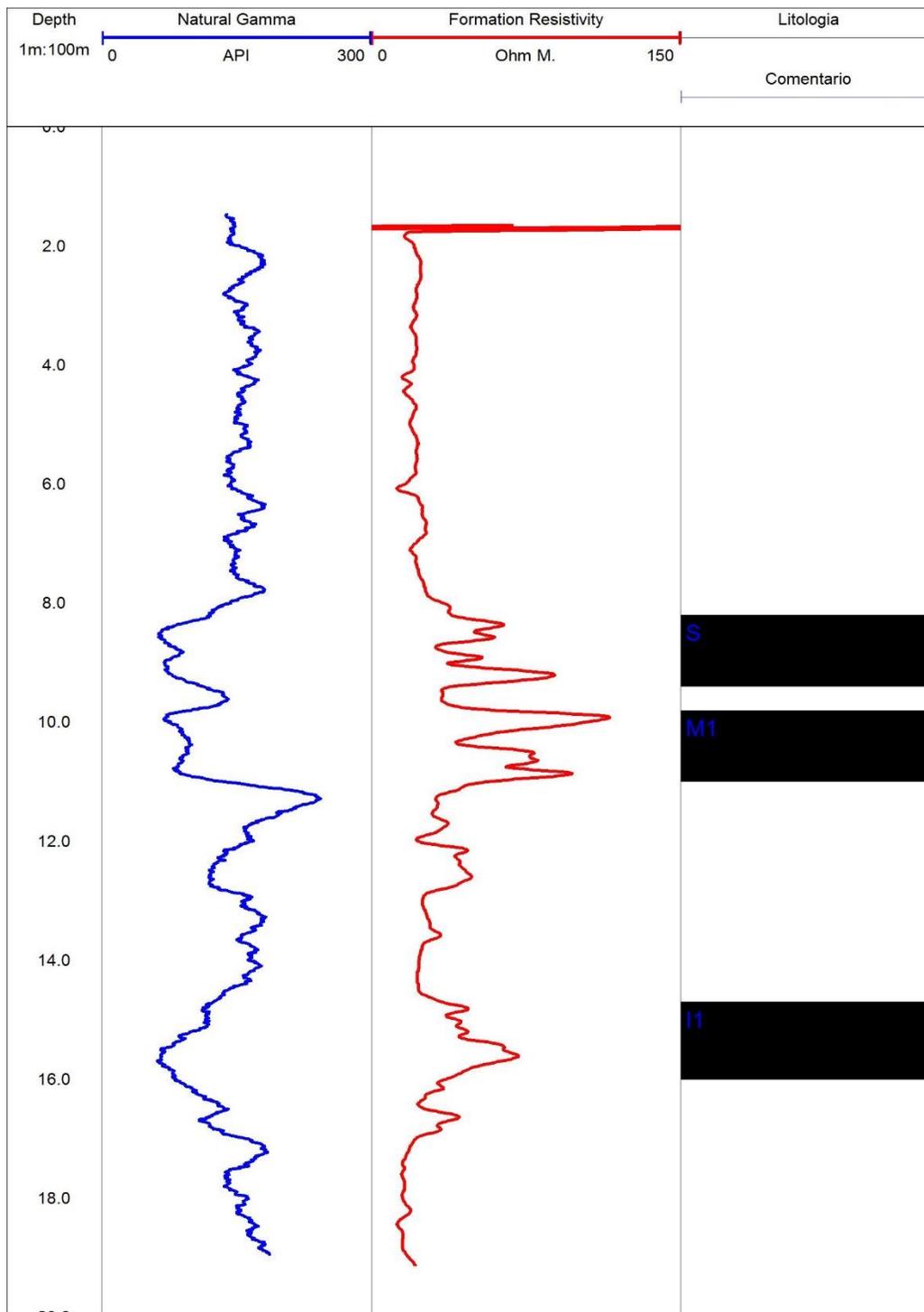
Furo	Camada	De (m)	Até (m)	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Gama Natural (API)
B3-212	S	8,20	9,70	1,50	90,59	91,44
B3-212	M1	9,90	10,60	0,70	89,67	85,45
B3-212	I1	14,90	15,80	0,90	69,38	86,21
B3-213	S	8,30	9,40	1,10	86,43	81,64
B3-213	M1	9,70	10,20	0,50	89,42	94,35
B3-213	I1	14,90	16,00	1,10	68,87	85,74
B3-214	S	8,20	10,00	1,80	92,95	77,97
B3-214	M1	10,20	10,90	0,70	61,66	99,85
B3-214	I1	14,70	16,20	1,50	61,72	95,16
B3-215	S	8,50	9,40	0,90	88,73	68,95
B3-215	M1	9,80	10,60	0,80	89,80	81,04
B3-215	I1	14,70	16,00	1,30	64,76	95,95
B3-216	S	8,30	9,40	1,10	78,71	72,17
B3-216	M1	10,00	10,70	0,70	70,62	88,07
B3-216	I1	14,80	16,00	1,20	72,80	88,57
B3-217	S	8,20	9,40	1,20	77,29	101,52
B3-217	M1	9,90	10,40	0,50	95,28	79,29
B3-217	I1	14,70	15,80	1,10	62,30	94,17
B3-218	S	8,00	9,10	1,10	79,74	79,92
B3-218	M1	9,50	10,60	1,10	91,42	95,01
B3-218	I1	14,60	15,70	1,10	69,10	100,62
B3-219	S	8,20	9,80	1,60	73,59	86,68
B3-219	M1	10,10	10,70	0,60	82,05	93,61
B3-219	I1	14,70	16,00	1,30	66,64	92,67
B3-220	S	8,00	9,20	1,20	82,89	79,60
B3-220	M1	9,40	10,00	0,60	104,70	79,79
B3-220	I1	14,60	15,80	1,20	66,50	94,01
B3-221	S	8,20	9,70	1,50	80,48	84,49
B3-221	M1	9,80	10,30	0,50	116,19	108,45
B3-221	I1	14,20	15,50	1,30	135,66	98,95
B3-222	S	8,20	9,40	1,20	81,92	90,09
B3-222	M1	9,70	10,20	0,50	130,13	77,72
B3-222	I1	14,70	16,00	1,30	72,44	94,86
B3-223	S	8,10	9,60	1,50	85,67	73,79
B3-223	M1	10,50	11,00	0,50	113,71	81,53
B3-223	I1	14,40	15,50	1,10	64,01	105,43
B3-224	S	8,60	9,40	0,80	62,53	98,91
B3-224	M1	9,70	10,60	0,90	93,08	123,21
B3-224	I1	14,40	15,80	1,40	66,96	92,60
B3-225	S	8,10	9,30	1,20	83,54	78,27
B3-225	M1	9,40	10,10	0,70	84,75	81,11

Furo	Camada	De (m)	Até (m)	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Gama Natural (API)
B3-225	I1	15,10	16,10	1,00	68,99	98,50
B3-226	S	8,20	9,50	1,30	72,77	80,87
B3-226	M1	9,70	10,70	1,00	59,29	92,72
B3-227	S	8,30	9,60	1,30	69,92	86,04
B3-227	M1	9,80	11,20	1,40	76,74	98,29
B3-227	I1	15,30	16,80	1,50	54,78	90,39
B3-228	S	8,00	9,50	1,50	69,59	87,72
B3-228	M1	9,60	10,70	1,10	84,17	95,51
B3-228	I1	14,80	15,80	1,00	70,95	89,81
B3-229	S	8,20	9,50	1,30	83,13	89,77
B3-229	M1	9,60	10,80	1,20	72,33	94,21
B3-229	I1	14,70	16,10	1,40	69,24	97,09
B3-230	S	8,50	9,70	1,20	82,34	71,26
B3-230	M1	10,00	10,70	0,70	82,64	77,00
B3-230	I1	15,20	16,70	1,50	62,05	94,16
B3-231	S	8,60	9,90	1,30	71,65	84,51
B3-231	M1	10,10	11,20	1,10	92,96	80,04
B3-231	I1	15,60	17,10	1,50	66,72	91,03
B3-232	S	8,40	9,70	1,30	74,67	80,15
B3-232	M1	9,80	10,50	0,70	86,89	84,17
B3-232	I1	15,10	16,90	1,80	68,93	88,12
B3-233	S	8,30	9,40	1,10	84,69	74,46
B3-233	M1	9,60	10,20	0,60	86,33	78,88
B3-233	I1	14,90	16,20	1,30	72,35	92,24
B3-234	S	7,80	9,20	1,40	75,95	91,41
B3-234	M1	9,70	10,70	1,00	58,32	140,81
B3-234	I1	13,70	15,00	1,30	68,66	98,29

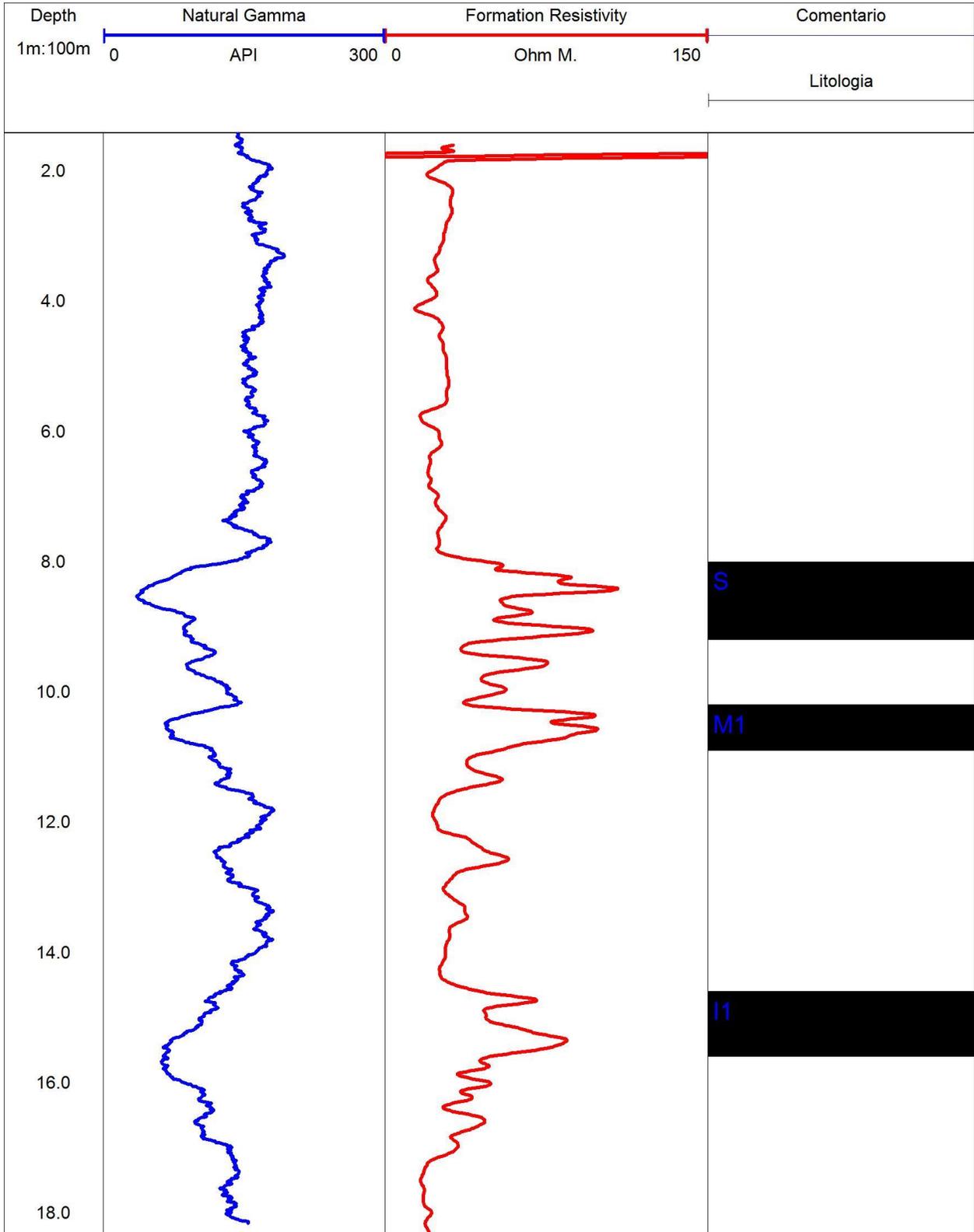
ANEXO C

Perfis dos furos de desmonte (B3-200 a B3-234)

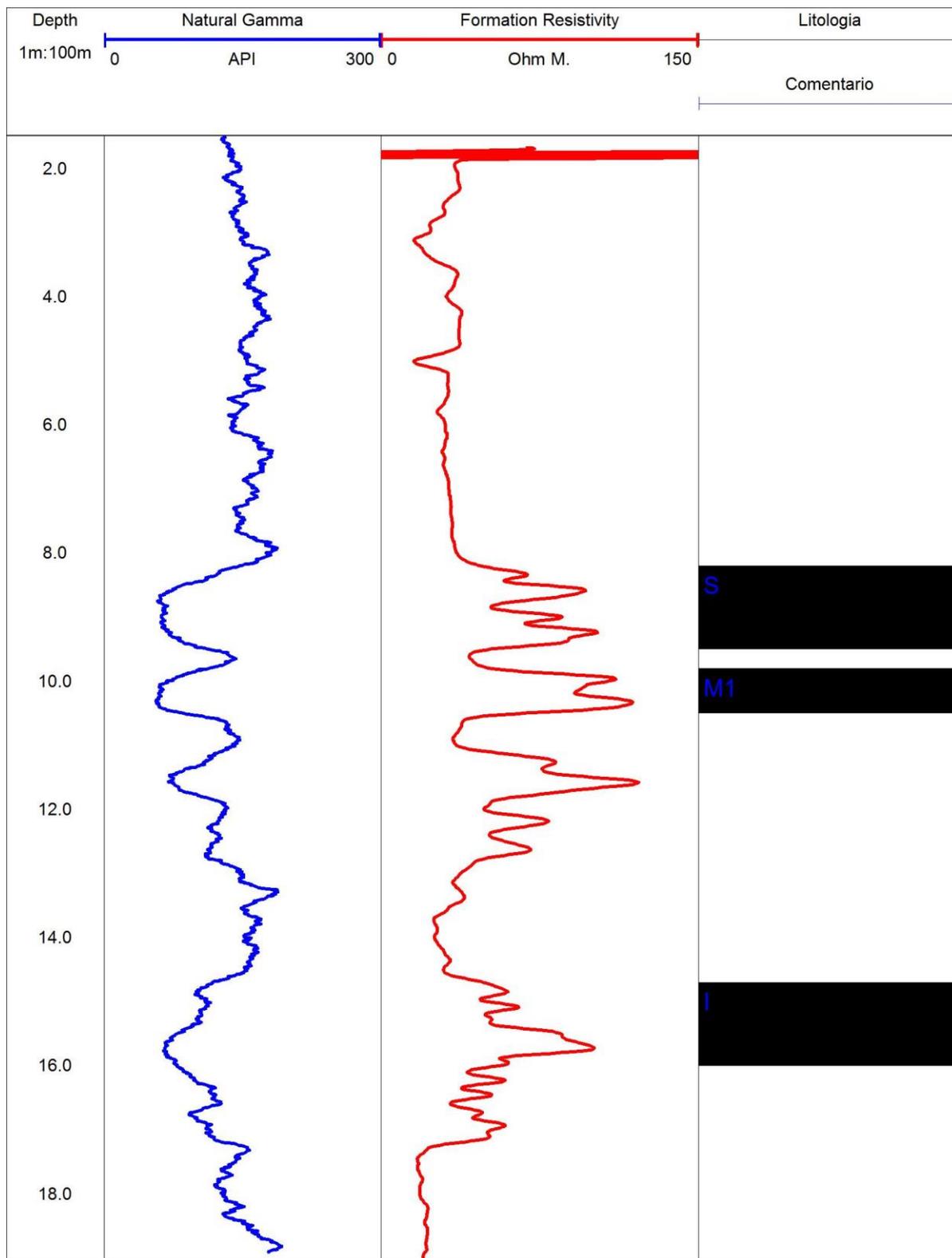
B3-200



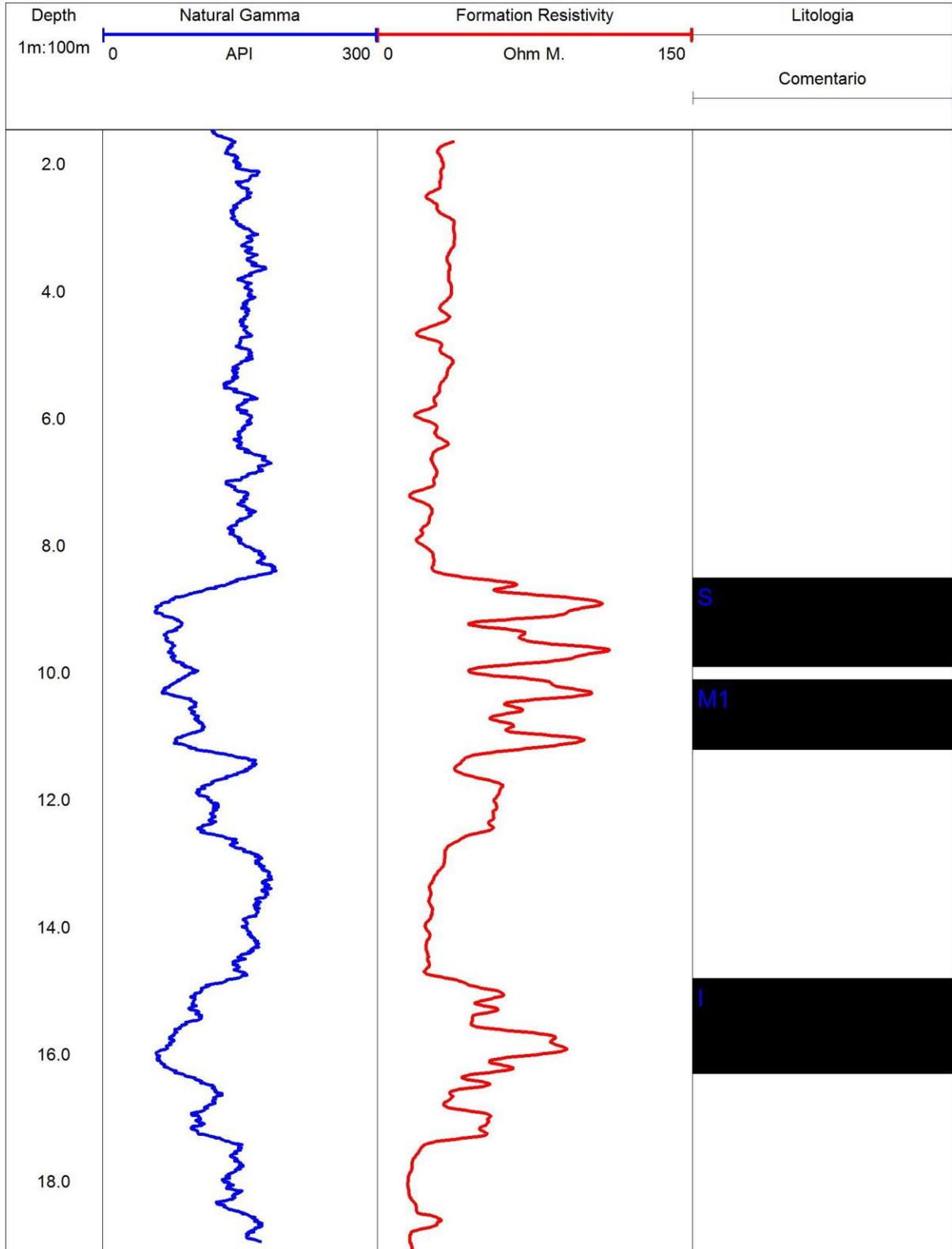
B3-201



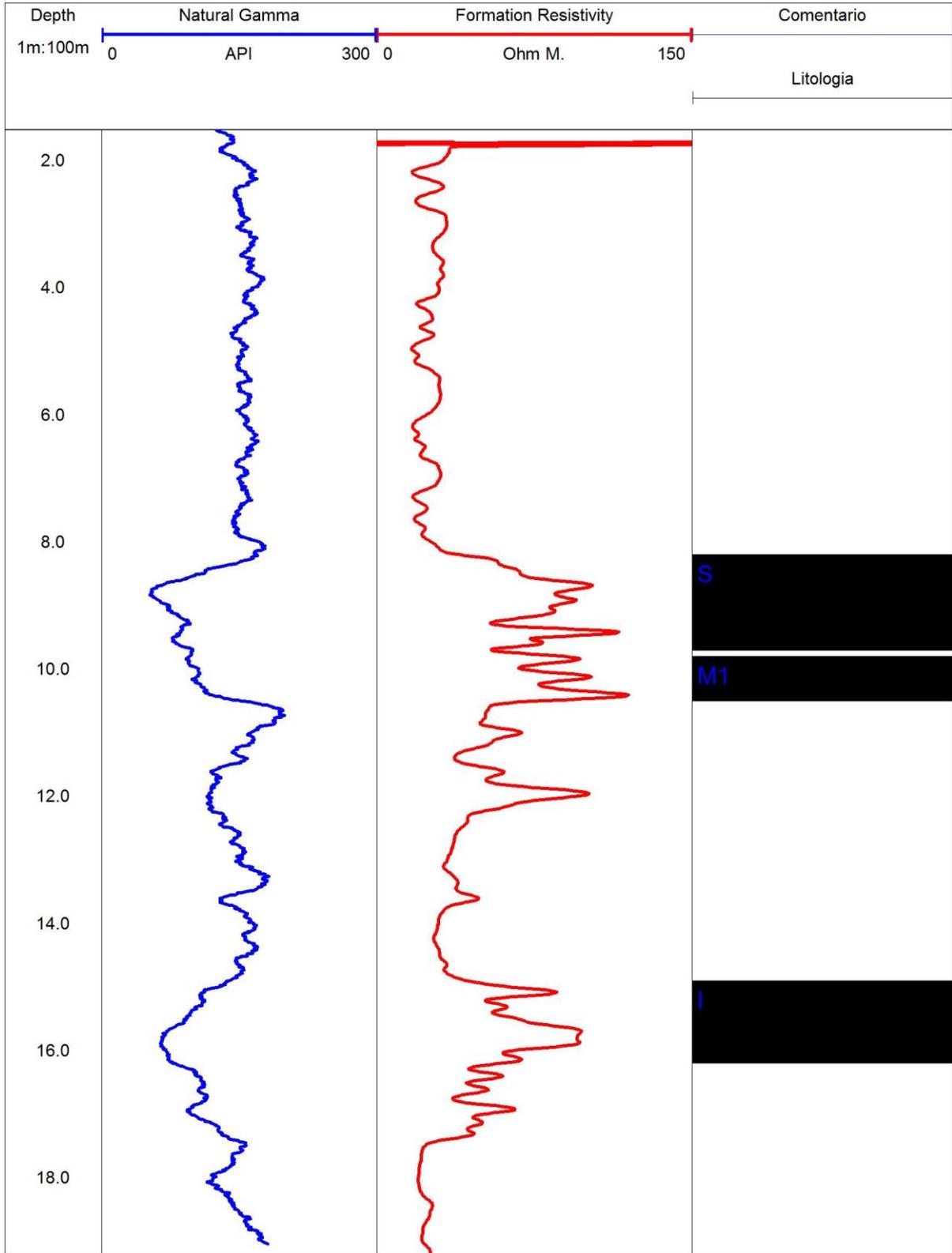
B3-202



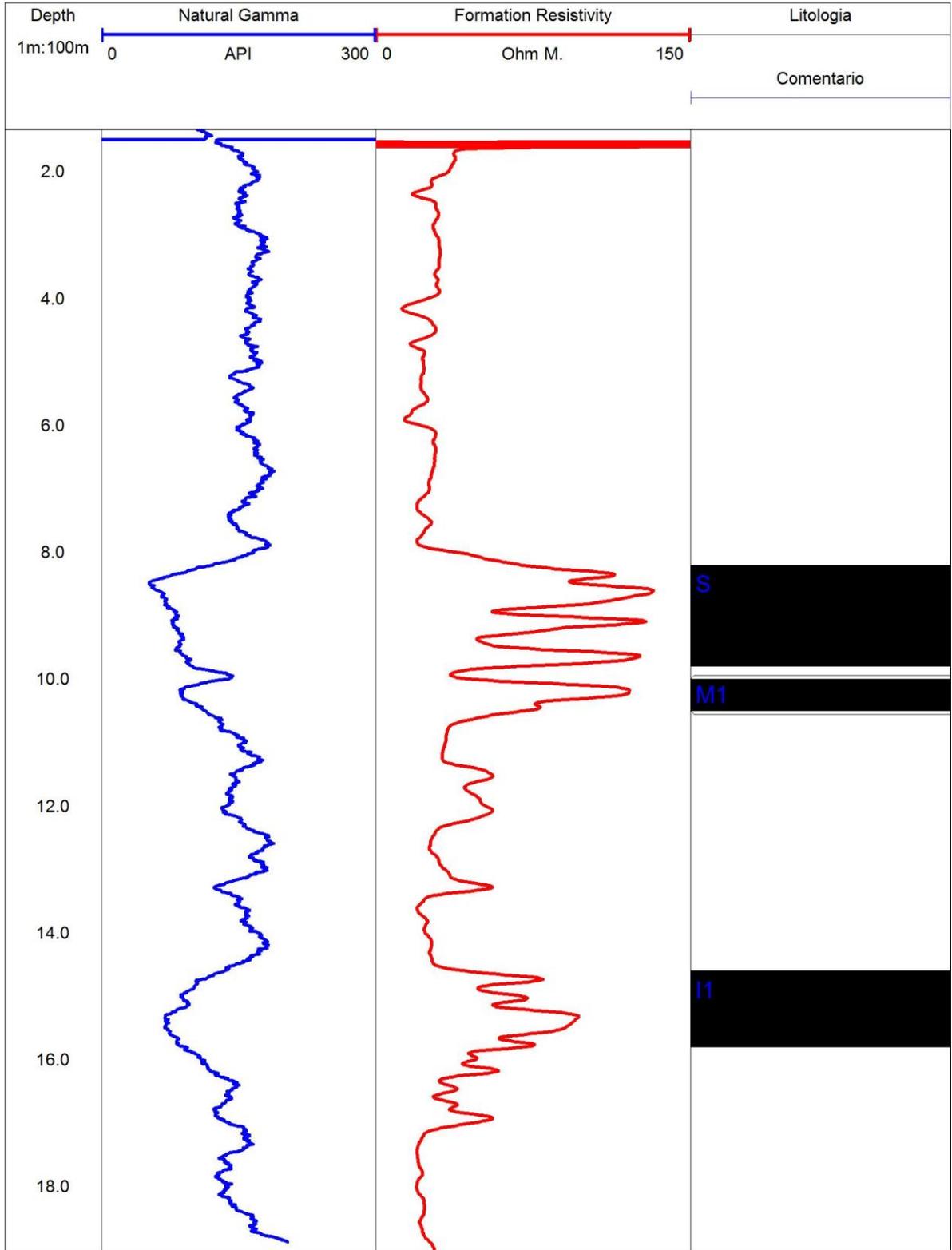
B3-203



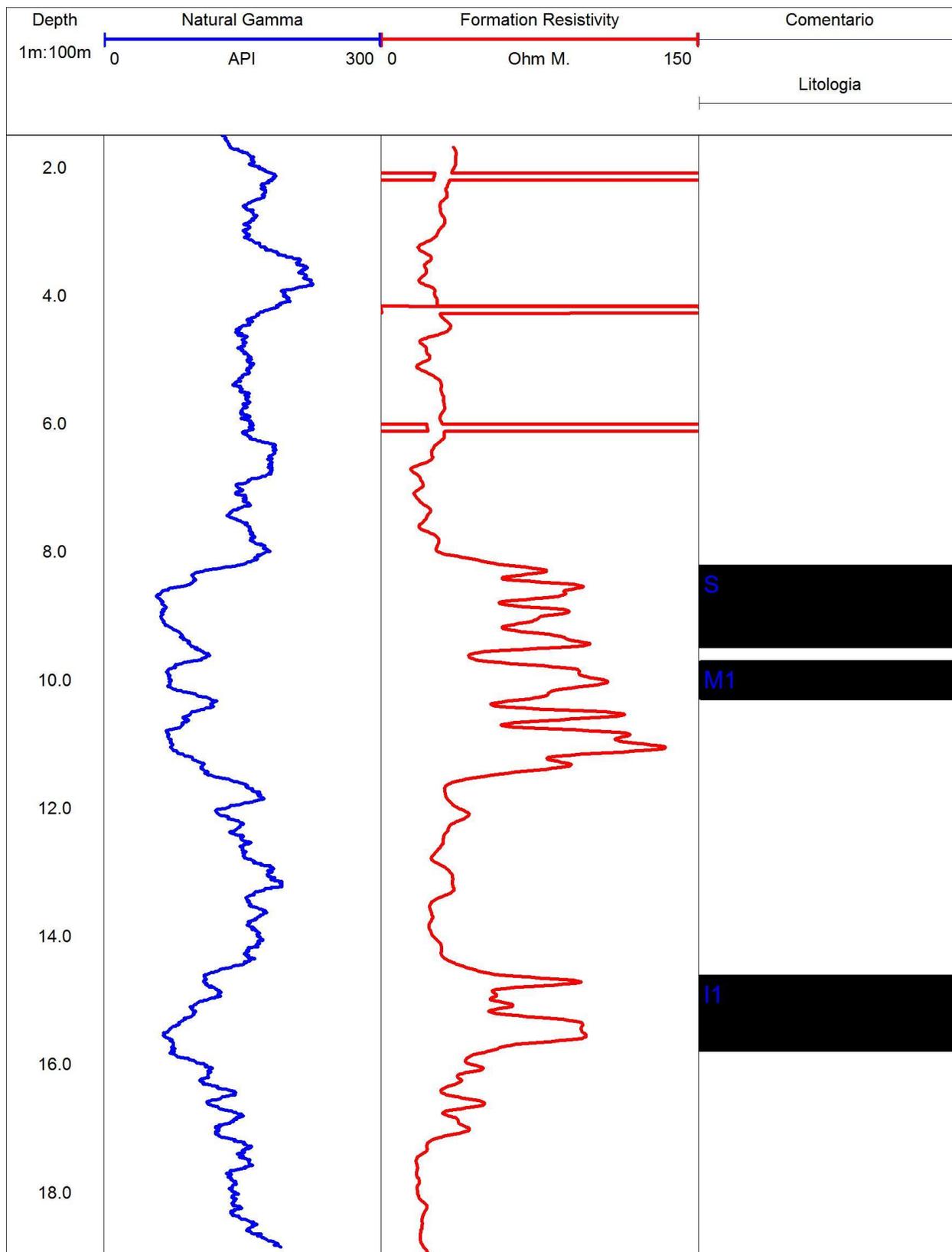
B3-204



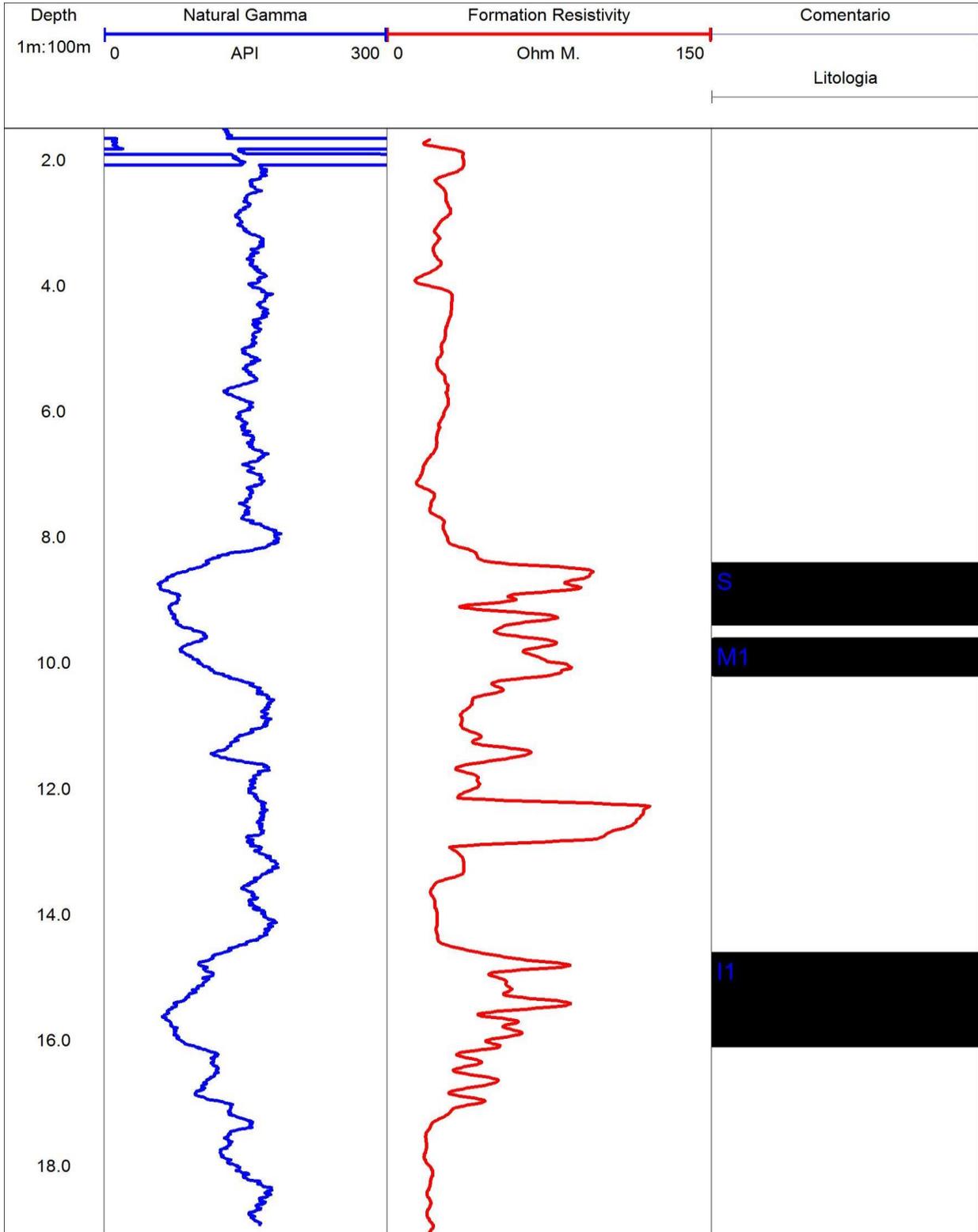
B3-205



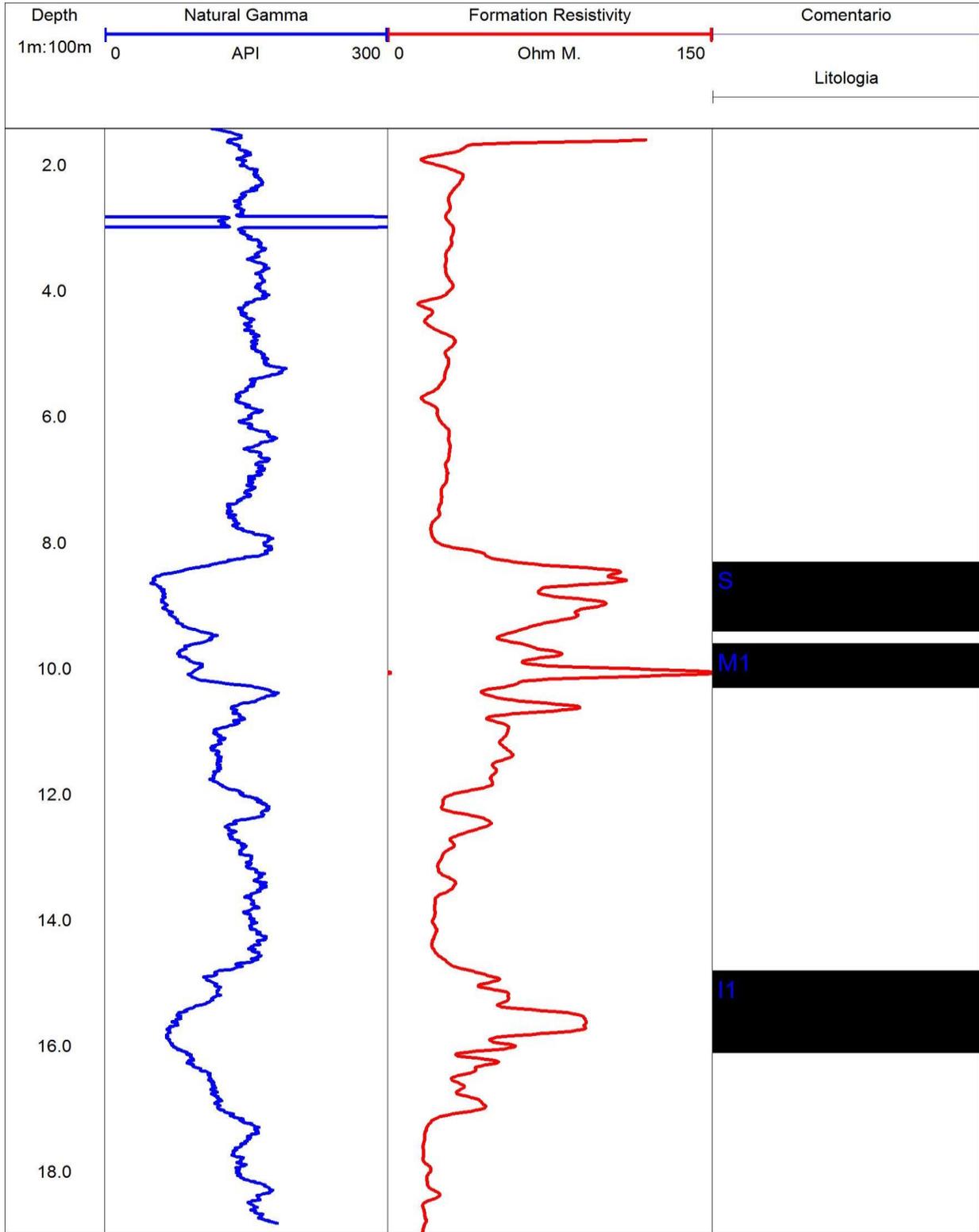
B3-206



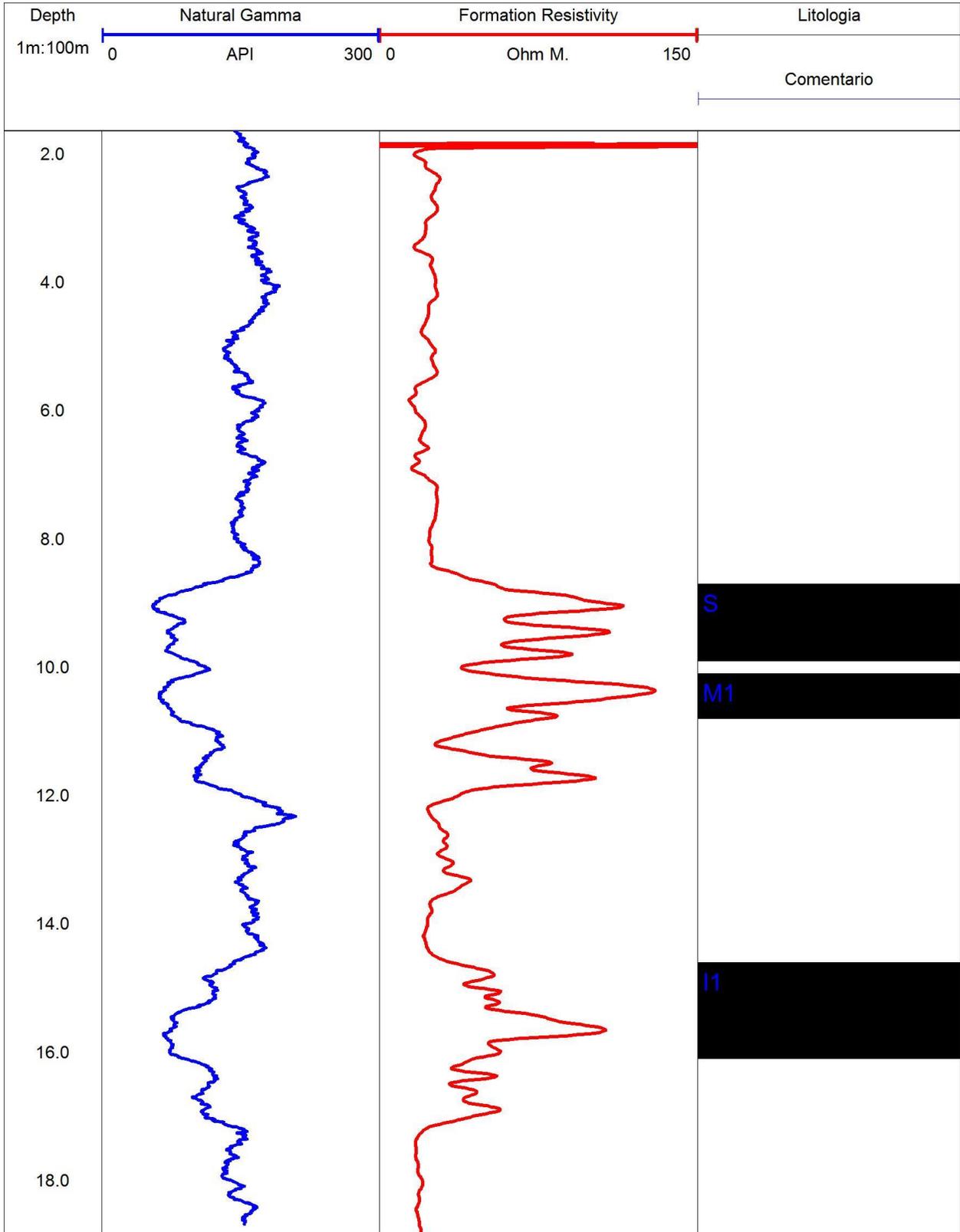
B3-207



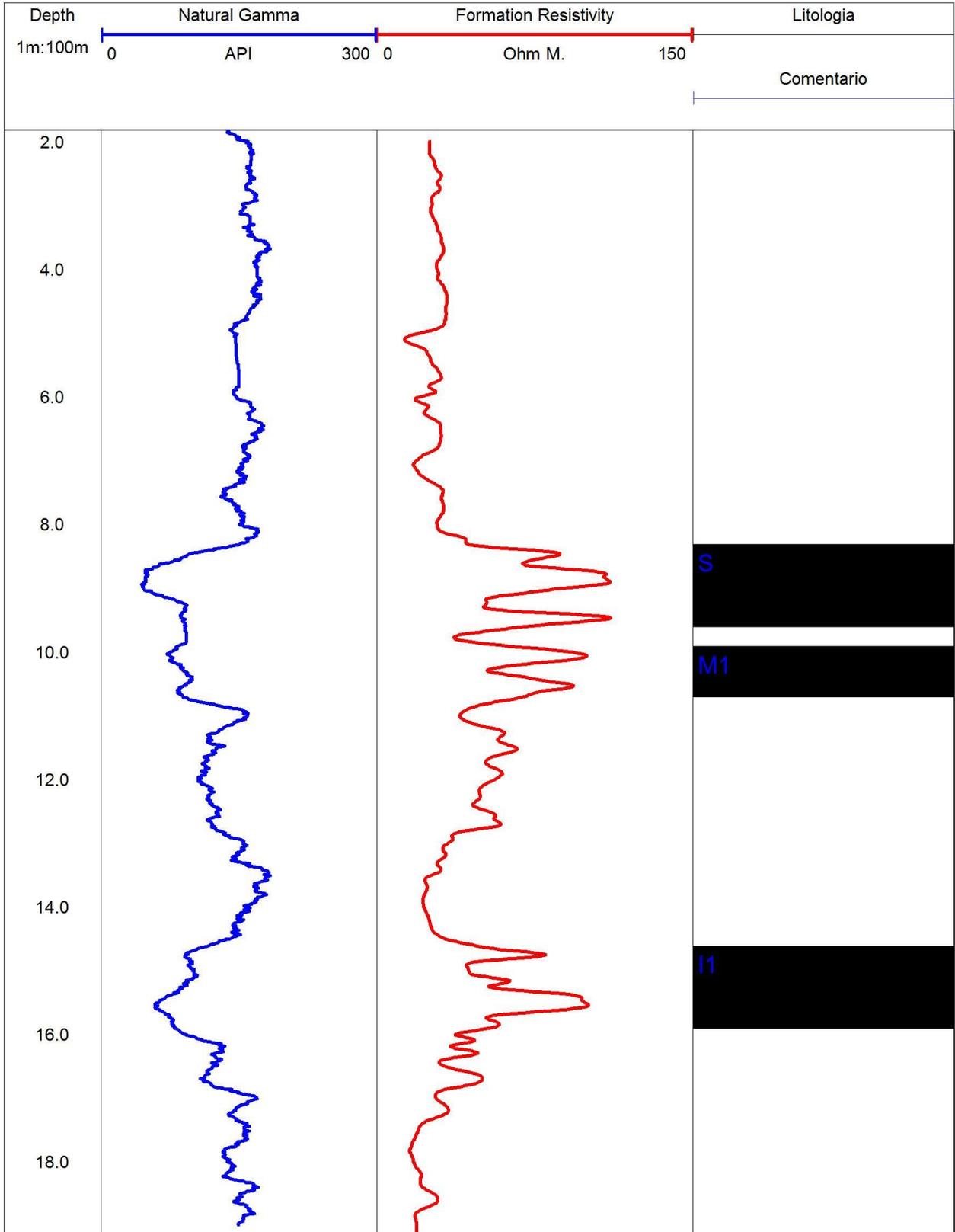
B3-208



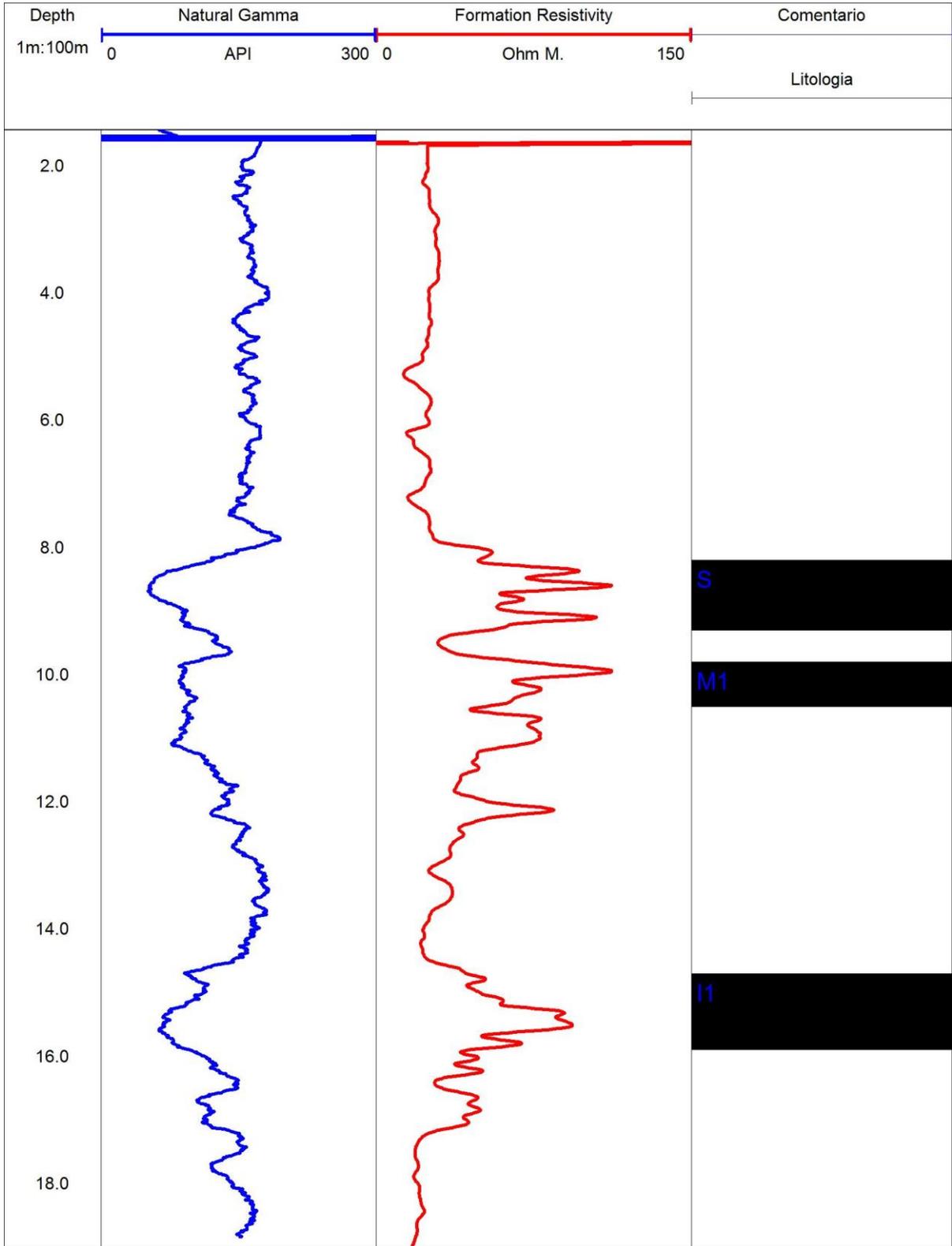
B3-209



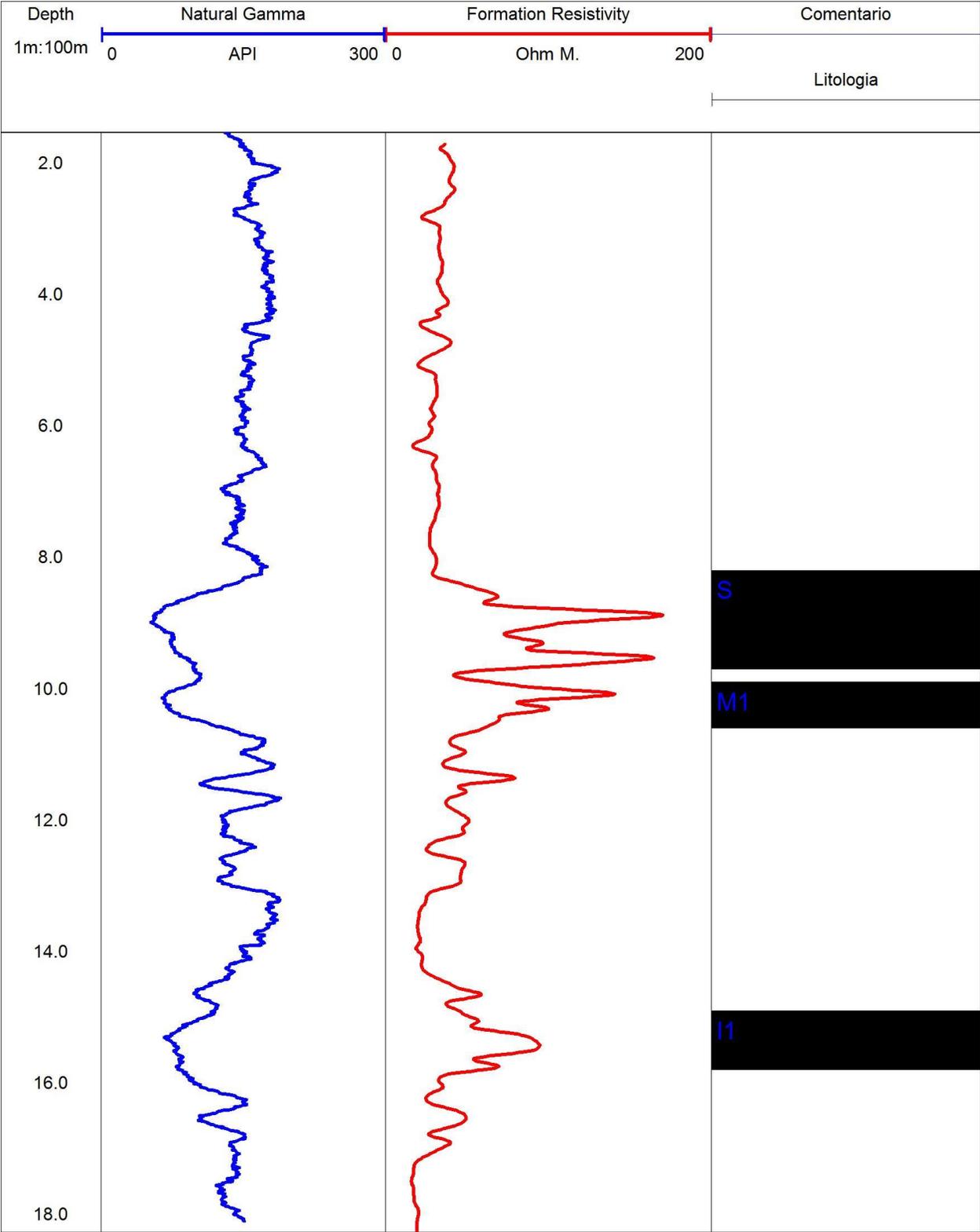
B3-210



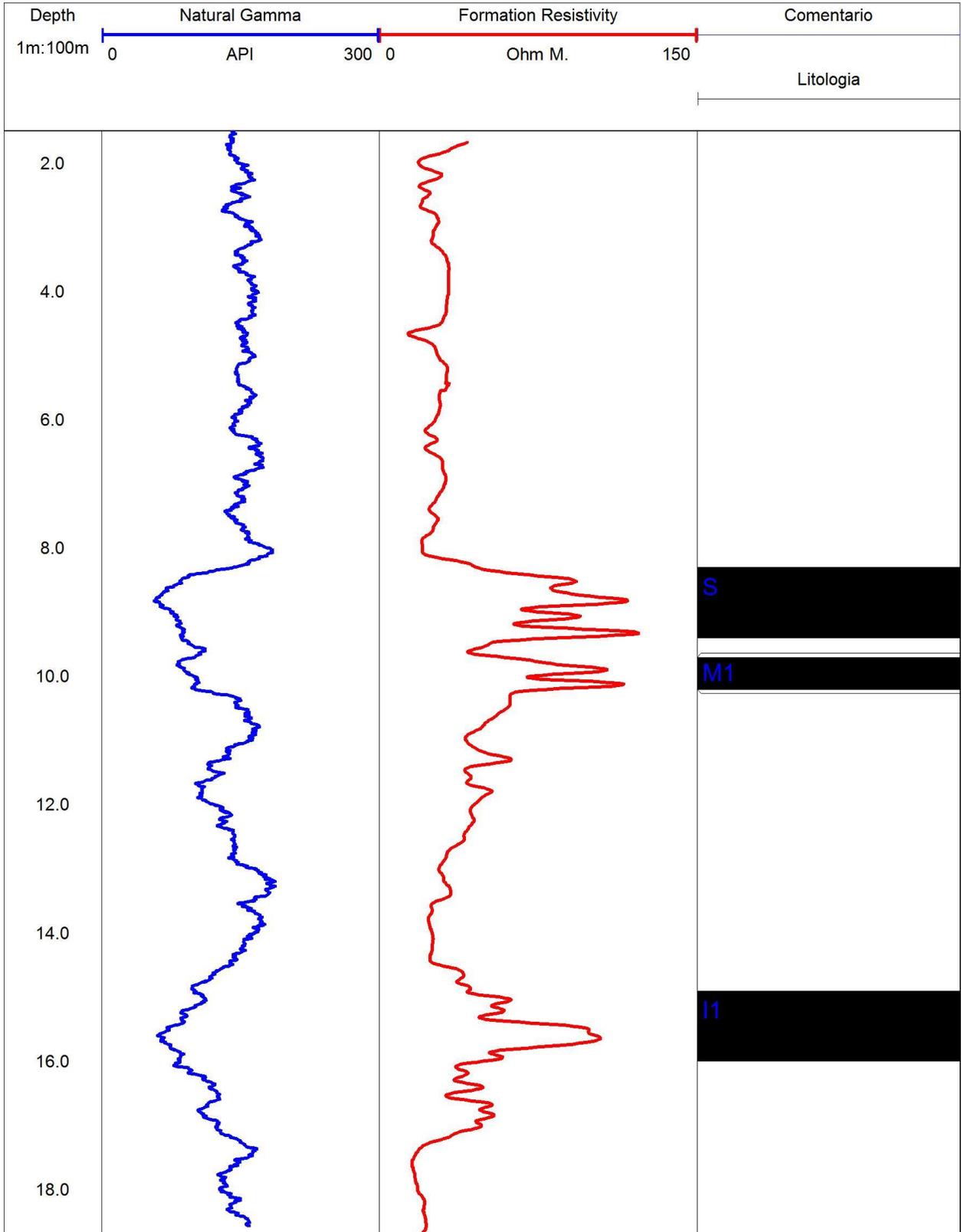
B3-211



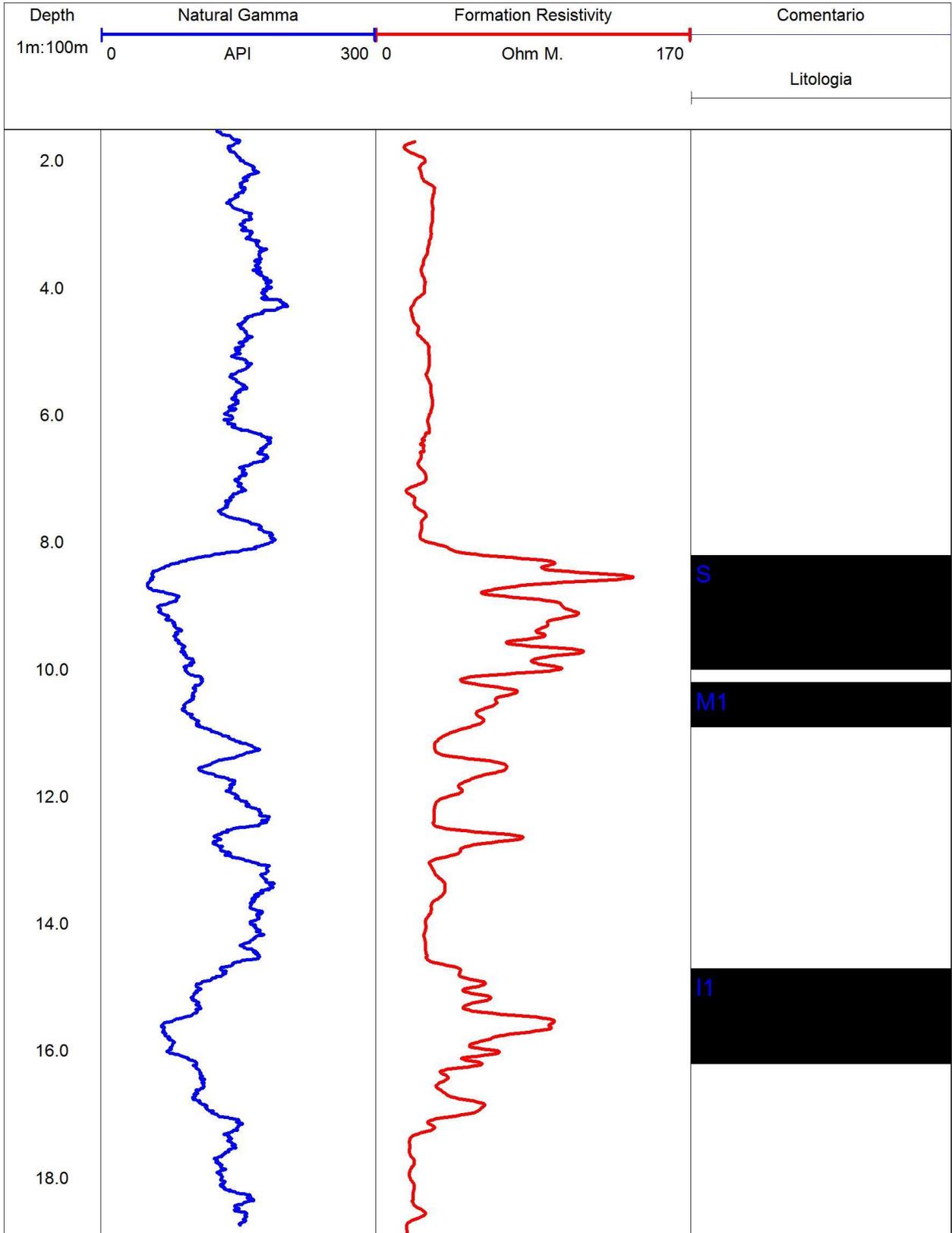
B3-212



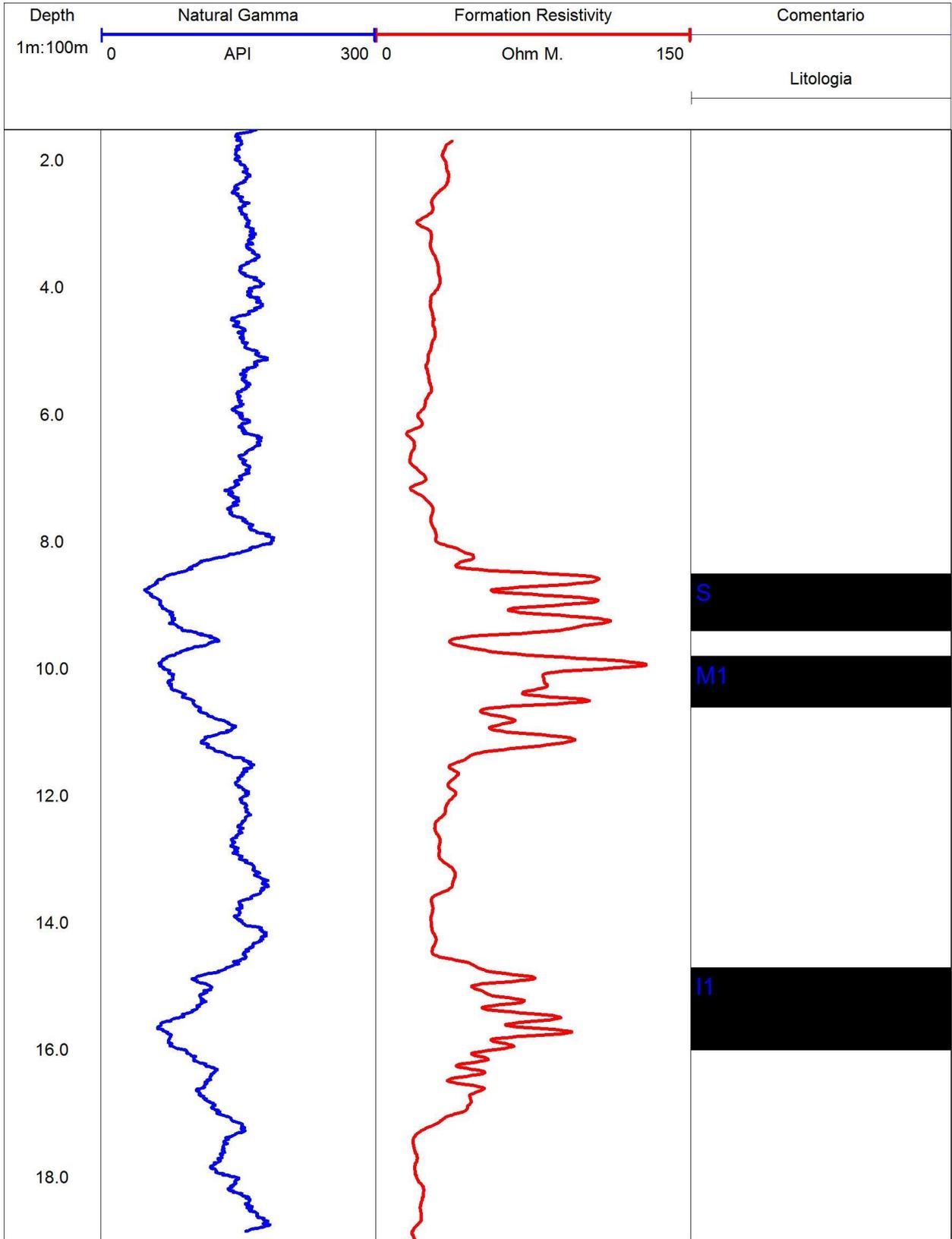
B3-213



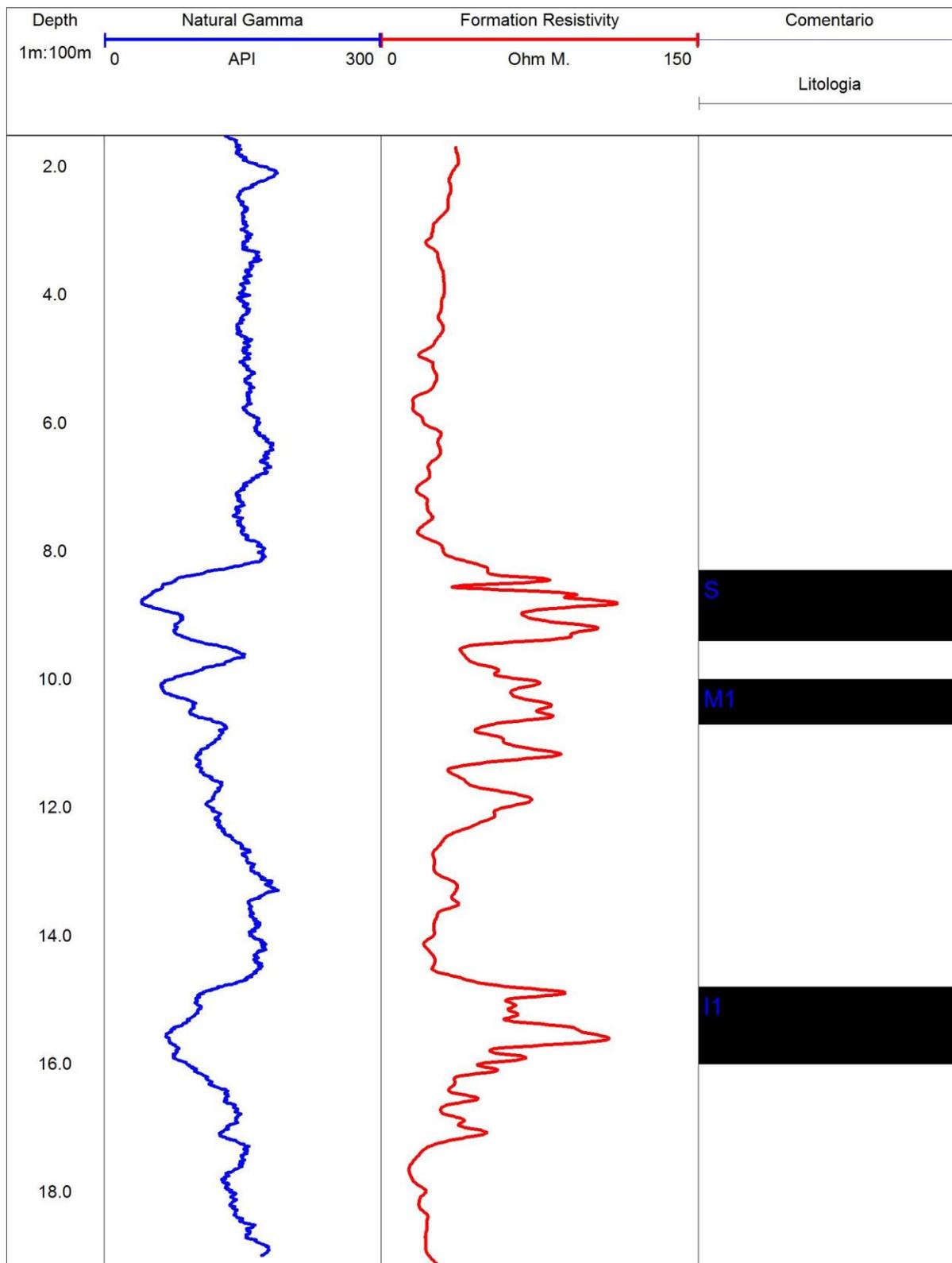
B3-214



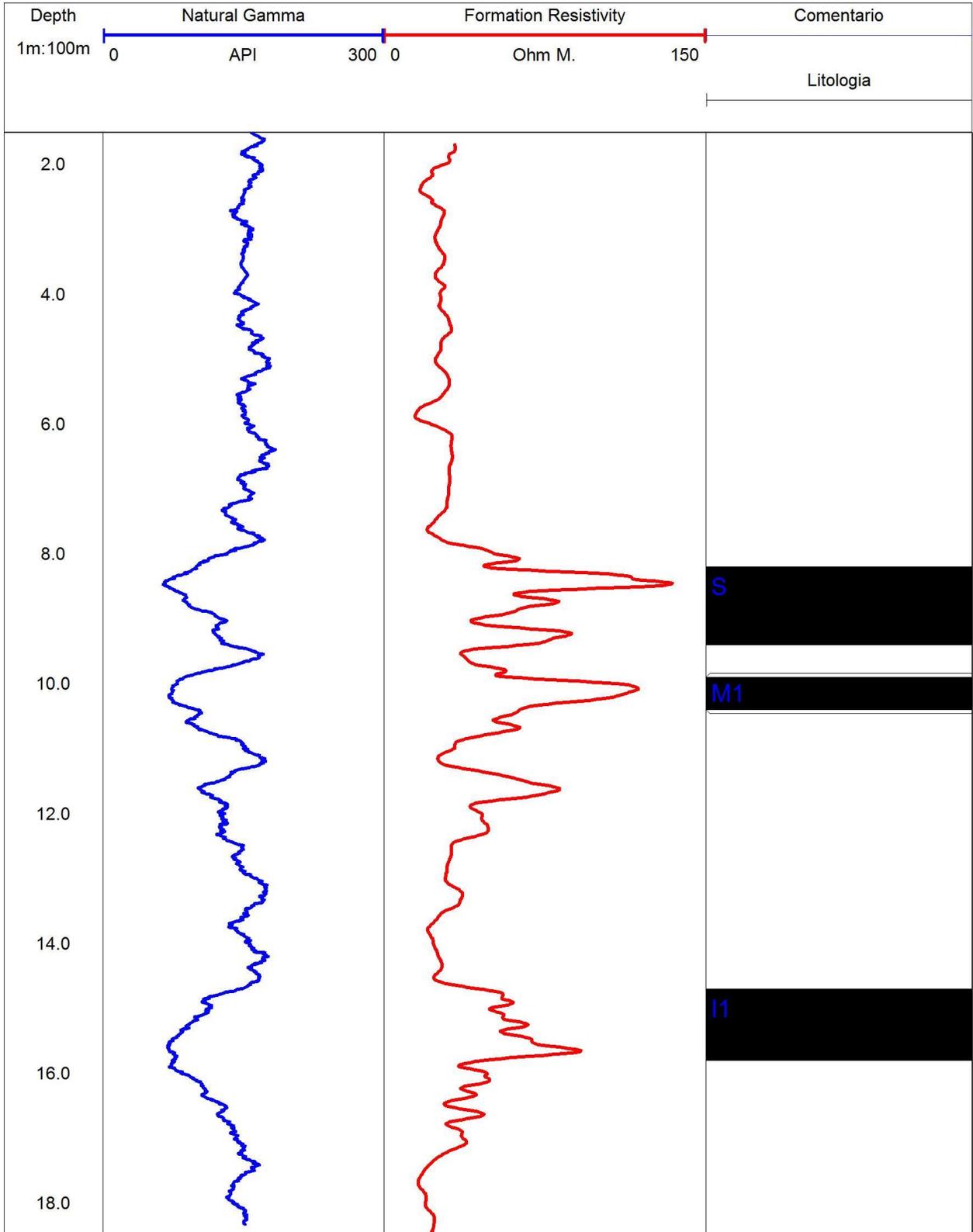
B3-215



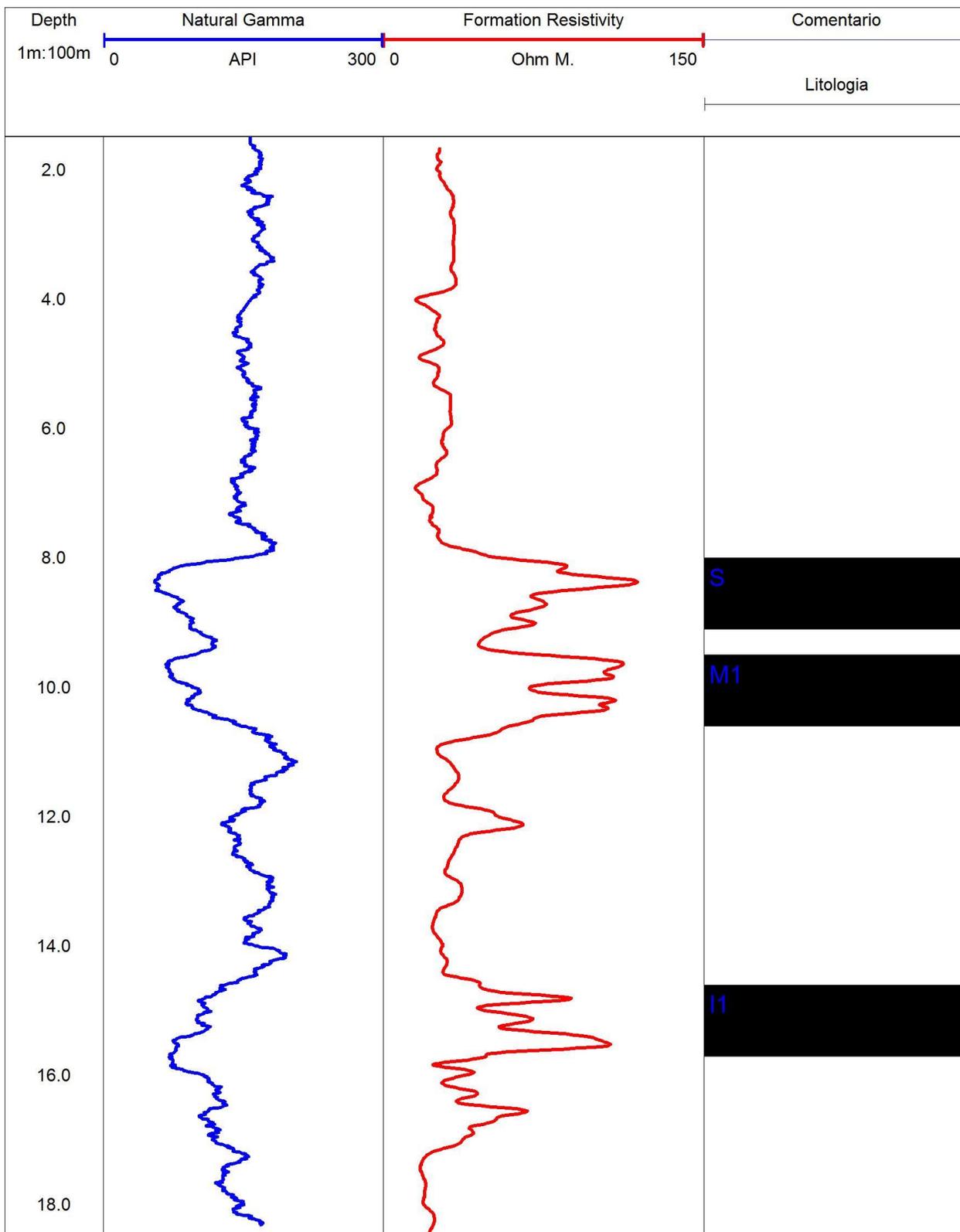
B3-216



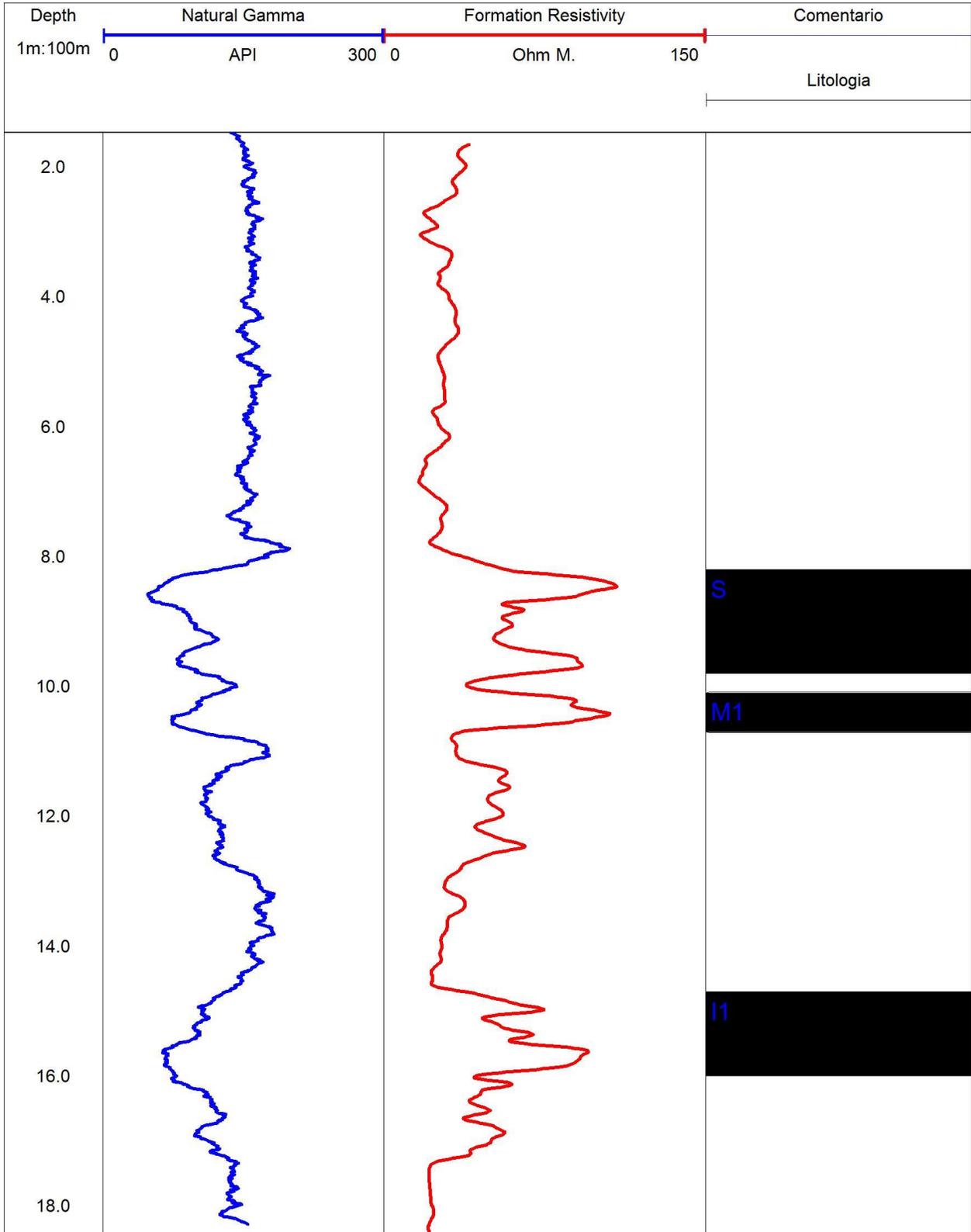
B3-217



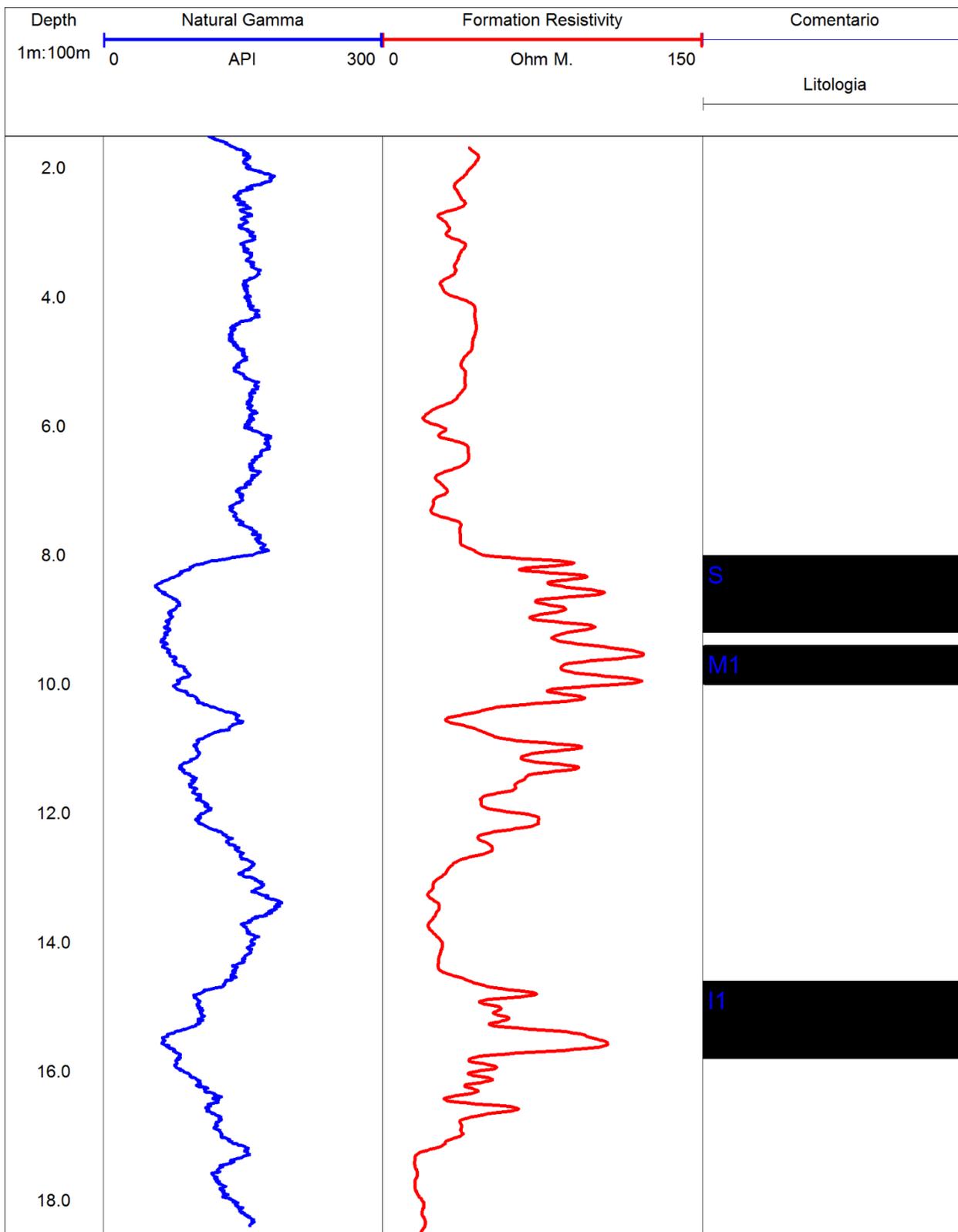
B3-218



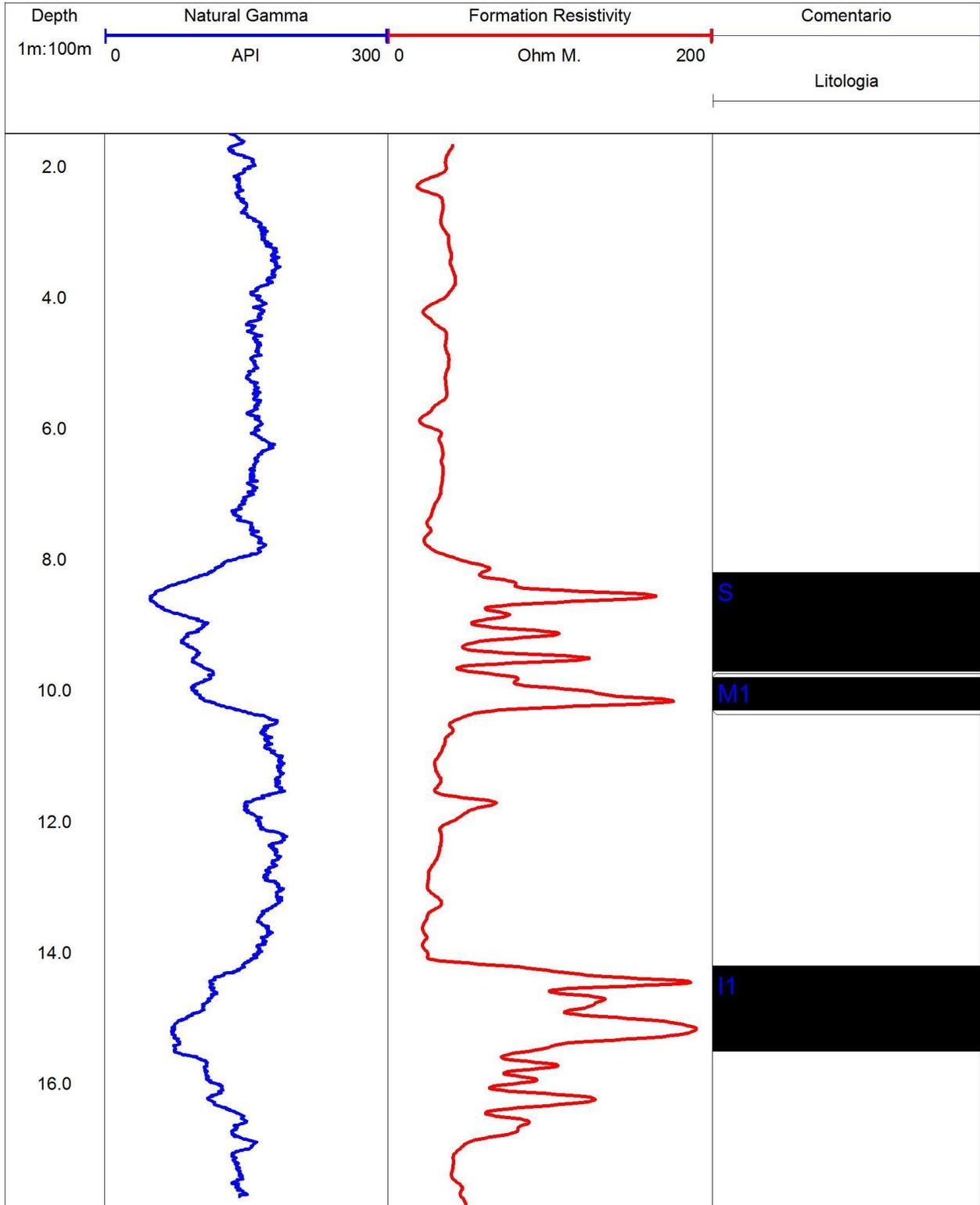
B3-219



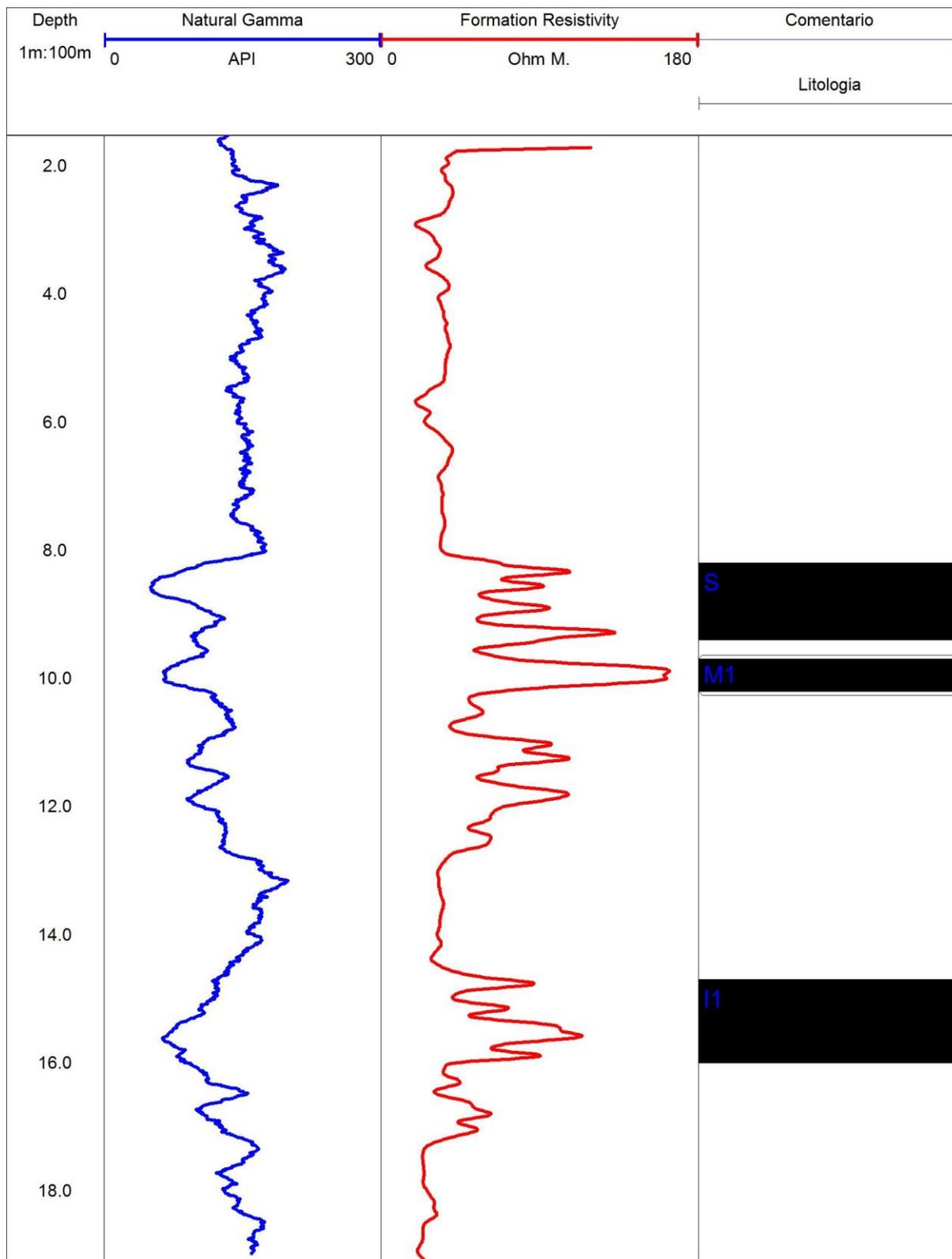
B3-220



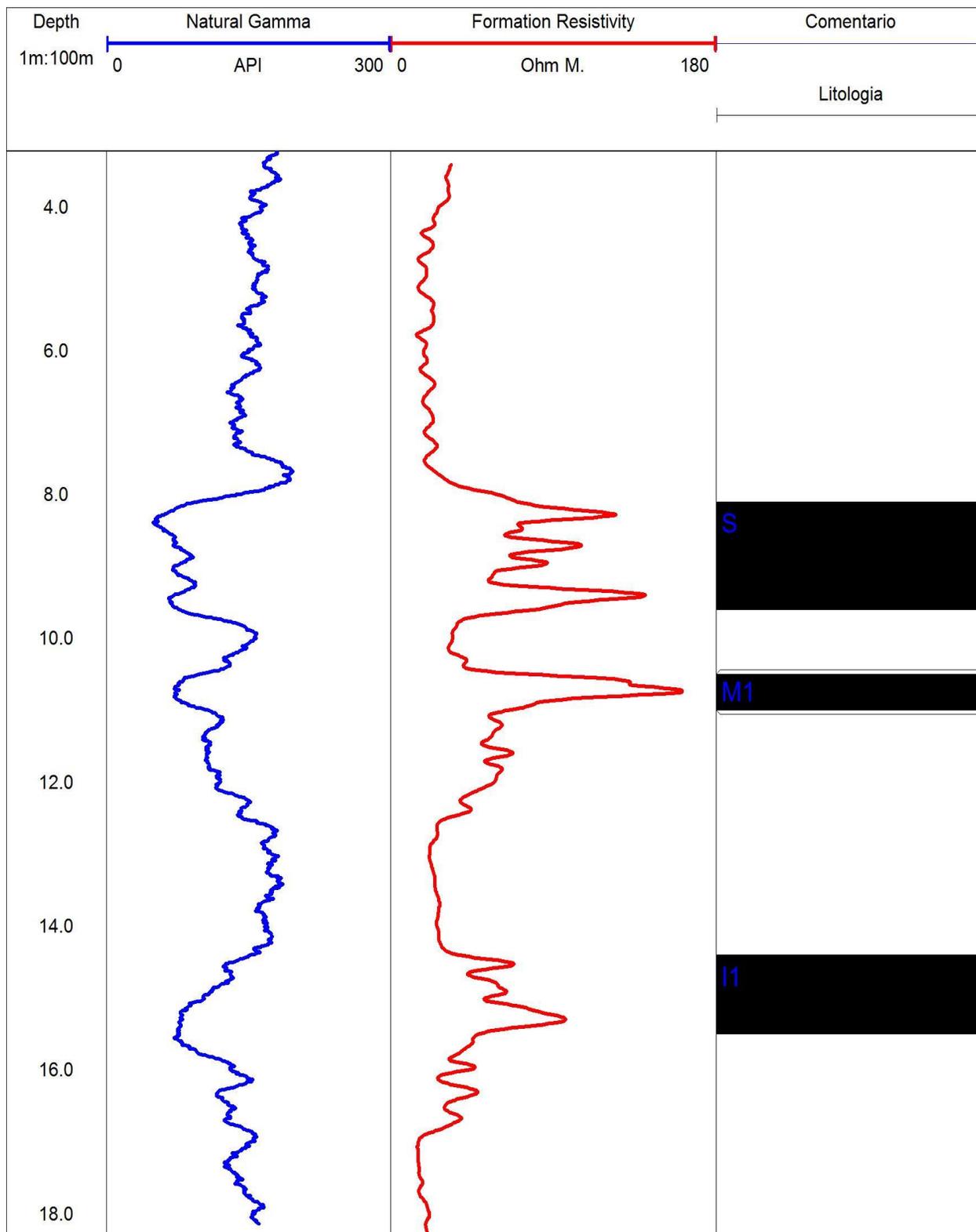
B3-221



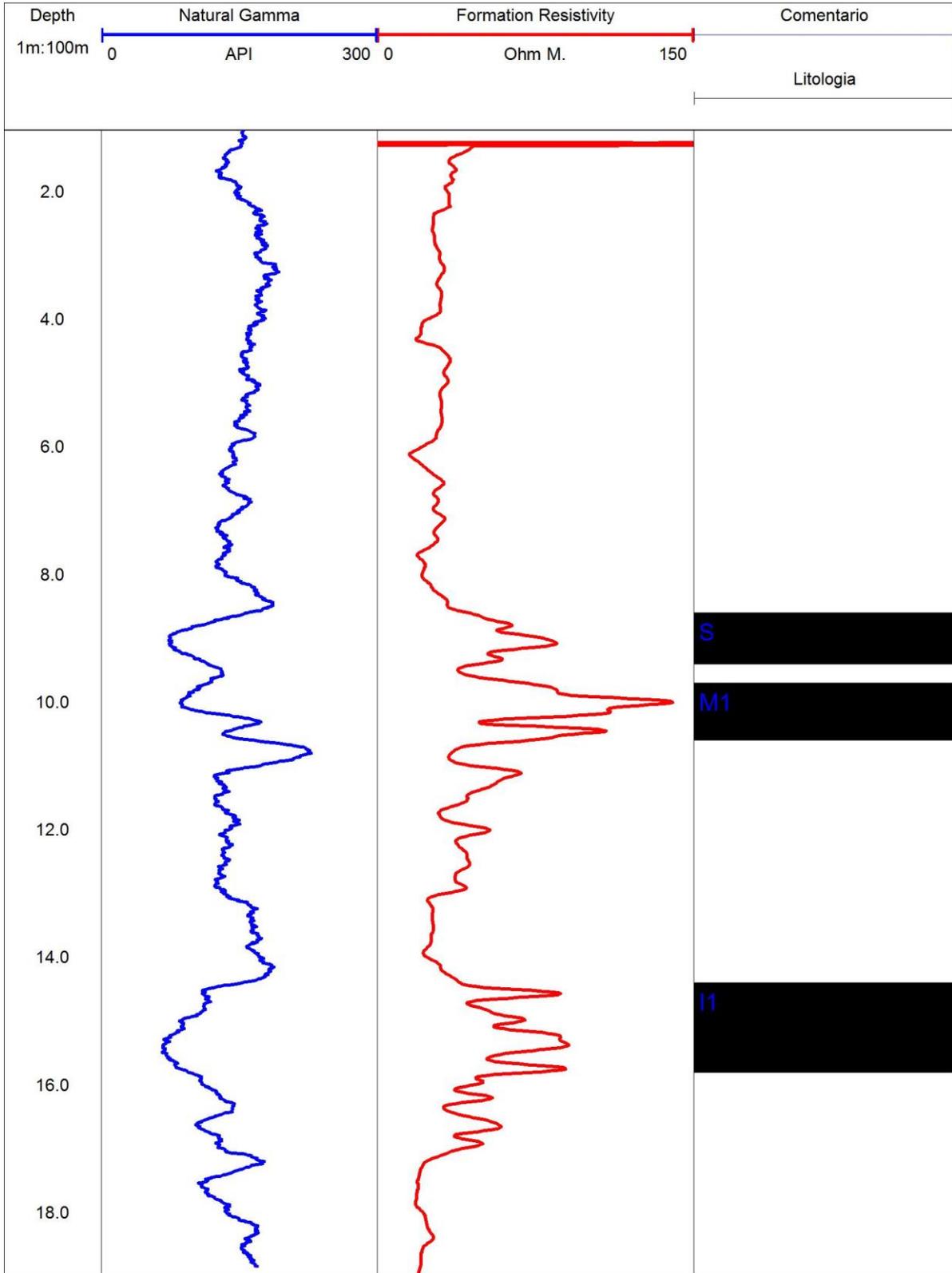
B3-222



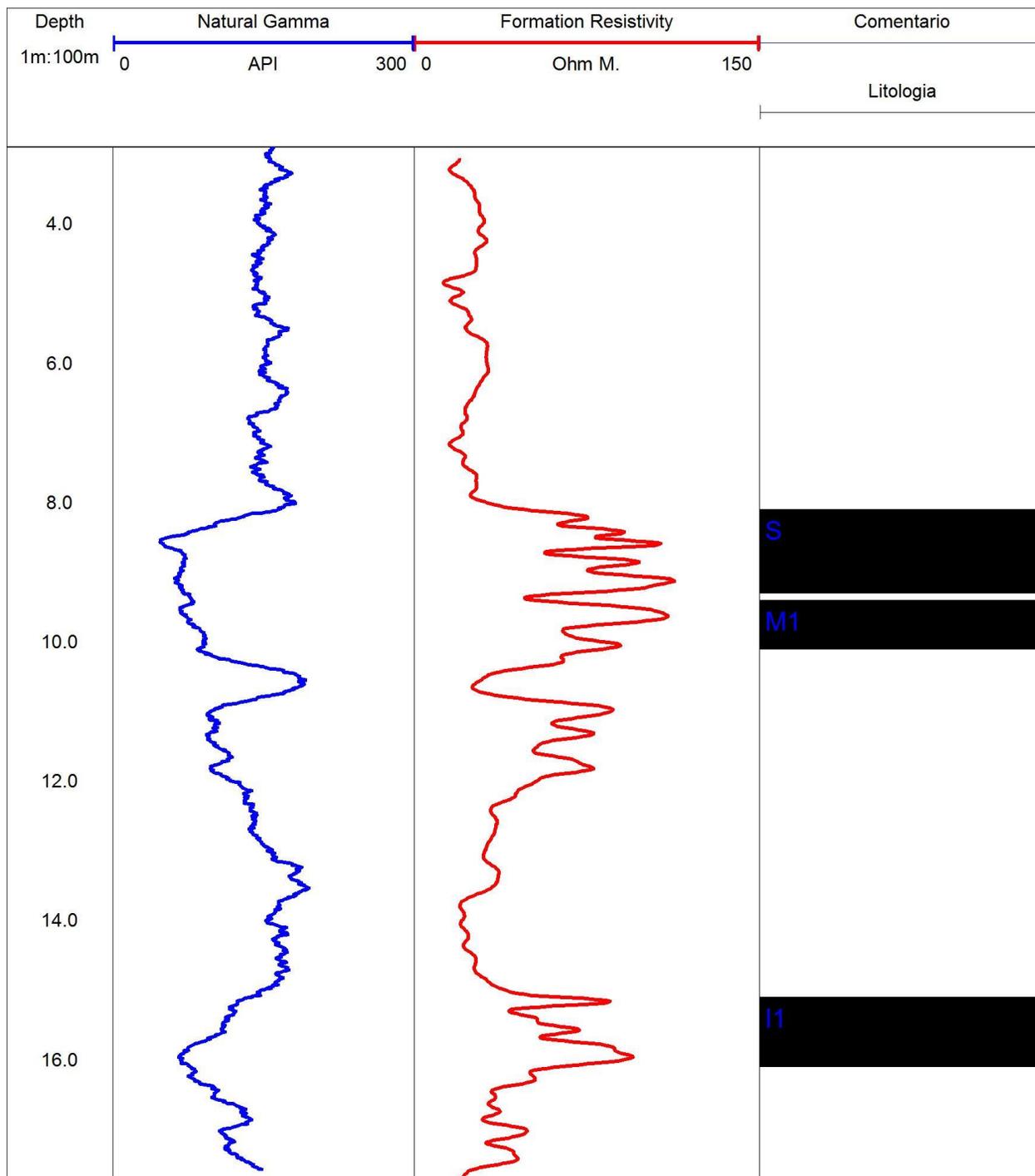
B3-223



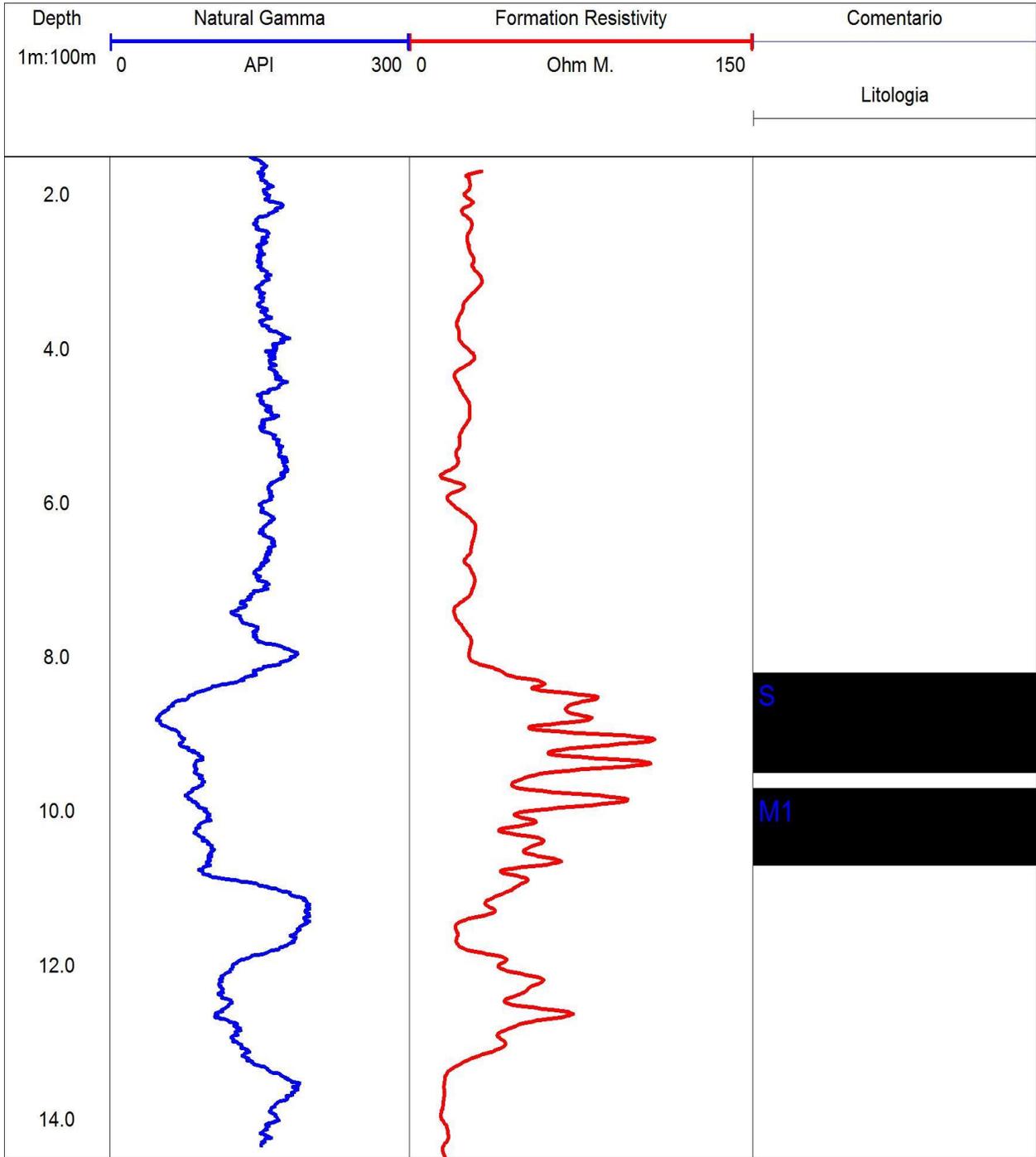
B3-224



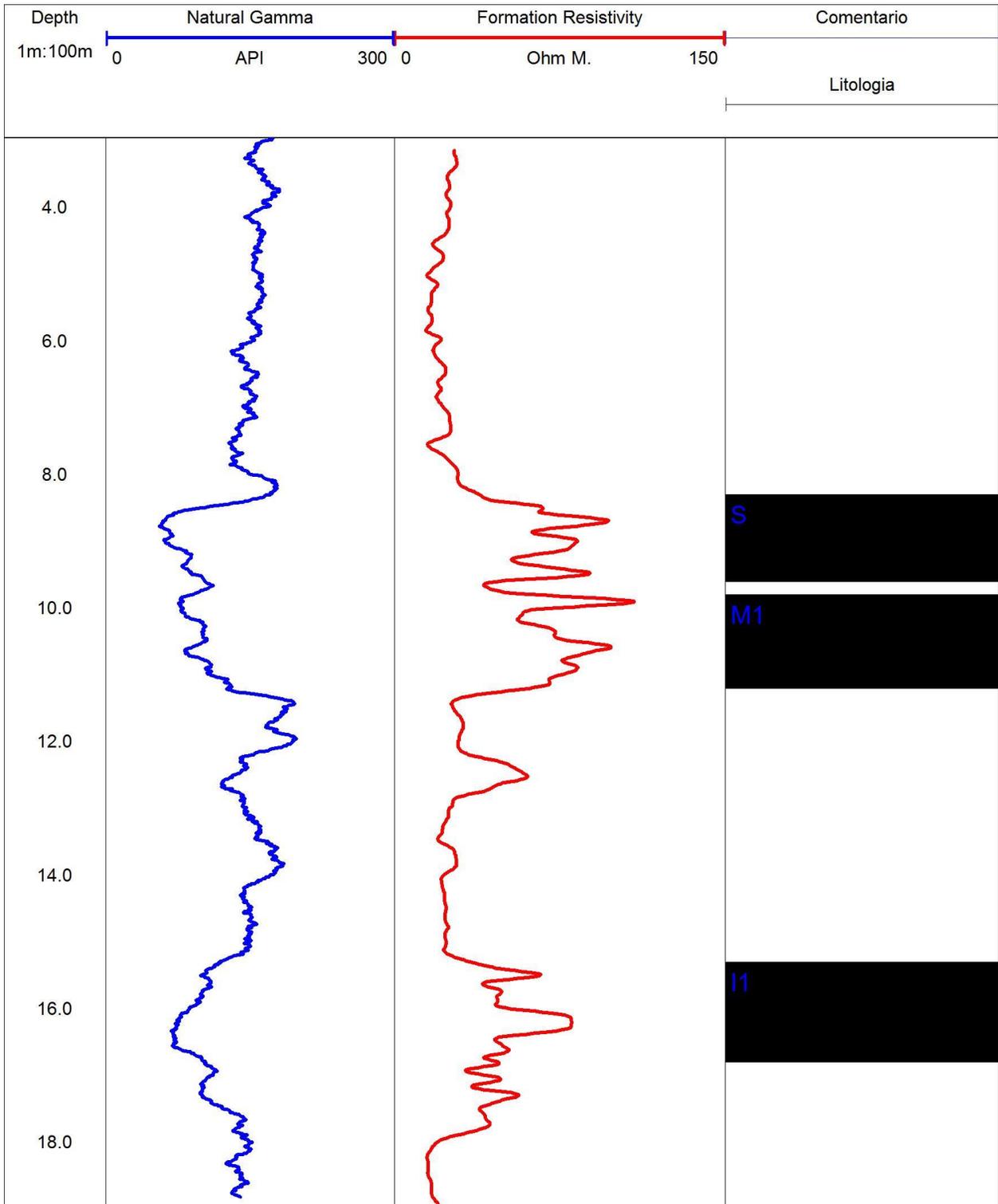
B3-225



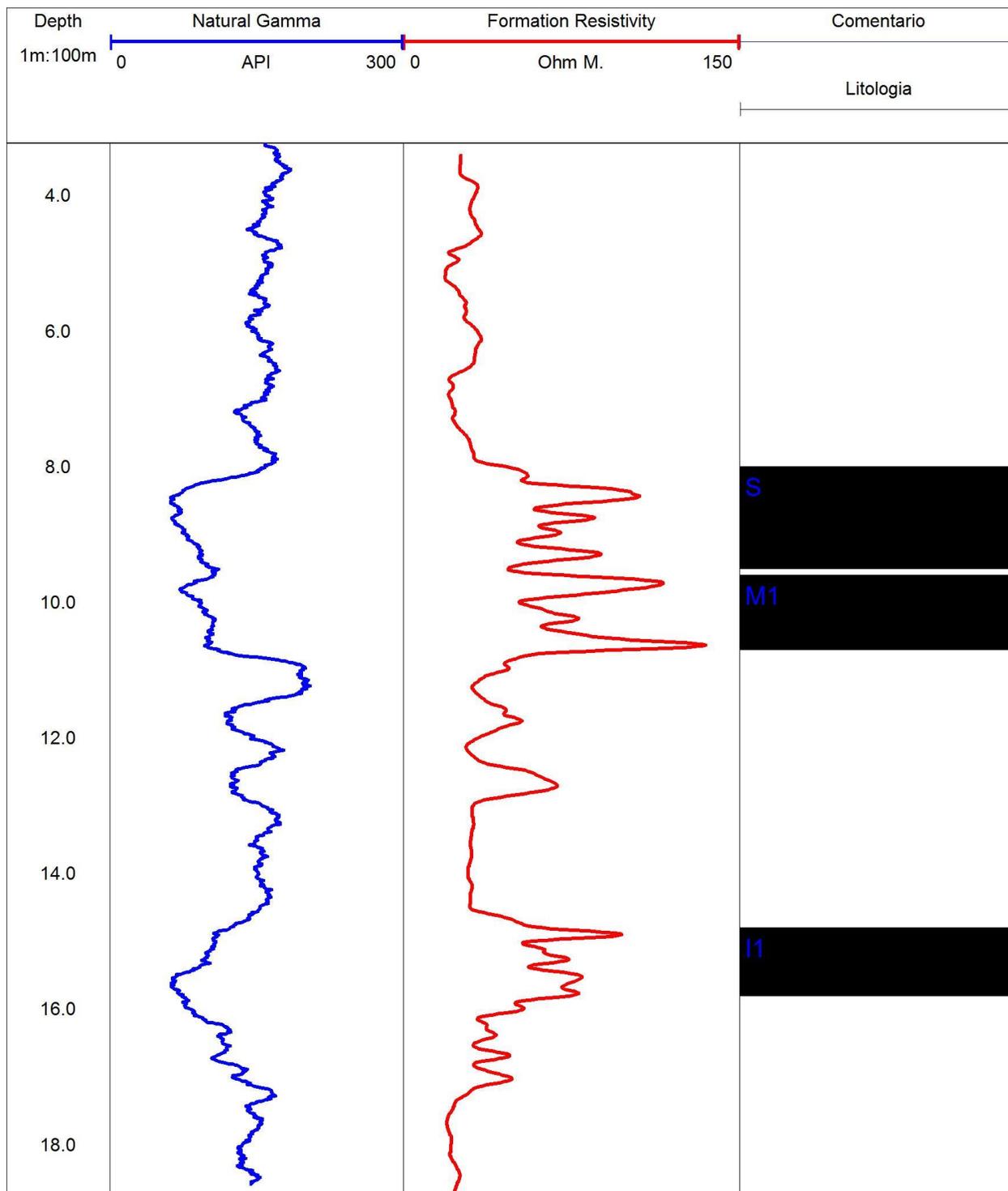
B3-226



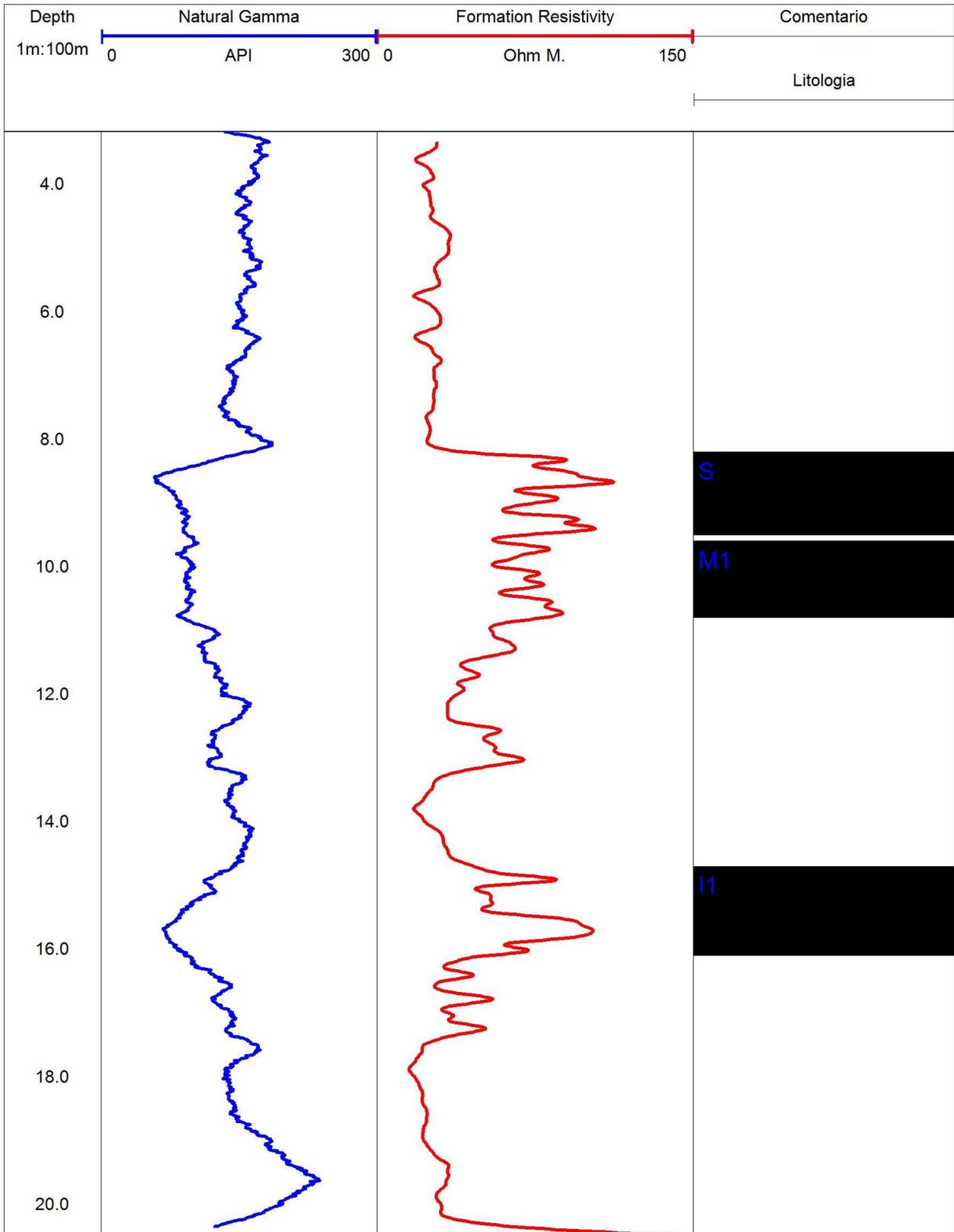
B2-227



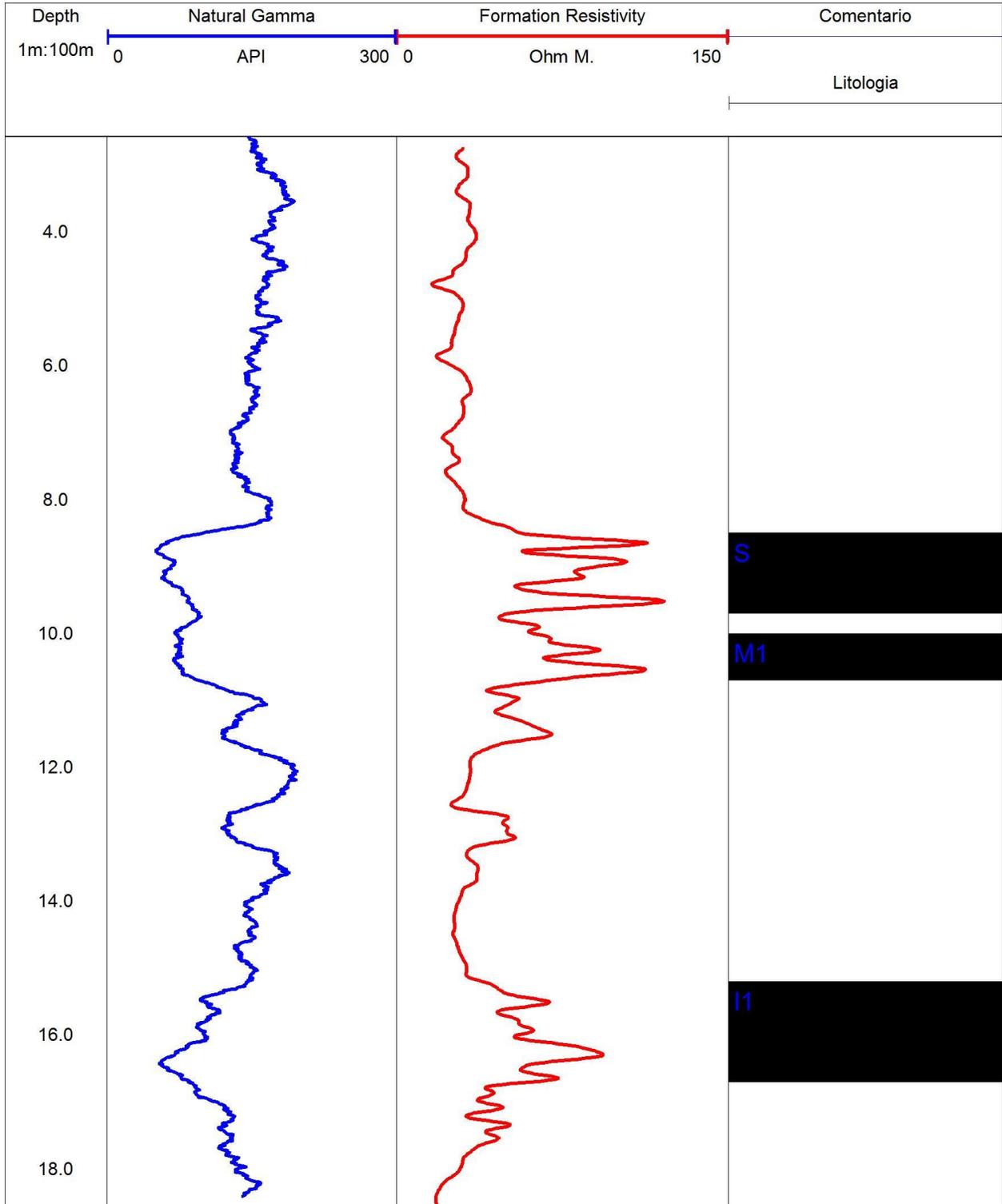
B3-228



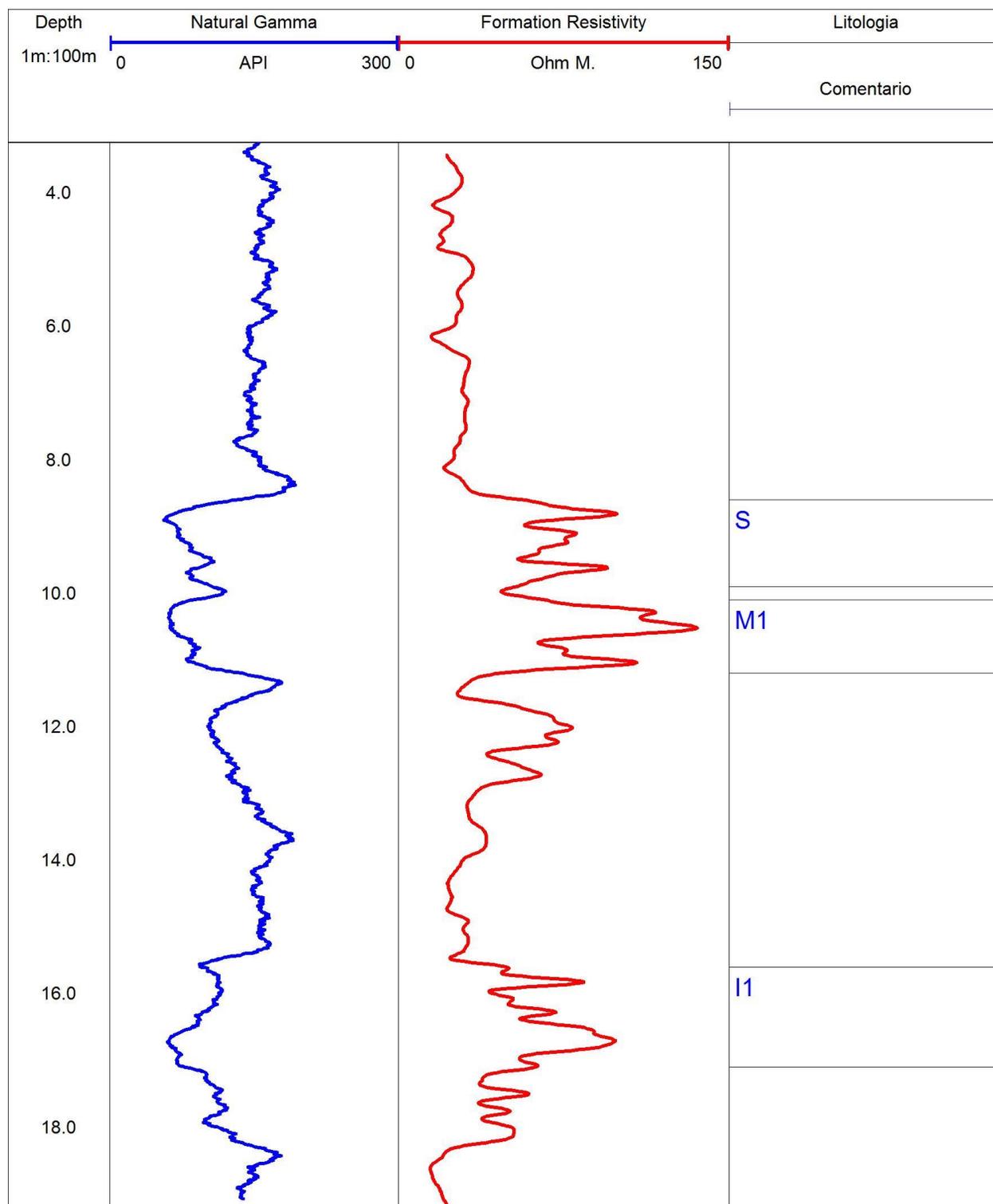
B3-229



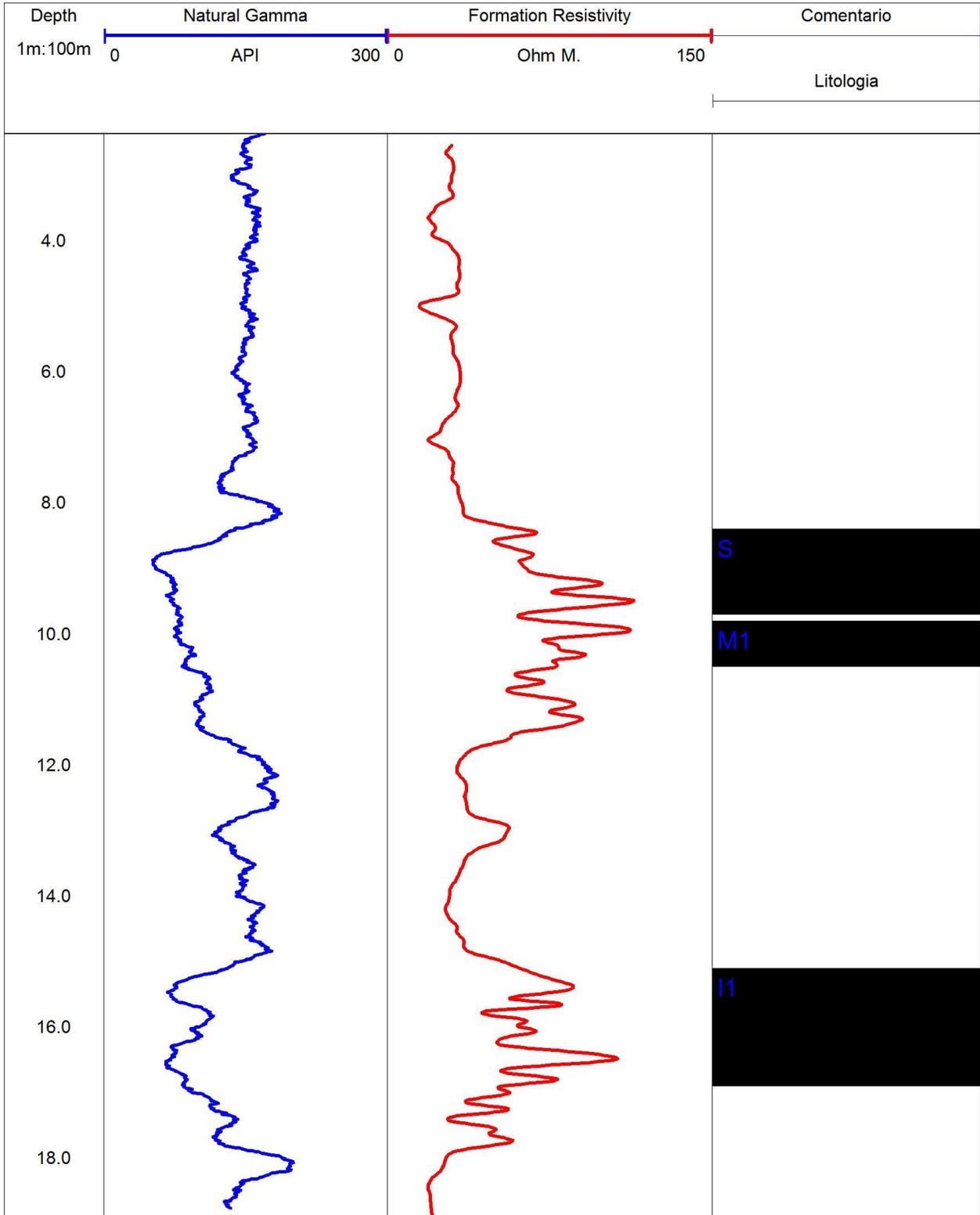
B3-230



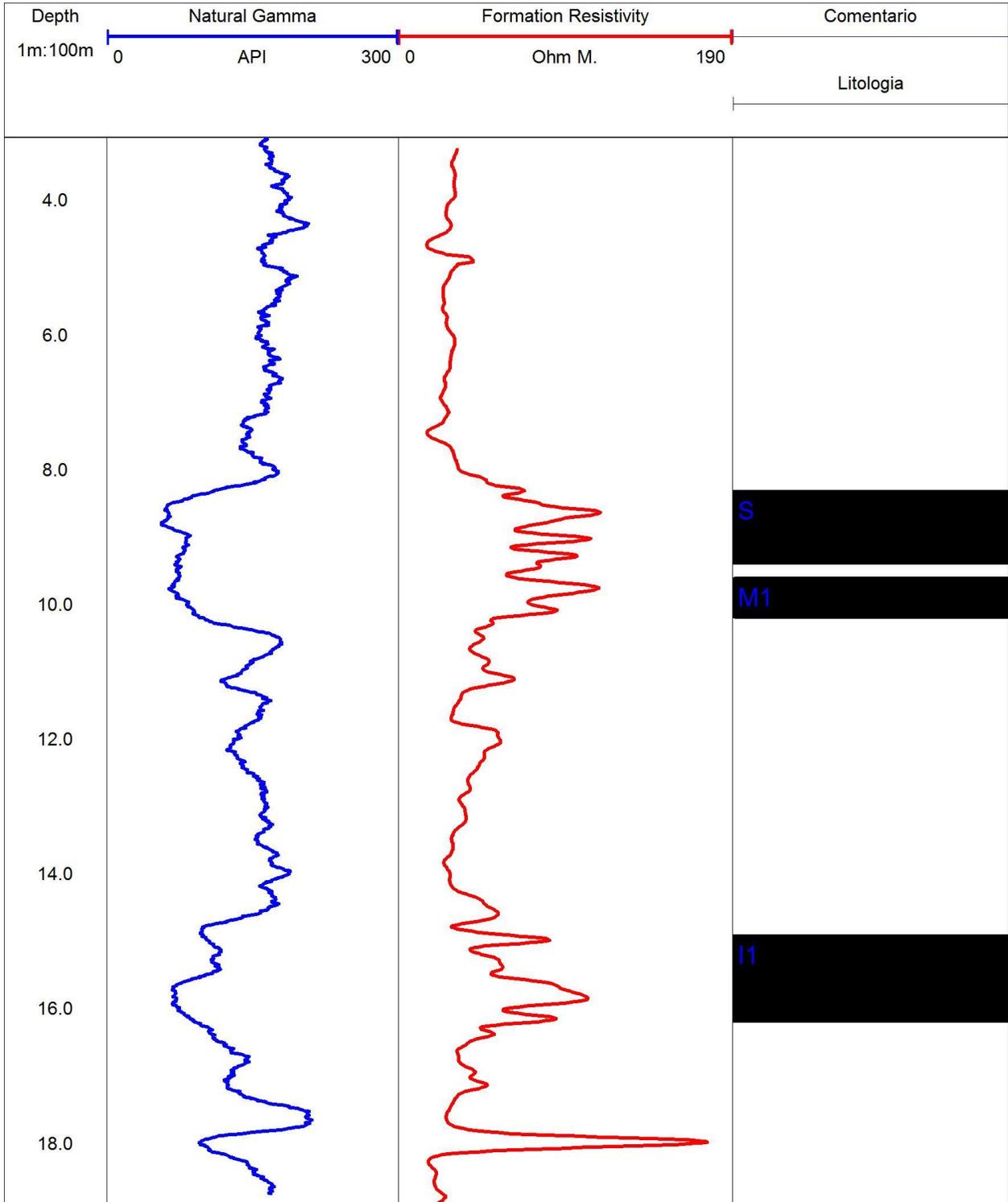
B3-231



B3-232



B3-233



B3-234

