

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

LEANDRO GOMES DE FREITAS

**Aplicação de técnicas de alta resolução para caracterização
geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano**

Rio Claro, SP
2017

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

LEANDRO GOMES DE FREITAS

**Aplicação de técnicas de alta resolução para caracterização
geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Rio Claro, SP
2017

333.709 Freitas, Leandro Gomes de
F866a Aplicação de técnicas de alta resolução para caracterização
geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano /
Leandro Gomes de Freitas. - Rio Claro, 2017
198 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros, fots.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Chang Hung Kiang

1. Geografia ambiental. 2. Investigação geoambiental de
alta resolução. 3. MIP. 4. Metano. 5. Modelo conceitual. I.
Título.

LEANDRO GOMES DE FREITAS

Aplicação de técnicas de alta resolução para caracterização geoambiental de
áreas com ocorrência de gás metano

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Geociências e Meio
Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang
(Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP)

Prof. Dr. Everton de Oliveira
(Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP)

Prof. Dr. Scandar Gasperazzo Ignatius
(Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT)

Rio Claro, SP, 24 de março de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha Família, por todo o carinho, educação, incentivo e amor.

À minha Esposa, que me acompanhou e me incentivou por toda essa jornada, com carinho, paciência e amor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Chang, pela confiança, apoio, ideias e conselhos.

Ao meu coorientador, Dr. Marco Pede, pelo incentivo, confiança, apoio, parceria e amizade.

À Dra. Maria Rita, pela orientação e revisões.

Ao IPT, por todo o suporte e incentivo.

Ao LEBAC, por todo apoio e suporte.

Ao Dr. Scandar, pelo incentivo, revisões, conselhos, por viabilizar os trabalhos de campo e pelas valiosas contribuições na banca.

Ao Dr. Everton, pela revisão e pelas valiosas contribuições na banca.

Ao Dr. Fernando Castro, pelas ideias e discussões, pela revisão e auxílio nos trabalhos de campo e de bancada.

Aos colegas do LEBAC, pela ajuda e pelas valiosas conversas.

Aos colegas do IPT, pelo apoio, incentivo, pelas valiosas conversas e por toda a ajuda nos trabalhos de campo e laboratório.

À Aline Diorio, pelas conversas e ideias, que fizeram as viagens entre São Paulo e Rio Claro mais rápidas e agradáveis.

Ao Marcos Bezerra da ISR, pela ajuda nos trabalhos de campo e de bancada.

À Dra. Fabiana Cagnon e à equipe da SEF-USP, pela viabilização dos trabalhos de campo.

Aos amigos da UNESP Soroca, por tornarem minha vida mais feliz nesse período.

À Deus, que me guiou, me fortaleceu e me iluminou.

RESUMO

Os riscos associados à intrusão de gases e vapores do solo em edificações estão ganhando crescente interesse da sociedade, principalmente pelos possíveis danos à saúde humana ou até mesmo por explosões. Na região metropolitana de São Paulo, estudos ambientais vêm relatando com frequência a ocorrência de gás metano (CH_4) no subsolo, gerando preocupações sociais, políticas e econômicas. Uma forma inovadora de otimizar o diagnóstico dessas áreas e gerar Modelos Conceituais mais consistentes, se dá com a utilização de técnicas de investigação de alta resolução, como o *Membrane Interface Probe* (MIP). Nesse contexto, foi conduzido um estudo para avaliar o potencial do MIP, associado a outras técnicas de investigação, para o diagnóstico geoambiental de uma área com a ocorrência de gás metano no subsolo. A área de estudo foi o campus da USP Leste, no município de São Paulo. O estudo foi realizado em três etapas. Na primeira, foram realizados testes de bancada para a obtenção de curvas de resposta do detector de ionização por chama (FID) do sistema MIP para diferentes misturas gasosas, com diferentes temperaturas de aquecimento da sonda. Na segunda etapa foram realizados os ensaios de campo com o MIP e com as seguintes técnicas auxiliares: *Soil Color Optical Screening Tool* (SCOST); amostragem de gases do solo com o sistema *Post Run Tubbing* (PRT); e, amostragem de solo por sondagens *direct push*. Na terceira etapa foram realizadas as análises laboratoriais das amostras de solo coletadas. Os resultados obtidos foram apresentados por meio de perfis e seções representativas da área de estudo. Nos ensaios de bancada, todas as curvas de resposta mostraram alta correlação entre as respostas do FID e as concentrações de CH_4 das amostras. Os perfis obtidos em campo pelo sensor de condutividade elétrica do MIP, bem como os perfis de cores obtidos pelo SCOST, apresentaram boa correlação qualitativa com as descrições litológicas e com os perfis granulométricos, auxiliando na caracterização litoestratigráfica. Os ensaios MIP confirmaram a alta sensibilidade da ferramenta para a detecção de CH_4 , principalmente com a sonda aquecida, possibilitando o mapeamento de acumulações de biogás no subsolo. A amostragem com o PRT confirmou a existência de concentrações de até 77% v/v de CH_4 nas camadas de depósitos tecnogênicos. Já as análises de teor de matéria orgânica e fração de carbono orgânico mostraram a presença de camadas com elevado teor orgânico e alto potencial metanogênico, principalmente nas camadas de argila orgânica em meio aos sedimentos quaternários. Conclui-se que o MIP demonstra um grande potencial para a caracterização em alta resolução de áreas com ocorrência de gás metano no subsolo e que as técnicas auxiliares forneceram informações importantes para apoiar a interpretação e a validação dos resultados obtidos.

Palavras-chave: MIP. Metano. Modelo conceitual. Investigação de alta resolução.

ABSTRACT

The risks associated with soil gases and vapor intrusion in buildings are gaining increasing attention in our society, mainly because of possible harm to human health or even explosions. In São Paulo Metropolitan Area, environmental studies have frequently reported methane (CH₄) in the subsoil, causing social, political and economic concerns. An innovative approach to optimize site assessment for these cases and generate more consistent conceptual site models (CSM), is through the application of high resolution site characterization (HRSC) tools, as the Membrane Interface Probe (MIP). In this context, a study was carried out to evaluate the potential of the MIP, associated with other subsurface investigation techniques, for the geoenvironmental diagnosis of an area with methane gas occurrence in the subsoil. The study area was the university campus of USP Leste, at São Paulo city. The study was performed in three stages, including laboratory and field procedures. On the first one, bench tests were performed to obtain response curves of the MIP's Flame Ionization Detector (MIP/FID) for different gas mixtures, with variable probe heating temperatures. On the second stage, MIP tests were performed in the field, with the following auxiliary techniques: Soil Color Optical Screening Tool (SCOST); soil gas sampling with the Post Run Tubbing (PRT) system; and the direct push whole core soil sampling. The third and last stage consisted of laboratory analysis of the soil samples. The results of the bench tests showed very strong correlations between the FID's response and the CH₄ concentration of the samples. The profiles obtained on the field by the MIP's electrical conductivity sensor and by the SCOST showed good qualitative correlation with the lithological descriptions and with the granulometric profiles, supporting the lithostratigraphic characterization. The MIP/FID results confirmed its high sensitivity to CH₄ detection, especially with the heated probe, enabling the mapping of biogas accumulations in the subsurface. The PRT gas sampling confirmed methane's concentrations as high as 77% v/v in the landfill layers. The organic matter analysis showed high organic content layers with great methanogenic potential, especially in the organic clay layers of the quaternary sediments. It was concluded that MIP has a great potential for the high resolution characterization of sites with methane gas occurrence and the auxiliary techniques also provided valuable information to support the interpretation and validation of the results.

Keywords: MIP. Methane. Conceptual site model. High resolution site characterization.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variação da solubilidade do CH ₄ na água com a pressão. (NSW EPA, 2012)....	9
Figura 2. Variação da solubilidade do CH ₄ na água com a temperatura.(NSW EPA, 2012) 9	
Figura 3. Distribuição das ACs com presença de CH ₄ em relação à hidrografia e ao mapeamento dos sedimentos quaternários na RMSP.....	15
Figura 4. Esquema dos componentes e do funcionamento do SCOST. Ilustração sem escala. (HAUSMANN et al., 2016).....	22
Figura 5. Amostragem de gases do solo pelo sistema PRT. (GEOPROBE, 2013).....	24
Figura 6. Operação do sistema de amostragem de solo <i>Direct Push Single Tube</i> . (ASTM, 2014).....	27
Figura 7. Operação do sistema de amostragem de solo <i>Direct Push Dual Tube</i> . (ASTM, 2014).....	28
Figura 8. Princípio de operação da sonda MIP (GEOPROBE, 2012)	31
Figura 9. Principais componentes do sistema MIP. (GEOPROBE, 2012).....	31
Figura 10. Representação do aparato de cravação e operação do sistema MIP. (WATT et al., 2010).....	34
Figura 11. Localização do Campus da EACH-USP.	45
Figura 12. Localização dos pontos de investigação (<i>clusters</i>), com a distribuição espacial dos ensaios e amostragens executadas em cada um.	63
Figura 13. Gráficos de resposta do detector FID com a sonda MIP a 51 °C (acima) e a 121 °C (abaixo).	80
Figura 14. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 1.	82
Figura 15. Teste de resposta para 10 mL de mistura gasosa com 100% de CH ₄ , realizado no Ensaio 2.....	84
Figura 16. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 3.	85
Figura 17. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 4.	86
Figura 18. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 5.	88
Figura 19. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 6.	89
Figura 20. Compilação das curvas de resposta do detector FID.	91
Figura 21. Resultados dos ensaios MIP-01, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).	94
Figura 22. Resultados dos ensaios MIP-02, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).	95

Figura 23. Resultados dos ensaios MIP-03, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).	95
Figura 24. Resultados dos ensaios MIP-04, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).	96
Figura 25. Resultados dos ensaios MIP-05, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).	96
Figura 26. Resultados dos ensaios MIP-06, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).	97
Figura 27. Resultados dos ensaios MIP-07 nas temperaturas ambiente (a), ambiente com	97
Figura 28. Seção esquemática de condutividade elétrica A-A'.	99
Figura 29. Seção esquemática de condutividade elétrica B-B'.	100
Figura 30. Seção esquemática A-A', com a sobreposição dos resultados do detector FID e do sensor EC.	110
Figura 31. Seção esquemática B-B', com a sobreposição dos resultados do detector FID e do sensor EC.	111
Figura 32. Perfil do ensaio SCOST-02, com a delimitação das principais camadas.....	114
Figura 33. Perfil do ensaio SCOST-01b, com a delimitação das principais camadas.....	115
Figura 34. Composição das amostras de gases do solo obtidas pelo sistema PRT.....	120
Figura 35. Perfis granulométricos das sondagens <i>direct push</i>	125
Figura 36. Perfis dos resultados de caracterização geoquímica do ponto SDP-01.	126
Figura 37. Perfis dos resultados de caracterização geoquímica do ponto SDP-05.	128
Figura 38. Perfis dos resultados de caracterização geoquímica do ponto SDP-07.	129
Figura 39. Integração dos perfis dos ensaios realizados nos <i>cluster</i> P1.	133
Figura 40. Integração dos perfis dos ensaios realizados nos <i>cluster</i> P5.	134
Figura 41. Integração dos perfis dos ensaios realizados nos <i>cluster</i> P7.	135

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Informações gerais, propriedades físicas e químicas do metano.....	8
Tabela 2. Proporções das misturas de CH ₄ diluído em AR.....	58
Tabela 3. Dados dos ensaios para a elaboração das curvas de resposta do detector FID.	59
Tabela 4. Informações gerais da execução dos ensaios com a sonda MIP.....	66
Tabela 5. Informações da execução dos ensaios com o sistema SCOST.....	70
Tabela 6. Informações da amostragem de gases do solo com o sistema PRT.....	72
Tabela 7. Informações gerais da amostragem de solo pelo método direct push.....	74
Tabela 8. Amostras de solo enviadas para análise de granulometria.	77
Tabela 9. Amostras de solo enviadas para análise de MO, FCO, pH e CE.	78
Tabela 10. Resultados do Ensaio 1 para elaboração da curva de resposta.....	82
Tabela 11. Resultados do Ensaio 2 para elaboração da curva de resposta.....	83
Tabela 12. Resultados do Ensaio 3 para elaboração da curva de resposta.....	84
Tabela 13. Resultados do Ensaio 4 para elaboração da curva de resposta.....	86
Tabela 14. Resultados do Ensaio 5 para elaboração da curva de resposta.....	87
Tabela 15. Resultados do Ensaio 6 para elaboração da curva de resposta.....	89
Tabela 16. Valores dos dados de regressão linear e parâmetros experimentais dos ensaios.	91
Tabela 17. Principais resultados do detector FID obtidos nos ensaios de campo.....	103
Tabela 18. Maiores leituras de biogás obtidas na boca dos furos de sondagem.	117
Tabela 19. Principais resultados da amostragem de gases do solo pelo sistema PRT. .	118
Tabela 20. Resultados das análises granulométricas do ponto SDP-01.....	122
Tabela 21. Resultados das análises granulométricas do ponto SDP-05.....	123
Tabela 22. Resultados das análises granulométricas do ponto SDP-07.....	124
Tabela 23. Resultados dos ensaios de caracterização geoquímica do ponto SDP-01. ..	126
Tabela 24. Resultados dos ensaios de caracterização geoquímica do ponto SDP-05. ..	127
Tabela 25. Resultados dos ensaios de caracterização geoquímica do ponto SDP-07. ..	129

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 A problemática das áreas contaminadas	4
3.1.1 Riscos relacionados aos gases e vapores	6
3.2 Ocorrência de gás metano no subsolo.....	7
3.2.1 Características gerais do metano.....	7
3.2.2 Importância do metano no contexto global e o papel dos solos.....	9
3.2.3 Geração, consumo e transporte no subsolo	11
3.2.4 Riscos ambientais e áreas contaminadas com metano	13
3.3 Investigação geoambiental de alta resolução	16
3.3.1 Soil Color Optical Screening Tool	20
3.3.2 Sistema Post Run Tubing	23
3.3.3 Amostragem de solo Direct Push.....	25
3.4 Membrane Interface Probe	29
3.4.1 Aplicação do detector FID para detecção de metano	39
3.4.2 Aplicações do sensor de condutividade elétrica.....	41
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	45
4.1 USP Leste	46
4.2 Aspectos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos	48
4.3 Caracterização do local dos levantamentos de campo	49
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
5.1 Ensaios preliminares para ajustes do sistema MIP e validação do experimento ..	53
5.2 Elaboração das curvas de resposta do FID a diferentes misturas gasosas	56
5.3 Execução dos ensaios e amostragens em campo	62
5.3.1 Execução de ensaios com a sonda MIP	64
5.3.2 Execução de ensaios com o sistema SCOST.....	68
5.3.3 Amostragens discretas de gases do solo com sistema PRT	70
5.3.4 Execução de sondagens direct push para amostragem de solo	72
5.4 Descrição tátil visual e coleta de amostras de solo para análises laboratoriais ..	75
5.5 Processamento e apresentação dos dados	78

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
6.1 Ensaio preliminar	80
6.2 Curvas de resposta do detector FID a diferentes misturas gasosas	81
6.2.1 Ensaio 1	81
6.2.2 Ensaio 2	83
6.2.3 Ensaio 3	84
6.2.4 Ensaio 4	85
6.2.5 Ensaio 5	87
6.2.6 Ensaio 6	88
6.2.7 Considerações sobre o experimento	90
6.3 Ensaio de campo com a sonda MIP	93
6.3.1 Resultados do sensor de condutividade elétrica	98
6.3.2 Resultados do detector FID	102
6.4 Ensaio de campo com o sistema SCOST	112
6.5 Medições de gases nos furos de sondagens e amostragens discretas pelo sistema PRT	117
6.6 Descrições litológicas e resultados das análises laboratoriais	120
6.6.1 Considerações sobre as análises laboratoriais dos solos	130
6.7 Análise integrada dos resultados e definição do modelo conceitual	132
6.7.1 Modelo conceitual litoestratigráfico	136
6.7.2 Modelo conceitual para a dinâmica do gás metano	137
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	141
7.1 Aspectos gerais	141
7.2 Resultados	141
7.3 Conclusões	144
7.4 Limitações e Recomendações	146
8. BIBLIOGRAFIA	148
Apêndice A – Resultados do MIP	161
Apêndice B – Resultados do SCOST	192
Apêndice C – Boletins de sondagens direct push	195

1. INTRODUÇÃO

As áreas contaminadas são um dos grandes problemas ambientais da atualidade, representando um importante fator de risco à saúde pública, principalmente nas áreas urbanas, podendo ser ainda mais relevantes em locais que apresentam gases e vapores no subsolo. Nesses casos, há possibilidade de sua intrusão e acúmulo nas edificações, o que pode provocar danos à saúde humana e até explosões.

No Estado de São Paulo, vários casos vêm sendo objeto de preocupação técnica, política e social nesse contexto, como: o Lixão do Alvarenga, em São Bernardo do Campo; o Shopping Center Norte e seu entorno, localizado em São Paulo; conjuntos habitacionais construídos pela Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) e pela Companhia Metropolitana de Habitação de São Paulo (COHAB); e o recente caso da USP – Campus Leste, também no município de São Paulo (CETESB, 2014).

O atual cenário do gerenciamento de áreas contaminadas (GAC) no Estado de São Paulo vem demonstrando a necessidade de se ampliar o debate e aprofundar o conhecimento quanto aos riscos associados à ocorrência de gases no subsolo, principalmente em relação ao gás metano, presente em diversos casos. No entanto, o estabelecimento de diretrizes para investigação e intervenção ainda esbarra em lacunas do conhecimento técnico e científico quanto aos processos, naturais ou induzidos pelo homem, responsáveis pela geração, transporte e acúmulo de gases no subsolo dessas áreas.

Uma das questões em voga no presente é a necessidade de se buscar métodos que garantam maior agilidade e eficácia ao processo de diagnóstico de áreas contaminadas. Para essa finalidade, vem crescendo o uso de ferramentas de investigação geoambiental de alta resolução (*High Resolution Site Characterization tools* – HRSC), que são capazes de fornecer dados para subsidiar a elaboração de modelos conceituais mais consistentes.

No rol de tecnologias existentes, a sonda *Membrane Interface Probe* (MIP) se destaca por vários motivos: permite a detecção, em tempo real, de gases e compostos orgânicos voláteis no subsolo; possibilita a obtenção de um grande volume de dados em um único ensaio, com escala vertical de centímetros; pode ser aplicada simultaneamente com outras ferramentas de alta resolução, como o

Piezocone (CPTu); e ainda reduz consideravelmente a necessidade de investigações por meio de poços de monitoramento, o que diminui o custo e o tempo dos diagnósticos, além de minimizar a geração de resíduos.

A utilização da sonda MIP para investigar a migração de metano no subsolo já foi objeto de estudos no exterior (MDNR, 1999), onde se avaliou os caminhos preferenciais da migração do gás a partir de aterros de resíduos domésticos. No Brasil, apesar dessa técnica já ser utilizada por consultorias ambientais há alguns anos, são escassos os estudos e publicações sobre a ferramenta, principalmente para caracterização de áreas com ocorrência de gás metano.

Nesse contexto, o presente trabalho visa a condução de um estudo acadêmico inédito, envolvendo a experimentação da ferramenta MIP, associada a outras técnicas de caracterização do subsolo, de forma a subsidiar a discussão do potencial dessas ferramentas no diagnóstico geoambiental de áreas urbanas com a presença de gás metano no subsolo.

Esta dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos. Uma introdução, para contextualização geral, é apresentada no primeiro capítulo, enquanto que os objetivos gerais e específicos são apresentados no segundo. No terceiro capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que embasou o trabalho, abordando a questão das áreas contaminadas, a ocorrência de gás metano no subsolo, os conceitos e métodos de investigação geoambiental de alta resolução, com destaque para algumas das técnicas empregadas no estudo, e, as características, potencialidades e limitações da sonda MIP e de seus diversos detectores. No quarto capítulo é apresentada a caracterização da área de estudo, que foi utilizada para a aplicação das técnicas propostas em campo. No quinto capítulo são apresentados os materiais e métodos empregados, tanto nas etapas de bancada em laboratório, quanto nas etapas de campo. O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos em cada etapa, bem como a discussão e a integração destes, que culminam na formulação de um modelo conceitual para a área de estudo. No sétimo capítulo são apresentadas as considerações finais, envolvendo uma compilação dos principais resultados e das conclusões obtidas, bem como o apontamento de algumas limitações e sugestões para o aprimoramento da metodologia proposta. No último capítulo são apresentadas as referências bibliográficas do estudo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o uso de técnicas de investigação de alta resolução para caracterização geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano no subsolo.

2.2 Objetivos Específicos

Foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as possibilidades e limitações do uso da sonda MIP para detecção e mapeamento de gás metano no subsolo, bem como para a caracterização litoestratigráfica em alta resolução dessas áreas;
- Avaliar o uso conjugado da sonda MIP com técnicas auxiliares de campo e de laboratório, para a caracterização geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano; e
- Elaborar o modelo conceitual de uma área com gás metano no subsolo, visando analisar os fatores ambientais responsáveis pela dinâmica deste composto no subsolo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo aborda os principais temas que embasam o estudo, a saber: a problemática das áreas contaminadas; a ocorrência de gás metano no subsolo; a investigação geoambiental de alta resolução, com destaque para algumas técnicas utilizadas no estudo; e, por fim, um tópico específico sobre o MIP, destacado como a principal ferramenta utilizada no trabalho.

3.1 A problemática das áreas contaminadas

O estudo e o gerenciamento das áreas contaminadas (ACs) têm grande relevância na atualidade, tanto por sua complexidade técnica, quanto por questões sociais, econômicas, políticas, ambientais e de saúde pública.

A preocupação acerca dos riscos causados pelas ACs ganhou destaque na comunidade internacional nas décadas de 1970 e 1980, devido à ocorrência de casos emblemáticos envolvendo a contaminação do solo e água subterrânea. Os principais ocorreram na América do Norte (Love Canal, nos Estados Unidos e "*Ville la Salle*", no Canadá) e na Europa ("*Lekkerkerk*", na Holanda), resultando no aumento da conscientização perante essa problemática (BEAULIEU, 1998 apud CETESB, 2001).

No Brasil, essa conscientização se iniciou por volta da década de 1990, com casos marcantes, principalmente na região Sudeste, como o caso Rhodia na Baixada Santista; o Aterro Mantovani, em Santo Antônio de Posse - SP; o caso da Cidade dos Meninos, em Duque de Caxias – RJ, entre outros que tiveram grande repercussão na mídia nacional.

As primeiras regulamentações que tratam especificamente sobre o tema são relativamente recentes no Brasil, e foram publicadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) no início da década de 2000, com o lançamento do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001), e de normativas focadas principalmente no processo de licenciamento ambiental do setor de postos e sistemas retalhistas de combustíveis. O primeiro instrumento legal específico foi a Lei Estadual Nº 13.577, publicada em 08 de julho de 2009 (SÃO PAULO, 2009). Quando se aborda a questão em nível nacional, apesar da publicação da Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009 (CONAMA,

2009), o cenário ainda é incipiente. A maioria dos estados não possui legislações específicas e os órgãos ambientais ainda estão pouco preparados para lidar com o problema (IPT, 2015). Segundo a Lei Estadual Nº 13.577, as áreas contaminadas são definidas como:

“área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger” (SÃO PAULO, 2009).

Esses contaminantes podem se propagar por diferentes vias, alterando a qualidade do meio e determinando impactos negativos e/ou riscos aos bens a proteger, localizados tanto na própria área, como em seus arredores. Segundo a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei Federal Nº 6.938/81), são considerados bens a proteger: a saúde e o bem-estar da população; a fauna e a flora; a qualidade do solo, das águas e do ar; os interesses de proteção à natureza/paisagem; a ordenação territorial e planejamento regional e urbano; a segurança e a ordem pública (BRASIL, 1981).

No contexto urbano, como o da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), as ACs representam uma questão ainda mais relevante de risco à saúde pública e também ao desenvolvimento urbano. Com a desconcentração industrial observada na metrópole paulista a partir da década de 1980, muitos imóveis foram desocupados e abandonados, gerando os chamados *brownfields*. Muitas dessas áreas permaneceram com contaminantes no solo e/ou em suas instalações, caracterizando um dos principais aspectos dos passivos ambientais. Somam-se, a esse contexto, antigos locais de deposição de resíduos, materiais de dragagem e entulhos de construção, sendo que todas essas áreas apresentam um potencial de interesse urbanístico, imobiliário e social (CETESB, 2001).

Com a crescente valorização imobiliária observada nas últimas décadas, muitos desses *brownfields* estão passando por mudanças no seu uso e ocupação, sendo destinados à instalação de empreendimentos residenciais e comerciais (MORINAGA, 2013). Do ponto de vista urbanístico, essa revitalização é um fato muito benéfico, pois cria novos espaços para acomodar a crescente demanda por habitação e de outros usos inerentes à cidade. No entanto, no contexto do GAC, esse processo pode ocasionar situações de risco à saúde dos usuários e ao meio ambiente, caso não seja precedido de um diagnóstico ambiental adequado, devido à

possível exposição aos contaminantes existentes no local. O gerenciamento incorreto pode causar a desvalorização dos imóveis e, em situações mais críticas, pode representar riscos ainda mais graves, como incêndios e explosões.

3.1.1 Riscos relacionados aos gases e vapores

Os riscos associados à presença de gases e vapores no subsolo vêm ganhando crescente atenção da sociedade como um dos principais problemas relacionados às áreas contaminadas, principalmente pela possibilidade de intrusão e acúmulo nas edificações, podendo causar danos à saúde dos ocupantes. Os gases e vapores provenientes tanto de fontes antrópicas (ex. hidrocarbonetos de petróleo), quanto de fontes naturais no subsolo (ex. gás radônio), podem migrar e se acumular sob as edificações sobrejacentes, possibilitando sua entrada por meio de rachaduras nas fundações e por tubulações e conduítes, podendo contaminar o ar interior. Mesmo nas construções não destinadas à ocupação humana (ex. cisternas) pode ocorrer o acúmulo desses gases, gerando atmosferas de risco aos eventuais usuários/ trabalhadores (USEPA, 2015).

Apesar de estudos indicarem a atenuação das concentrações de vapores do solo, até a intrusão em edifícios, em até 1000 vezes (API, 1998), estes compostos podem se acumular nas estruturas e no seu interior com o passar do tempo. Em certas circunstâncias de exposição crônica, compostos potencialmente tóxicos podem causar danos à saúde humana a longo prazo (USEPA, 2015).

A intrusão de gases e vapores em ambientes fechados pode gerar também o risco de asfixia aos usuários ou trabalhadores, pois o acúmulo pode gerar uma atmosfera pobre em oxigênio (ABNT, 2001). No entanto, conforme mencionado anteriormente, o risco mais crítico está associado ao potencial acúmulo de certos compostos inflamáveis, como o gás metano, sob as lajes e no interior de edificações, podendo representar um perigo iminente e substancial para a saúde humana e ao bem-estar público.

Um dos casos mais conhecidos relacionados ao assunto é o acidente ocorrido no Condomínio Barão de Mauá, no município de Mauá – SP, em abril de 2000, onde o acúmulo de vapores em uma cisterna do condomínio (provenientes de um antigo depósito de resíduos industriais), propiciou uma explosão, provocando uma vítima fatal (CETESB; 2001).

Os casos com presença de gases e vapores no subsolo estão entre as principais situações onde os órgãos reguladores exigem a adoção de ações de intervenção mais incisivas e imediatas, como interdições, evacuações e a implantação de sistemas de remediação. Muitos países do mundo vêm desenvolvendo pesquisas e normas para o gerenciamento dos casos relacionados à intrusão de vapores (USEPA, 2015; VDI, 1998; NSW EPA, 2010).

No Brasil, apesar da popularidade do tema no meio técnico e acadêmico, ainda se observam poucos estudos e a ausência de normas específicas para tratar dessa questão.

3.2 Ocorrência de gás metano no subsolo

O metano (CH_4) é um composto químico de grande importância para os estudos ambientais, devido a sua relação com assuntos altamente relevantes na atualidade, como as mudanças climáticas (IPCC, 2013); a geração de energia, por meio do gás natural e do biogás (STRONG et al., 2015; THEMELIS; ULLOA, 2007); por questões ligadas ao transporte e à biodegradação de contaminantes no subsolo (YAO et al., 2015; MA et al., 2012); e devido aos riscos associados ao seu potencial explosivo (USEPA, 2015). A seguir, são apresentados os principais aspectos ambientais relacionados ao gás metano no subsolo.

3.2.1 Características gerais do metano

O metano é o hidrocarboneto mais simples da família dos alcanos e de maior abundância na atmosfera terrestre, sendo fundamental no ciclo global do carbono (CALDWELL et al., 2008). A **Tabela 1** apresenta algumas informações gerais e um resumo de suas principais propriedades físicas e químicas.

Tabela 1. Informações gerais, propriedades físicas e químicas do metano.

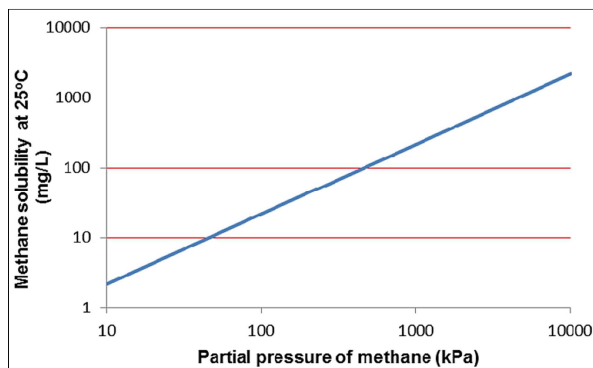
Propriedade	Unidade ⁺	Valor	Fonte
Fórmula molecular	-	CH ₄	*1
Número CAS	-	74-82-8	*1
Peso molecular	g/mol	16,043	*1
Densidade (CNTP)	g/L	0,717	*2
Densidade relativa ao ar (CNTP)	-	0,554	*2
Ponto de ebulição	°C	-161,5	*1
Ponto de fusão	°C	-182,57	*1
Flash Point	°C	-188	*2
Temperatura de autoignição	°C	540,4	*3
Calor de combustão	cal/g	-11954	*2
Faixa de explosividade (no ar)	%	5 a 15	*3
Potencial de Ionização	eV	12,51	*3
Solubilidade em água (25 °C – 1 atm)	mg/L	22,7	*1
Pressão de vapor (25 °C)	mmHg	4,66x10 ⁵	*2
Constante da Lei de Henry (K _H) (25 °C)	atm.m ³ /mol	0,66	*2
Difusividade aquosa (água destilada) (10 °C)	cm ² /s	1,33x10 ⁻⁵	*4
Difusividade no ar (CNTP)	cm ² /s	0,15	*5
Viscosidade (20 °C)	cP	1,09x10 ⁻²	*2
Log Kow (20 °C)	-	1,09	*6
Koc	-	9	*6

⁺Unidade (-) = adimensional; *1- LIDE (1992); *2- PubChem (2016); *3- CETESB (2015b); *4- Elberling et. al (2011); *5- NSW EPA (2012); *6- TOXNET (2016)

Nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP = 273,15 K (0 °C) e 101,325 kPa (1 atm)), o metano é um composto gasoso, mais leve que o ar atmosférico. Possui baixa solubilidade em água, 22,7 mg/L a 25 °C (equivalente, por exemplo, a 1/132 da solubilidade do CO₂) e uma pressão de vapor de 4,66x10⁵ mmHg (aprox. 613 atm), o que resulta em uma constante da Lei de Henry (K_H) de 0,66 atm.m³/mol (a 25 °C) (PUBCHEM, 2016). Segundo Christophersen e Kjeldsen (2001), essa propriedade do CH₄ é aproximadamente 26,4 vezes maior em relação ao CO₂, indicando que uma menor quantidade de metano tende a permanecer dissolvida na água em relação ao dióxido de carbono.

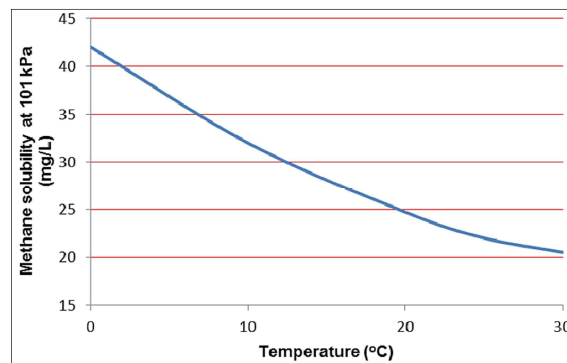
As **Figuras 1 e 2** abaixo apresentam os gráficos de solubilidade do CH₄, em função da variação de pressão e temperatura, respectivamente.

Figura 1. Variação da solubilidade do CH₄ na água com a pressão.



Fonte: NSW EPA (2012).

Figura 2. Variação da solubilidade do CH₄ na água com a temperatura.



Fonte: NSW EPA (2012).

Os gráficos apresentados nas **Figuras 1 e 2** mostram que, nas condições ambientais normais de temperatura e pressão (20 °C e 1 atm), quanto maior a pressão parcial do CH₄, maior a sua solubilidade, o que é inversamente proporcional para a temperatura da água. Outros fatores também são determinantes para a solubilidade do CH₄ em água, como a salinidade da água (inversamente proporcional) e a presença de outros gases dissolvidos, cuja contribuição para a solubilidade do CH₄ pode aumentar ou diminuir, em função das concentrações e dos gases envolvidos (BLOUNT; PRICE, 1982).

Conforme apresentado por TOXNET (2016), o coeficiente de partição carbono orgânico/água ($K_{oc} = 9$), derivado do coeficiente de partição octanol/água ($\log K_{ow} = 1,09$), indica que o metano apresenta baixo potencial de adsorção às partículas sólidas e sedimentos, e, por tanto, alta mobilidade no solo não saturado.

O gás metano possui característica incolor e inodora, sendo classificado como um asfixiante simples, porém não tóxico à saúde humana. É considerado um produto perigoso, por ser inflamável, e potencialmente explosivo, quando misturado ao ar atmosférico em concentrações entre 5% e 15% (v/v). Sua temperatura de autoignição é de 540 °C (CETESB, 2015b).

3.2.2 Importância do metano no contexto global e o papel dos solos

No contexto global, o metano é considerado um dos principais gases de efeito estufa, com um potencial de aquecimento de 20 a 30 vezes maior que o do CO₂. Apesar de ser um gás traço na composição da atmosfera terrestre, sua

concentração atual já ultrapassa 1800 partes por bilhão (ppb), o que representa um aumento de 2,5 vezes em relação aos valores da época pré-industrial (IPCC, 2013)

As fontes antrópicas de CH_4 são responsáveis por cerca de 70% do total emitido na atmosfera. Destaca-se a agropecuária como a principal atividade emissora, sendo responsável por até 40% do total, seguida pelas atividades relacionadas à extração e uso de combustíveis fósseis, queima de biomassa, aterros sanitários e o tratamento de esgotos domésticos. Quanto às emissões naturais (cerca de 30% do total), os solos das áreas úmidas (*wetlands*) são a principal origem, seguida por outras fontes, como os oceanos, alguns solos florestais, a ação de térmitas (cupins) e por manadas de animais silvestres (LE MER; ROGER, 2001).

O ciclo global do metano se completa por diversos processos de eliminação natural, conhecidos como sumidouros. O principal ocorre pela sua oxidação na troposfera por radicais $\text{OH}^\cdot$, o qual é responsável por cerca de 90% do seu consumo. Outros sumidouros estão relacionados à oxidação microbiana nos solos aerados e à sua eliminação para a estratosfera. Conforme dados do IPCC (2007), as áreas úmidas (cultivadas ou naturais) contribuíram com cerca de 50% do CH_4 emitido para a atmosfera, enquanto que o consumo pelos solos aerados foi equivalente a 6% dos sumidouros, demonstrando o importante papel dos solos no ciclo global.

O metano encontrado no solo provém de dois processos principais: o microbiano e o termogênico. O metano microbiano (ou biogênico) é produzido pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica, sendo este um processo muito comum no subsolo, principalmente em áreas alagadas, com alto teor de matéria orgânica, cujo principal subproduto é o biogás. O biogás é uma mistura gasosa, formada basicamente por CH_4 e CO_2 , com traços de outros gases, como H_2 , H_2S , CO , N_2 e NH_3 (KARLSSON et al., 2014). Já o metano termogênico é considerado um combustível fóssil, produzido em grandes profundidades, por processos envolvendo elevadas temperaturas e pressões, na escala de milhões de anos, estando comumente associado a campos de óleo e gás. O principal produto deste processo é o gás natural, uma mistura de hidrocarbonetos, com mais de 70% de CH_4 , largamente utilizada como fonte de energia na atualidade (LI; CARLSON, 2014; STRONG et al., 2015).

Segundo Le Mer e Roger (2001), os solos atuam como fonte de CH_4 quando a geração por bactérias metanogênicas é superior ao consumo, pelas bactérias metanotróficas. Quando este balanço é inverso, o ambiente se caracteriza como

sumidouro, implicando ainda na oxidação de metano atmosférico. Normalmente, o fluxo de CH₄ para a atmosfera equivale a um pequeno residual do total produzido e consumido pelos solos (BARTETT; HARISS, 1993).

3.2.3 Geração, consumo e transporte no subsolo

Conforme descrito por Christensen (2010), os solos de áreas úmidas (e.g. solos de várzea) são ambientes propícios à formação de metano, por apresentarem abundância de matéria orgânica, confinada em ambientes anaeróbicos, com baixo potencial de oxirredução. Essa matéria é transformada por uma série de processos metabólicos, onde os aceptores de elétrons são consumidos sequencialmente para degradar moléculas complexas em compostos mais simples, criando condições para a etapa final do processo, representada pela metanogênese.

A metanogênese é processada por microrganismos do domínio *Archaea*, por duas vias principais:

(1) A fermentação acetoclástica: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

(2) A redução hidrogenotrófica do CO₂: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Outros mecanismos correspondem a menos de 5% da produção de CH₄ (SEGERS, 1998).

Na reação (1), as metanogênicas acetotróficas utilizam o acetato como aceptor de elétrons para a geração de biogás, enquanto que na reação (2), as metanogênicas hidrogenotróficas utilizam o dióxido de carbono para formar metano e água. A acetotrofia é responsável por cerca de dois terços de todo o CH₄ produzido (LE MER; ROGER, 2001).

A emissão de CH₄ em áreas úmidas é governada por atividades microbianas correlatas, cujos principais processos estão associados à produção pelas metanogênicas em zonas anóxicas, à oxidação pelas metanotróficas nas zonas aeróbicas e aos mecanismos de transferência para a atmosfera (LE MER; ROGER, 2001). As taxas de produção são controladas por diversos fatores, como a temperatura, o pH, a abundância de microrganismos metanogênicos, disponibilidade de matéria orgânica degradável, etc. Uma vez estabelecida a anaerobiose, a disponibilidade de substrato orgânico tende a ser o principal fator limitante (SEGERS, 1998). Comumente, essa disponibilidade tende a diminuir com o aumento da profundidade no solo (BAZHIN, 2010).

Segundo Le Mer; Roger (2001), de 60%, a mais de 90% do CH_4 produzido, é oxidado nas zonas aeróbicas dos solos das áreas úmidas. Os microrganismos metanogênicos e metanotróficos são ubíquos nestes ambientes, onde suas populações encontram-se positivamente correlacionadas, sendo as maiores taxas de atividade metanotrófica observadas em ambientes metanogênicos (e.g. solos de cobertura de aterros sanitários). Porém, esta relação é dinâmica e influenciada por diversos fatores, como os climáticos (e.g. precipitação, temperatura), edáficos (e.g. grau de saturação, teor de argila), bióticos (e.g. cobertura vegetal, população microbiótica) e antrópicos (e.g. manejo do solo, supressão da vegetação). Em geral, durante períodos de estiagem, a drenagem dos solos aumenta as zonas aeróbicas, favorecendo a atividade metanotrófica, enquanto que nos períodos úmidos, a saturação, e eventual submersão, favorece as metanogênicas.

O transporte de metano, produzido no subsolo, para a atmosfera, apresenta três mecanismos principais: a difusão molecular no perfil, as ebulições (efeito *bubbling*) e o transporte pelo aerênquima das plantas, sendo este último, o de maior efetividade, dependendo do tipo de vegetação existente (BAZHIN, 2010). Uma vez gerado na zona anaeróbica saturada do subsolo, o biogás ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) tende a se difundir lentamente em direção à superfície. O fluxo difusivo é pequeno, se comparado com os outros mecanismos, porém, possui um importante papel na alimentação das metanotróficas na zona aerada (COUWENBERG, 2009).

Com o aumento progressivo da concentração dissolvida e a diminuição da pressão hidrostática em direção à superfície, os gases atingem seu limite de solubilidade, quando a pressão parcial destes tende a superar a pressão do meio (atmosférica e hidrostática), promovendo a exsolução do gás pela formação de bolhas (BAZHIN, 2010). Segundo Mabrouk e Rowe (2011), para a exsolução de gases dissolvidos no meio poroso, a pressão parcial deve superar a pressão capilar para deslocar a água dos poros. Dessa forma, uma pressão maior é necessária para a formação de bolhas em solos finos do que em solos grosseiros. Este comportamento faz com que camadas permeáveis (e.g. lentes de areia) promovam condições mais favoráveis para que esse processo ocorra.

Por outro lado, conforme descrito por Fechner-Levy e Hemond (1996), certos tipos de sedimentos podem aprisionar quantidades significativas de CH_4 na forma de bolhas, podendo armazenar até três vezes mais massa do que a fração dissolvida. Com o aumento da pressão, o volume das bolhas tende a aumentar até um valor

crítico, quando ocorre o fenômeno da ebulição, ou seja, uma rápida liberação advectiva do gás para a superfície, de modo que não há tempo suficiente para que seja oxidado. Geralmente, estes eventos são deflagrados por mudanças no nível d'água, na pressão barométrica e/ou na temperatura, assim como por perturbações mecânicas (e.g. escavações).

Por fim, a presença de vegetação é um fator preponderante no transporte do CH_4 , pois, além de fornecerem substrato para a metanogênese, muitas plantas de áreas úmidas possuem aerênquima, o que facilita as trocas gasosas com a atmosfera (e.g. cultivos de arroz). Tanto estes tecidos podem facilitar a liberação de grandes quantidades de CH_4 diretamente para a atmosfera (sem passar pela zona aeróbica), como também promovem o transporte de oxigênio até a zona das raízes, o que implica na oxidação do metano na rizosfera (COUWENBERG, 2009; BAZHIN, 2010).

3.2.4 Riscos ambientais e áreas contaminadas com metano

A ocorrência de gás metano no subsolo em áreas urbanas, e os riscos associados, são temas ainda bastante controversos e sem regulamentações específicas para o gerenciamento da questão no Brasil.

Segundo Sepich (2008), o risco associado à presença de gás metano no subsolo não se resume apenas à questão da concentração, pois a pressão e o volume disponível também são fatores cruciais nessa avaliação, sendo necessárias condições específicas de acumulação para que exista o risco. Dessa forma, a determinação da origem do gás, sua composição e seu comportamento no subsolo, são informações cruciais para um diagnóstico que possibilite a tomada de decisão com bases cientificamente defensáveis.

De acordo com Mendonça et al. (2015a), por ser mais leve que o ar, o gás tende a se deslocar em direção à superfície e acumular-se sob camadas impermeáveis, e/ou em espaços vazios, podendo desenvolver um aumento de pressão. Eventuais ebulições do gás trapeado no subsolo (fase livre gasosa), podem liberar, pontualmente, quantidades expressivas para a atmosfera em um curto espaço de tempo. Caso este processo ocorra sob edificações, podem ocorrer situações de risco à saúde humana.

Outra questão altamente relevante no contexto urbano é a geração de metano a partir de vazamentos de etanol e hidrocarbonetos em postos de combustíveis. Dependendo do volume do vazamento, a biodegradação anaeróbica do etanol pode produzir quantidades suficientes de CH_4 para gerar risco de intrusão e acumulação em ambientes fechados, onde condições de ignição podem existir (MA et al., 2012). Além disso, o consumo do CH_4 pelas metanotróficas pode exaurir o oxigênio disponível no meio para a biodegradação aeróbica de compostos tóxicos dos combustíveis, como o benzeno, aumentando os riscos de intrusão de vapores tóxicos. Estes riscos podem ser ainda maiores se a atividade metanogênica resultar em pressão suficiente para causar o transporte advectivo de gases e vapores pela zona não saturada (MA et al., 2013).

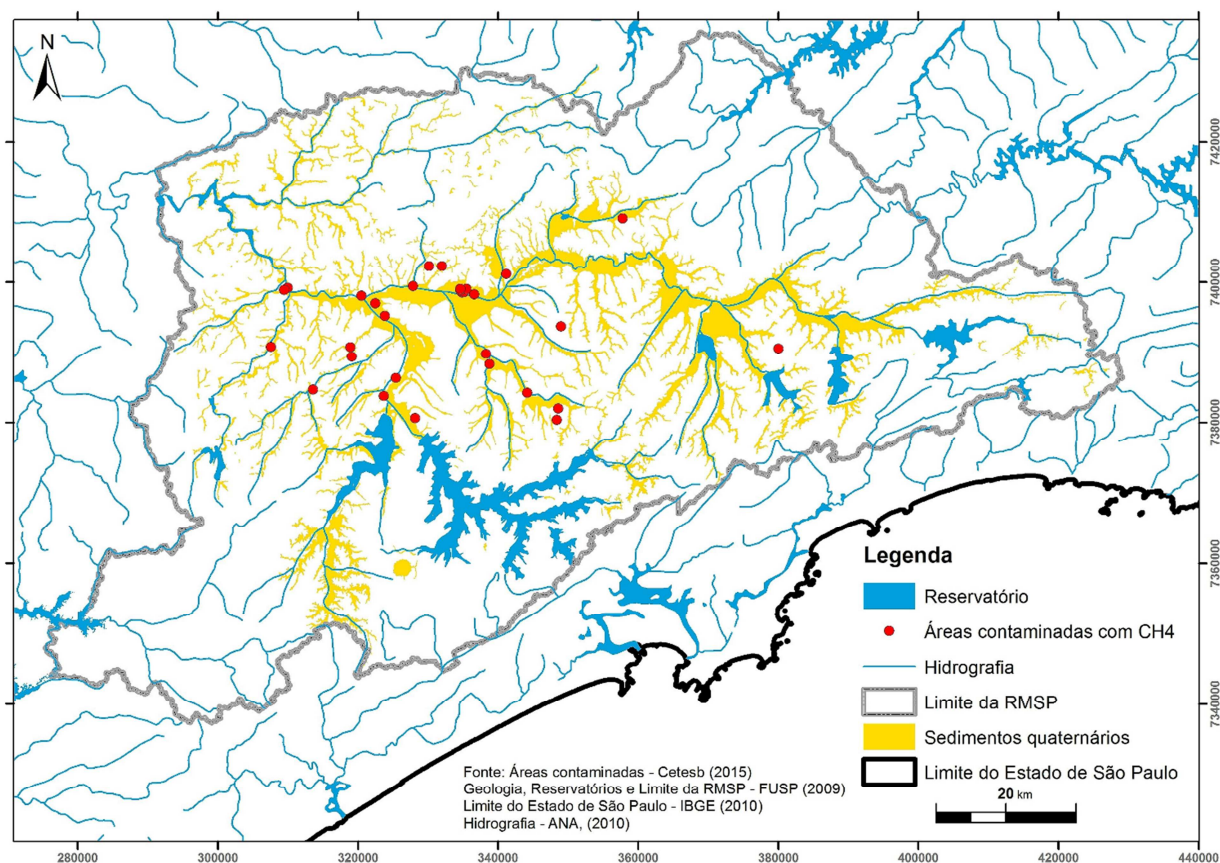
Diversos estudos foram publicados sobre acidentes envolvendo metano e outros gases do subsolo (HOOKER; BANNON, 1993). Muitos estão relacionados à questão da migração de gases a partir de aterros de resíduos (e.g. WILLIAMS; AITKENHEAD, 1991; KJELDSSEN; FISCHER, 1995). Outros casos envolveram acidentes durante a perfuração de poços para extração de gás natural (e.g. KELLY et al., 1985), acidentes com sistemas de distribuição de água (subterrânea) contendo CH_4 dissolvido (e.g. ALTNÖDER; HUTTER, 1981), acidentes por intrusão de gás termogênico (SEPICH, 2008), etc.

No Estado de São Paulo, vários casos vêm sendo objeto de preocupação técnica, política e social, tais como: o Lixão do Alvarenga, em São Bernardo do Campo; o Shopping Center Norte e seu entorno, localizado em São Paulo; conjuntos habitacionais construídos pela Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) e pela Companhia Metropolitana de Habitação de São Paulo (COHAB); e o recente caso da USP – Campus Leste, também no município de São Paulo (CETESB, 2014).

Conforme consulta realizada ao Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo de 2014 (CETESB, 2015a), constavam 38 casos envolvendo contaminação com gás metano, sendo 30 localizadas na RMSP. No entanto, na maioria dos casos, não é feita uma análise sistemática da fonte e do processo de geração desse gás, o que, aliado à adoção de técnicas inadequadas de diagnóstico, podem levar a conclusões equivocadas e medidas de intervenção ineficientes.

Para analisar a possível correlação desses casos com a ocorrência de CH_4 proveniente dos solos de várzeas, realizou-se a plotagem da localização destas ACs sobre a malha hidrográfica regional (ANA, 2010) e o mapeamento dos sedimentos quaternários na RMSP (FUSP, 2009), conforme apresentado na **Figura 3**.

Figura 3. Distribuição das ACs com presença de CH_4 em relação à hidrografia e ao mapeamento dos sedimentos quaternários na RMSP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre as 30 ACs com presença de CH_4 da RMSP, 23 (77%) estão integralmente ou parcialmente localizadas sobre depósitos aluvionares. Neste contexto, a análise da possível geração e emissão a partir dos sedimentos de várzeas, amplificada, ou não, pela ação antrópica, mostra-se altamente relevante para o diagnóstico dessas áreas. Mendonça et al. (2015b) destacam que muitos estudos não consideram a geração natural desses gases, e que uma questão chave é determinar onde estão as fontes e em quais camadas do subsolo os gases estão se acumulando.

Sendo assim, o entendimento dos processos envolvidos, na geração e na dinâmica de transporte do metano no subsolo, é fundamental para o diagnóstico e o correto gerenciamento das ACs, principalmente em um contexto urbano, como o da RMSP.

3.3 Investigação geoambiental de alta resolução

Um dos principais objetivos do processo de investigação de áreas contaminadas é a obtenção de um modelo conceitual do site (MCS) representativo. Segundo a definição da NBR 16210 (ABNT, 2013), o MCS é a representação de um sistema ambiental e dos processos que determinam o transporte dos contaminantes, a partir das fontes, até os receptores envolvidos. O MCS elaborado ao final de uma determinada etapa do GAC, conforme o procedimento estabelecido por CETESB (2007), deve conter informações suficientes para embasar o desenvolvimento das etapas subsequentes. As incertezas associadas devem ser claramente identificadas, registradas e, na medida do possível, quantificadas, de modo que ações possam ser adotadas para reduzi-las a níveis aceitáveis no contexto do projeto.

Um MCS representativo deve, portanto, consolidar e sintetizar todo conhecimento adquirido da área de estudo, de modo a subsidiar o processo de tomada de decisão para a definição das melhores estratégias de intervenção e da eventual remediação, em uma área contaminada. Segundo Riyis (2013), inconsistências no diagnóstico e, conseqüentemente, no MCS, podem levar a remediações ineficientes, causando a demora no encerramento dos casos e gerando custos globais significativamente mais altos. Independentemente do método de remediação adotado, se o projeto não estiver embasado em um MCS adequado, não terá sua eficiência otimizada.

Uma das maiores dificuldades para se estabelecer um MCS adequado é a heterogeneidade natural do subsolo, presente em qualquer contexto geológico. As técnicas de investigação convencionais, baseadas apenas em sondagens para amostragem de solo, instalação e amostragem de poços de monitoramento (PMs) e análises químicas em laboratórios fixos, geralmente, não apresentam resolução suficiente para uma caracterização em detalhe do meio físico e dos parâmetros que governam o fluxo e o transporte dos contaminantes (SCHULMEISTER et al., 2003; FIACCO et al., 2006). Isto também se deve ao fato de que muitos diagnósticos, pelo

menos em nível nacional, subestimam a complexidade do meio físico, coletando o mínimo de amostras possível para atender à legislação. Dessa forma, os MCS se mostram demasiadamente simplórios, com muitas incertezas e baixa representatividade, comprometendo os projetos de remediação e demais medidas de intervenção (RIYIS, 2013).

Com o intuito de otimizar a recuperação de ACs nos EUA, a agência ambiental norte americana (USEPA) desenvolveu, no fim da década de 1990 e início da década passada, uma série de estudos visando avaliar oportunidades de melhorias nos procedimentos de caracterização, remediação e monitoramento de ACs. Verificou-se que, em grande parte dos casos, havia a necessidade de melhorias nos diagnósticos e nos modelos conceituais, e que economias significativas de recursos eram possíveis em várias etapas do ciclo de vida dos projetos (DYMENT, 2011).

Conforme apresentado por Crumbling et al. (2001), até a década de 1990, dava-se muito mais importância à qualidade dos métodos analíticos do que ao processo de obtenção das amostras no campo. Porém, os autores destacaram que cerca de 90% das fontes de incertezas nos dados ambientais se referiam à variabilidade espacial das amostras, devido à heterogeneidade das matrizes ambientais, e apenas 10% estavam associadas aos procedimentos analíticos dos laboratórios. Nesse contexto, muitos estudos apresentavam falhas, pois sem uma representatividade amostral adequada, a qualidade das análises químicas se tornava irrelevante para a redução das incertezas e o sucesso das remediações.

Nesse contexto, visando melhorar a qualidade dos projetos, uma série de Boas Práticas de Gestão (em inglês *Best Management Practices* – BMP) foram compiladas pela USEPA no início da década de 2000, gerando uma metodologia inovadora, chamada de Abordagem Tríade (em inglês *Triad Approach*) (ITRC, 2003; CRUMBLING, 2004). Essa abordagem visa um maior controle das incertezas no processo de GAC, adotando estratégias para otimizar os diagnósticos e gerar modelos conceituais mais consistentes, com melhor embasamento para a tomada de decisões.

Um dos princípios da Abordagem Tríade é a adoção de técnicas e equipamentos que possibilitem a aquisição e visualização de dados em tempo real, pois viabilizam a avaliação das informações e a revisão do MCS em campo, suportando assim a adoção de estratégias dinâmicas de investigação (USEPA,

2015). Com o advento de novas tecnologias e métodos modernos de investigação, uma nova BMP foi estabelecida pela USEPA para o diagnóstico de ACs, que é a metodologia de Investigação Geoambiental de Alta Resolução (em inglês *High Resolution Site Characterization - HRSC*).

Segundo a definição da USEPA, HRSC consiste em um conjunto de técnicas e estratégias de investigação, que utilizam mensurações em escala apropriada e densidade amostral suficiente para definir, com maior convicção, a distribuição dos contaminantes e o contexto físico em que residem, suportando assim a adoção de medidas mais rápidas e eficientes para a recuperação das ACs (USEPA, 2015). Essa metodologia busca adequar a escala de investigação à escala das heterogeneidades que controlam o fluxo e o transporte dos contaminantes, o que se mostra inviável somente pelos métodos convencionais.

A Investigação Geoambiental de Alta Resolução considera fundamental o uso de técnicas de campo, que forneçam respostas rápidas, e o uso de métodos de varredura, que proporcionem uma maior abrangência espacial e uma maior densidade amostral (técnicas de *screening*). Apesar de apresentarem menor precisão analítica em relação às análises químicas tradicionais, essas técnicas, em geral, demonstram uma relação custo benefício vantajosa para a investigação, pois fornecem uma densidade de dados muito maior, com custos relativamente menores, ressaltando as linhas de evidência para a redução das incertezas do diagnóstico. Dessa forma, pode-se estabelecer um plano de amostragem mais seguro e eficiente, utilizando métodos tradicionais para confirmação e validação legal dos dados. Essa combinação colaborativa, entre dados de *screening* em alta densidade e amostras confirmatórias com a devida qualidade amostral e analítica, pode prover grandes benefícios. Além de economizar tempo e recursos, evitando análises químicas custosas em amostras pouco representativas, favorece a elaboração de modelos conceituais mais consistentes, subsidiando tomadas de decisão assertivas na recuperação das ACs (USEPA, 2015).

Segundo Pitkin (2012), na medida em que casos mais complexos demandam ser investigados e remediados (ex. indústrias, aterros e refinarias), as ferramentas de investigação de alta resolução ganham cada vez mais importância. Nos EUA, estudos vêm apontando que o investimento em diagnósticos adequados, utilizando HRSC, podem gerar uma economia da ordem de cinco a dez vezes no custo global

dos projetos, pois favorecem a eficiência e a redução do tempo da remediação, que é a parte mais onerosa do processo (QUINNAN, 2012).

Conforme descrito pela USEPA (2014), a escolha das técnicas de HRSC mais adequadas para cada caso deve se pautar tanto nas características do meio em que será aplicada (ex. meio poroso; meio fraturado; litologia), como nos tipos de dados gerados (ex. qualitativos ou quantitativos; caracterização geológica, hidrogeológica, ou dos contaminantes; etc), na taxa de produção pretendida e, obviamente, na relação custo benefício para cada projeto.

Entre as principais técnicas para caracterização litológica e hidrogeológica em alta resolução, destacam-se: amostragem discreta e/ou contínua do perfil do solo pelos métodos *Direct Push* e de meios fraturados pelo método *Sonic Drilling*; técnicas geofísicas (em superfície, em poços ou sondagens); o CPTu (Piezocone) e o RCPTu (Piezocone de Resistividade); ponteiras com sensores de condutividade elétrica (EC); o *Hydraulic Pressure Test* (HPT); medidores de fluxo em poços e/ou sondagens (e.g. *Vertical Flowmeter Logging*, *Point Velocity Probes*) e equipamentos para ensaios pontuais de condutividade hidráulica (*Direct Push Slug Test*, *Pneumatic Slug Testing*) (USEPA, 2014; RIYIS, 2014; GEOPROBE, 2015).

Quanto às técnicas de alta resolução para caracterização dos contaminantes, destacam-se: amostragem discreta e/ou multipontual do perfil do solo, dos gases do solo e da água subterrânea por métodos *Direct Push* (e.g. *Screen Point Sampling*, *Post Run Tubing*); sistemas de amostragem multinível (CMT, Westbay, FLUTe, BarCad); sistemas de amostragem da água subterrânea em transectos; amostradores passivos de gases do solo e de água subterrânea; a sonda *Membrane Interface Probe* (MIP); os métodos de *Laser Induced Fluorescence* (LIF), como o UVOST (*Ultra-Violet Optical Screening Tool*); o *Waterloo Advanced Profiling System* e o uso de laboratórios móveis para análises químicas em campo (USEPA, 2014; GEOPROBE, 2015).

Por fim, destaca-se também a importância do uso de softwares para o tratamento e visualização dos dados, possibilitando a geração de mapas, seções e modelos 3D para uma representação gráfica e elucidativa dos resultados.

No presente estudo foram utilizadas as seguintes ferramentas de investigação de alta resolução: MIP, *Soil Color Optical Screening Tool* (SCOST), amostragens discretas de gases do solo com o sistema PRT e amostragens contínuas de solo pelo método *Direct Push* (DP). Para o MIP, que é a principal ferramenta do estudo,

uma revisão bibliográfica detalhada é apresentada no Item 3.4. Para as demais ferramentas, utilizadas como técnicas auxiliares, uma breve caracterização é apresentada a seguir.

3.3.1 Soil Color Optical Screening Tool

O sistema *Soil Color Optical Screening Tool* (SCOST) é um módulo complementar do equipamento UVOST (*Ultra-Violet Optical Screening Tool*), fabricado pela empresa Dakota Technologies Inc. e lançado comercialmente em 2008. A ferramenta se destina, essencialmente, a promover uma perfilagem contínua, *in situ*, das cores do solo, fornecendo, em tempo real, um gráfico de cores em função da profundidade do ensaio.

A cor do solo é uma das propriedades mais evidentes para a sua identificação e classificação, sendo fundamental para a descrição dos horizontes, de sua composição e sua gênese (SANTOS et al., 2005). A matéria orgânica (MO) e os óxidos de ferro são os principais agentes responsáveis pela cor dos solos, além de outros fatores, como a umidade e o material de origem (BOTELHO et al., 2006). A partir da cor, pode-se inferir diversas características, tais como: o conteúdo de MO (em geral, quanto mais escuro, mais MO); tipificação dos óxidos de ferro (e.g. hematita (cores avermelhadas); goethita (cores amareladas)); condições de drenagem (solos mal drenados apresentam cores neutras e cinzas); o ambiente geoquímico (cores avermelhadas indicam condições oxidativas do Fe e cores acinzentadas indicam condições redutoras); entre outros exemplos (SANTOS et al., 2005). A cor é também um importante parâmetro para a diferenciação estratigráfica (e.g. transição entre uma camada sedimentar e um solo residual), devido à sua relação com propriedades específicas que possibilitam a diferenciação entre as camadas (HAUSMANN et al., 2016).

O padrão mundialmente adotado para a caracterização das cores é a determinação em campo, pela comparação visual de amostras com a Carta de Munsell para solos, observando-se a matiz (comprimento de onda da luz), o valor (brilho) e o croma (intensidade ou pureza da cor). Apesar de sua fácil aplicação, este método apresenta subjetividade na percepção visual do responsável pela descrição. Dessa forma, a instrumentação dos métodos nessa atividade vem demonstrando resultados mais precisos e menos subjetivos (BOTELHO et al., 2006).

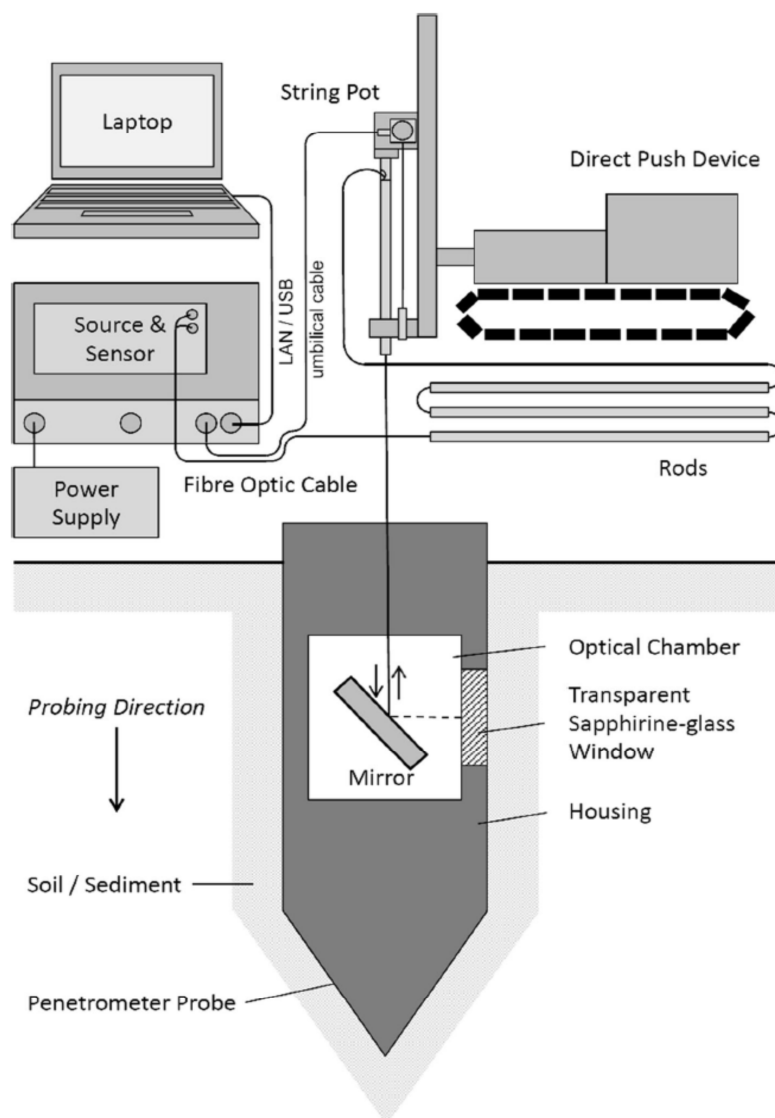
O SCOST, também denominado como *Color Logging Tool*, é uma ferramenta inovadora para a caracterização das cores do solo. Seu diferencial se dá, principalmente, pela capacidade de determinação das cores *in situ* (perturbação mínima do meio), com resultados de alta resolução, visualizados em tempo real, até profundidades que outros métodos geralmente não chegam ou perdem qualidade (HAUSMANN et al., 2016). Dessa forma, a ferramenta alinha-se ao conceito de HRSC.

O sistema é composto, basicamente, por um módulo de emissão e detecção de ondas eletromagnéticas, conectado, por cabos de fibra ótica, a uma sonda de cravação, dotada de uma câmara ótica. O cabeamento de fibra ótica é inserido por dentro de hastes de aço vazadas, que são acopladas sequencialmente para a introdução da sonda no solo pelo método *Direct Push* (DALAN et al., 2011).

O princípio de funcionamento consiste na emissão de luz branca, por meio do cabeamento, até a câmara ótica, que a redireciona, por meio de um espelho, para uma janela de safira transparente, pela qual a luz atravessa e atinge o solo adjacente. A luz refletida retorna para o interior da câmara, na qual é captada e transmitida de volta para o sensor de fotodetecção no módulo de superfície (HAUSMANN et al., 2016). O módulo de superfície se conecta a um *notebook*, pelo qual executa-se o *software* (OST *software*) para o processamento e visualização dos dados em tempo real (DAKOTA TECHNOLOGIES INC., 2015). A ponteira pode ser equipada ainda com um sensor de condutividade elétrica, o que permite comparar o perfil elétrico com as cores do solo. A **Figura 4** apresenta um esquema dos componentes e do funcionamento do SCOST.

Segundo Dalan et al. (2011), o sistema é capaz de detectar a luz num espectro de reflexão de 350 nm a 1000 nm, que é convertida em sinais elétricos e processada em um sistema de cores, com valores proporcionais ao modelo RGB (sigla das cores vermelho, verde e azul, em inglês) e aos valores da escala de Munsell. Segundo o fabricante, a taxa de captação de dados é feita na escala de milissegundos. O *software* possibilita ainda a geração de gráficos individualizados dos valores da escala de Munsell (matiz, valor e croma) em função da profundidade, possibilitando a obtenção de parâmetros quantitativos de análise.

Figura 4. Esquema dos componentes e do funcionamento do SCOST. Ilustração sem escala.



Fonte: Hausmann et al. (2016).

Hausmann et al. (2016) mostram ainda que é possível realizar uma série de tratamentos estatísticos e transformações numéricas dos dados obtidos, possibilitando a obtenção de diversos parâmetros significativos para a realização de análises numéricas e a obtenção de resultados mais confiáveis e reproduzíveis.

O SCOST é uma ferramenta de alta resolução que, além de fornecer informações importantes para a caracterização litoestratigráfica e geoquímica de áreas contaminadas, também pode contribuir com diversas áreas de atuação diferentes, como na geotecnia, geologia, pedologia, agricultura e até mesmo na arqueologia (DALAN et al., 2011), entre outras (HAUSMANN et al., 2016).

3.3.2 Sistema *Post Run Tubing*

O sistema *Post Run Tubing* é uma ferramenta para a amostragem de gases do solo, comercializada pela empresa Geoprobe. Trata-se de um dispositivo de amostragem pelo método *Direct Push*, que possibilita a coleta de amostras gasosas em profundidades pré-determinadas, de modo ágil e eficiente, sendo um método amplamente utilizado para essa finalidade (USEPA, 2006).

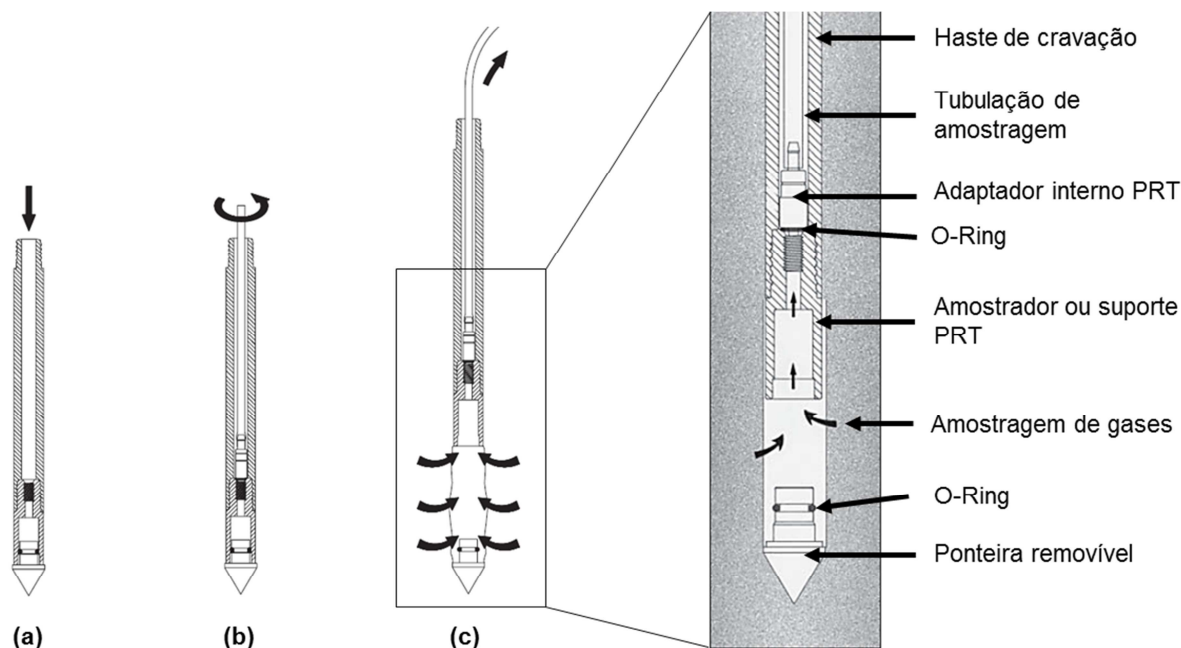
A amostragem de gases do solo vem ganhando crescente importância para o diagnóstico e remediação de áreas contaminadas, principalmente pela sua capacidade de auxiliar no mapeamento de plumas de vapores orgânicos (COVs) no subsolo. Como método de *screening*, agrega maior confiabilidade aos programas de monitoramento de solo e água subterrânea, confere agilidade na identificação de áreas fonte e no acompanhamento de processos de remediação, e possibilita a identificação de riscos potenciais associados à migração e intrusão de gases e vapores em ambientes fechados. No entanto, a obtenção de amostras representativas pode ser um fator crítico nesse processo, tendo-se em vista a diversidade de variáveis ambientais, assim como de variáveis amostrais e analíticas (SCHUMACHER et al., 2009).

Os métodos *Direct Push* de amostragem de gases do solo vêm se tornando muito comuns para apoiar investigações da intrusão de vapores, devido à maior conveniência se comparados com os métodos tradicionais de instalação de amostradores (e.g. poços) dedicados (USEPA, 2006). Nesse sentido, o sistema PRT mostra-se uma ferramenta muito útil, fornecendo agilidade ao usuário para a coleta de amostras nas profundidades desejadas, por meio de um sistema hermeticamente isolado da atmosfera, o que evita problemas associadas à contaminação cruzada e vazamentos pelas hastes de cravação (GEOPROBE, 2006). Pode-se considerar ainda que, pelas suas características, a ferramenta apresenta grande aplicabilidade em projetos de HRSC.

O sistema é composto por um dispositivo amostrador (ou “suporte PRT”) vazado, de aço, com opções de diâmetro externo (DE) de 1,0” a 1,5”, fechado na parte inferior por uma ponteira descartável (removível). O amostrador é dotado ainda de um sistema de roscas na parte superior, sendo uma externa, pela qual são acopladas as hastes de cravação, e uma interna, para o acoplamento da tubulação de amostragem. A tubulação de amostragem é acoplada ao amostrador por meio de

um adaptador interno, rosqueável, de aço inox. Essa tubulação pode ser composta por diferentes materiais, dependendo da compatibilidade com as amostras, sendo os mais comuns o teflon e o polietileno (PE). A ponteira descartável e o adaptador interno são dotados de anéis de borracha (*O-ring*) para a vedação do sistema (**Figura 5**) (GEOPROBE, 2013).

Figura 5. Amostragem de gases do solo pelo sistema PRT.



Fonte: Adaptado de Geoprobe (2013).

Conforme o esquema da **Figura 5**, a execução é feita pela cravação *Direct Push* do amostrador PRT, fechado embaixo pela ponteira descartável e acoplado (por cima) às hastes de cravação, até a profundidade desejada (etapa “a”). Na sequência realiza-se a inserção da tubulação de amostragem, com o adaptador interno, por dentro das hastes de cravação, até alcançar o amostrador, rosqueando-os até que fiquem firmemente acoplados (etapa “b”). Em seguida, com o auxílio do equipamento de cravação, puxa-se o conjunto de hastes para cima, em torno de 15 a 30 cm (dependendo do plano de amostragem) para liberar o orifício inferior do amostrador, por onde inicia-se a sucção dos gases para iniciar a amostragem (etapa “c”). O sistema possibilita ainda a realização de testes de vazamentos, caso necessário (GEOPROBE, 2006).

Este sistema permite diversos tipos de amostragem de gases e vapores do solo, desde medições diretas com equipamentos portáteis (e.g. medidores PID), ou

a sucção por bombas (e.g. peristáltica) e amostragens em *Tedlar bags*, até a aplicação de protocolos de amostragem (e.g. TO-17) ou a amostragem com seringas para a injeção direta em cromatógrafo de campo (USEPA, 2006; SCHUMACHER et al., 2009; GEOPROBE, 2013).

Por outro lado, o PRT apresenta a limitação de fornecer uma coleta pontual, não possibilitando o monitoramento temporal ou a amostragem contínua em uma mesma sondagem. Nesse último caso, é necessária a realização de novas sondagens para a coleta em diferentes profundidades. Além disso, o sistema pode apresentar limitações associadas à necessidade de purga e tempo de equilíbrio para amostragens de COVs, principalmente em litologias de baixa permeabilidade (SCHUMACHER et al., 2009).

3.3.3 Amostragem de solo *Direct Push*

A amostragem de solo por cravação contínua (em inglês “*Direct Push Soil Sampling*”) é um método amplamente utilizado para a investigação geoambiental. Consiste basicamente na realização de sondagens, por meio da cravação de um amostrador no terreno, sem a necessidade de realizar escavações ou remoções de solo, como nos métodos convencionais de sondagem a trado. As coletas podem ser realizadas de modo contínuo ou em intervalos discretos, possibilitando a obtenção de amostras em profundidades pré-determinadas (ASTM, 2014).

Os métodos *Direct Push* se difundiram nos EUA na década de 1990, em função da crescente necessidade de tornar as investigações mais rápidas e com melhor relação custo benefício em relação às técnicas tradicionais (conforme descrito no Item 3.3) (USEPA, 2016). No Brasil, esses métodos vêm se popularizando, devido à sua praticidade e à qualidade agregada aos trabalhos de campo. Atualmente, órgãos ambientais nacionais (e.g. CETESB, 2006) e internacionais (e.g. USEPA, 2016) vêm recomendando os métodos de *Direct Push* para a investigação de ACs.

A amostragem de solo com sondagens *Direct Push* (SDP) pode ser realizada tanto para a caracterização litológica e definição do perfil litoestratigráfico, como para a obtenção de amostras e subamostras para análises químicas, sendo uma etapa fundamental para a obtenção de um MCS representativo da área de estudo.

Aplicações e adaptações em estudos geotécnicos também podem ser realizadas (ASTM, 2014).

As SDPs podem ser realizadas, basicamente, por três métodos diferentes: cravação estática, cravação percussiva e cravação vibratória. Dependendo da litologia, aplica-se uma combinação desses métodos para atingir as profundidades desejadas (USEPA, 2016). No Brasil, utilizam-se apenas os métodos de cravação estática e percussiva.

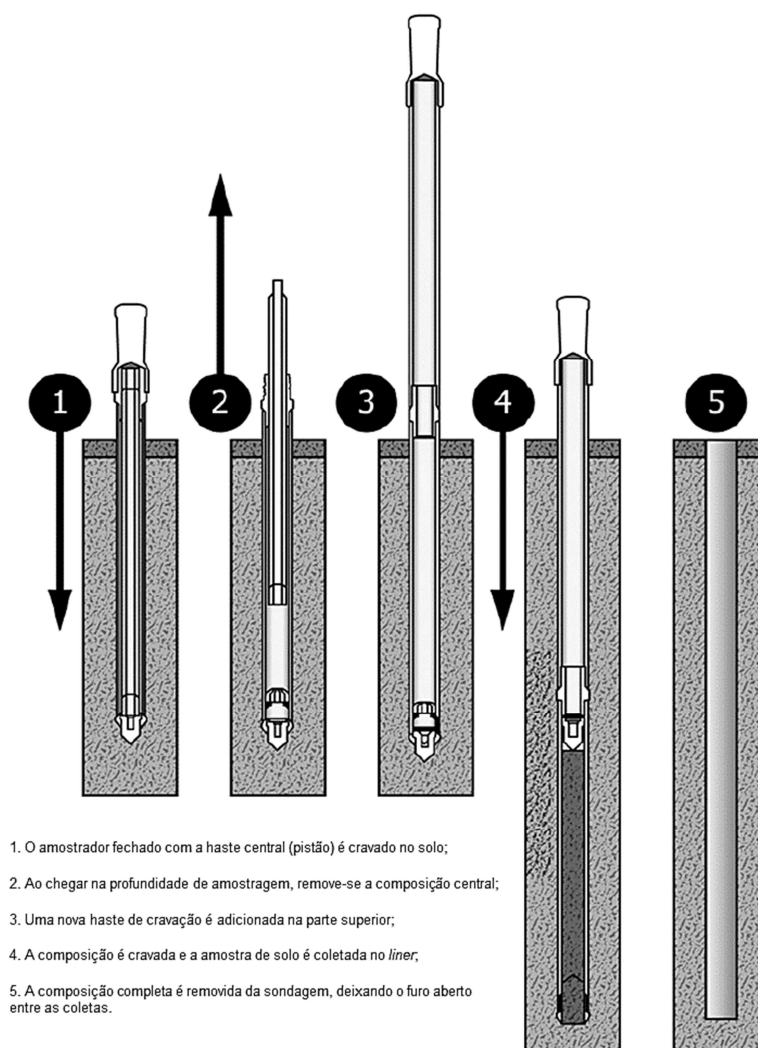
Diversos tipos de equipamentos podem ser empregados na execução, desde marteletes elétricos portáteis, até perfuratrizes multifunções ou caminhões pesados de sondagens. Os amostradores estão disponíveis em diversos formatos e tamanhos, possibilitando a coleta em diferentes tipos de solo. Geralmente, utilizam-se tubos descartáveis de plástico, também conhecidos como *liners*, por dentro dos amostradores de aço, para evitar que as amostras tenham contato com os demais equipamentos após a coleta.

Existem, basicamente, duas categorias de sistemas *Direct Push*: os sistemas com tubo único (em inglês *Single Tube* ou *Macro Core*) e os sistemas com tubo duplo (em inglês *Dual Tube*). O sistema *Single Tube* (ST) é o mais utilizado para amostragem de solo. Utiliza-se apenas um conjunto de hastes para conectar o amostrador ao equipamento de cravação na superfície. Após a cravação e o preenchimento do amostrador, todo o conjunto tem que ser retirado da sondagem para recuperar a amostra, deixando o furo aberto. Para prosseguir em maiores profundidades, todo o conjunto, com o amostrador vazio, tem que ser reinserido no furo (**Figura 6**).

O amostrador pode ser cravado de modo “aberto” (sem pistão) ou de modo fechado (com pistão), também conhecido como *Piston Sampler*. O modo aberto é recomendado apenas para baixas profundidades, na zona não saturada, onde não há risco de colapso das paredes do furo. Já o modo *Piston Sampler*, pode ser aplicado em quaisquer profundidades (até o limite de cravação), de modo contínuo ou discreto, pois o conjunto desce “fechado” por um pistão interno retrátil, que “sela” o amostrador, até a profundidade desejada para a amostragem. Dessa forma, o *Piston Sampler* possibilita uma melhor preservação do testemunho e evita a contaminação cruzada das amostras de solo. A grande desvantagem do sistema ST é o fato do furo ficar “aberto” entre as coletas, o que pode promover o arraste de

contaminantes para diferentes profundidades, gerando contaminação cruzada (ASTM, 2014).

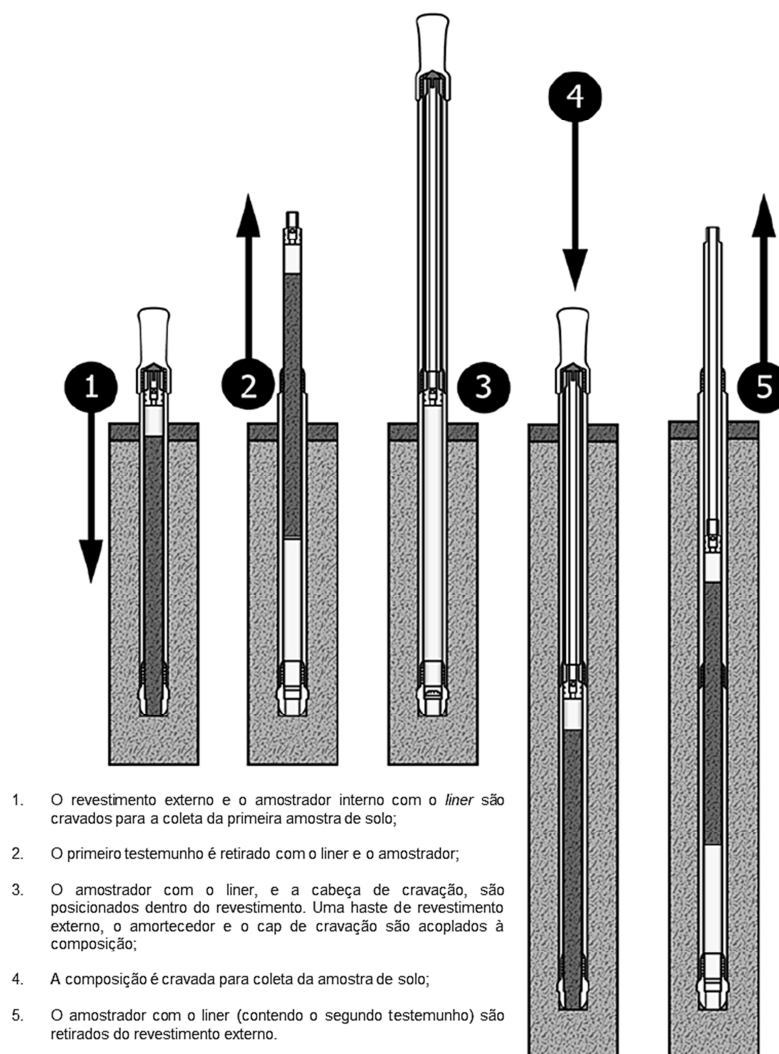
Figura 6. Operação do sistema de amostragem de solo *Direct Push Single Tube*.



Fonte: Adaptado de ASTM (2014).

Quanto ao sistema *Dual Tube* (DT), é considerado superior ao ST pois o furo de sondagem fica protegido e selado por um revestimento externo durante a operação, o que evita a potencial contaminação cruzada das amostras de solo. O sistema DT possibilita amostragens contínuas, acima e abaixo do nível d'água subterrânea. Após a cravação simultânea de toda a composição, o revestimento externo se mantém no furo de sondagem, enquanto o conjunto, com o amostrador e as hastes internas, é retirado para a recuperação das amostras (**Figura 7**).

Figura 7. Operação do sistema de amostragem de solo *Direct Push Dual Tube*.



Fonte: Adaptado de ASTM (2014).

Se a amostragem contínua não for necessária, pode-se cravar o sistema com um pistão interno, para selar a composição até a profundidade desejada. Por conferir diâmetros maiores de sondagem e a presença de um revestimento externo, o sistema DT possibilita ainda a amostragem concomitante de outras matrizes, como gases do solo ou água subterrânea, ou ainda a instalação de poços de monitoramento pré-montados por dentro do revestimento, mostrando-se uma ferramenta altamente versátil (ASTM, 2014).

A amostragem de solo com SDP é uma técnica fundamental em estudos de HRSC. Por viabilizar uma amostragem rápida e contínua do perfil litológico, possibilita a melhoria do rendimento das atividades de campo, reduzindo o tempo

necessário para completar os diagnósticos. Além disso, são vantagens dessa ferramenta:

- permite a obtenção de testemunhos de solo com a estrutura relativamente preservada, possibilitando a coleta de subamostras com maior precisão, em escala centimétrica (USEPA, 2016);
- a pequena ou nenhuma geração de resíduos nas sondagens, economizando recursos para a destinação e reduzindo a exposição dos trabalhadores de campo;
- a possibilidade de execução com equipamentos pequenos e compactos, facilitando a acessibilidade em locais estreitos; e
- a possibilidade de realizar furos menores e menos intrusivos, gerando menor perturbação no ambiente.

Em relação às limitações da amostragem de solo com SDP, destaca-se a frequente defasagem na recuperação dos testemunhos, tanto por compactação das amostras (principalmente de solos moles), quanto pela perda de materiais pouco coesos e saturados (principalmente areias finas). Apresenta também uma limitação da profundidade de execução, tipicamente menor que 30 m, dependendo da geologia do local, pois as hastes de sondagem podem começar a inclinar e sofrer processo de flambagem, como ocorre nos ensaios com CPT. Assim como qualquer método de cravação contínua, não é aplicável para materiais consolidados, como rochas e concreções, podendo também apresentar limitações para amostragem de cascalhos e seixos, bem como em argilas duras (USEPA, 2016).

3.4 Membrane Interface Probe

O *Membrane Interface Probe* (MIP) é uma ferramenta de varredura (*screening*) semiquantitativa, utilizada para a detecção e perfilagem de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) no subsolo (GEOPROBE, 2009). Devido à sua capacidade, de aquisição contínua de um grande volume de dados e visualização de resultados em tempo real, o MIP é considerado uma das mais importantes ferramentas de investigação geoambiental de alta resolução no contexto da abordagem Tríade (ITRC, 2003).

Por ser uma sonda aplicada pela técnica de cravação contínua no subsolo, sua origem adveio da evolução dos ensaios de penetração de cone (CPT),

desenvolvidos na primeira metade do século passado para aplicações geotécnicas de classificação de solos (SARA, 2003). Com a criação do cone elétrico, na década de 1960, e a adição de dispositivos para medida de medida de poro-pressão, na década de 1970, a tecnologia do Piezocone (CPTu) possibilitou a obtenção de diversos parâmetros com alta definição do perfil estratigráfico e a estimativa de parâmetros hidráulicos do meio (GIACHETI; ALBUQUERQUE, 2014; MONDELLI, 2008).

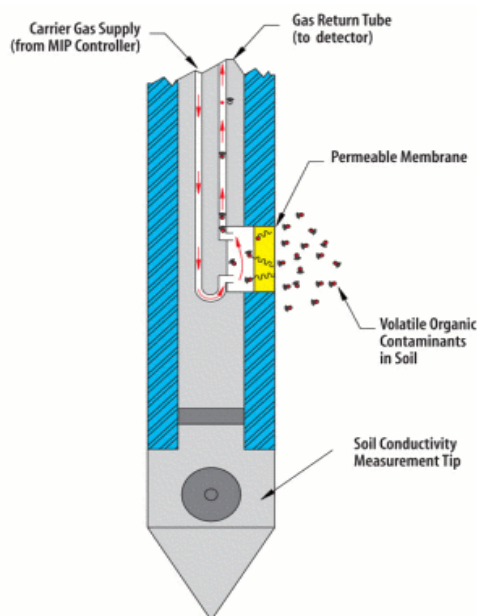
Nas décadas de 1980 e 1990, novas tecnologias foram desenvolvidas a partir da incorporação de sensores e sistemas de amostragem à ferramenta de cone, ampliando sua aplicabilidade para estudos ambientais (GILMORE, 2010). Entre estas tecnologias, o *Membrane Interface Probe* foi desenvolvido com a finalidade de possibilitar a detecção contínua de COVs no subsolo. Um sensor de condutividade elétrica também foi acoplado ao MIP, agregando ainda a capacidade de mapear a estratigrafia do subsolo, tornando-o uma poderosa ferramenta para investigação de áreas contaminadas (CHRISTY, 1996a).

O princípio de funcionamento da sonda consiste basicamente em um dispositivo de amostragem de COVs *in-situ*, onde uma membrana hidrofóbica, preferencialmente aquecida, entra em contato com a massa de contaminantes do solo, possibilitando sua difusão para um sistema interno de circulação de gás, que arrasta as moléculas particionadas até um conjunto de detectores em equipamentos na superfície (CHRISTY, 1996a).

O MIP é composto por uma ponteira instrumentada, de 3,8 cm de diâmetro e aproximadamente 30 cm de comprimento, equipada com uma membrana polimérica semipermeável impregnada em uma tela de aço inox, que se aloca em um bloco de aquecimento, contando com um sistema interno de circulação de gás de arraste (tipicamente nitrogênio), e um sensor externo de condutividade elétrica (em inglês *electrical conductivity* - EC) (**Figura 8**). Esse conjunto se conecta a um sistema de aquisição de dados na superfície por meio de um cabeamento, denominado “linha tronco” (em inglês *trunkline*), que percorre internamente as hastes de aço para cravação, conforme apresentado pela **Figura 9** (GEOPROBE, 2012). O sistema em superfície é composto por um módulo de aquisição de dados (FI6000), um módulo de controle de pressão e temperatura do sistema (MP6500), um módulo de controle do detector XSD (O-I-Analytical 5300) e um equipamento de detecção. Todo este aparato é conectado a um laptop, no qual um software específico é utilizado para a

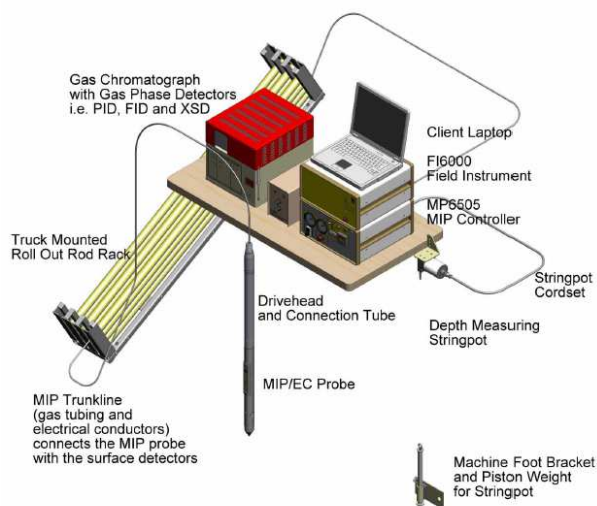
execução dos ensaios (DI Acquisition) e outro para a visualização e processamento dos resultados (DI Viewer), ambos fornecidos pela empresa Geoprobe.

Figura 8. Princípio de operação da sonda MIP



Fonte: Geoprobe (2012).

Figura 9. Principais componentes do sistema MIP.



Fonte: Geoprobe (2012).

O equipamento de detecção geralmente utilizado é um cromatógrafo gasoso (GC), sem coluna de separação, marca SRI, modelo 310C, fornecido pelo fabricante do MIP, que possui os detectores PID (*Photo-ionization Detector*), FID (*Flame-ionization Detector*) e XSD (*Halogen Specific Detector*) (**Foto 1**). Outros tipos de detectores também podem ser utilizados, como o DELCD (*Dry Electrolytic Conductivity Detector*) e o ECD (*Electron Capture Detector*), ambos com a finalidade de detectar compostos halogenados (SRI, 2015a). Conforme descrito por Bronders et. al (2008), este equipamento (padrão fornecido pelo fabricante) não possui coluna de separação dos analitos, o que impossibilita a identificação individual dos compostos. Porém, a capacidade do equipamento para identificar certos grupos químicos (como os hidrocarbonetos ou os clorados) é determinada pela resposta, individual ou combinada, dos detectores utilizados.

O detector PID utiliza uma lâmpada de radiação ultravioleta e responde a moléculas com potencial de ionização menor ou igual a 10,6 eV, incluindo hidrocarbonetos aromáticos e moléculas com ligações duplas de carbono. O PID é um detector não destrutivo, sendo utilizado em série com os demais detectores. No

MIP, esse sensor geralmente é aplicado para a detecção de hidrocarbonetos aromáticos, tais como os BTEX (ASTM, 2007).

O detector FID (**Foto 2**) usa uma chama de hidrogênio e oxigênio para queimar o analito, produzindo íons eletricamente carregados. Os íons negativos são atraídos por um eletrodo coletor positivo, criando um potencial elétrico entre a ponta do queimador (eletrodo negativo) e o coletor (eletrodo positivo), que é proporcional à quantidade de carbono injetado na chama. A corrente resultante é então amplificada e registrada, produzindo um sinal analógico para o sistema (SRI, 2015b). O FID apresenta alta sensibilidade para a maioria dos compostos orgânicos e responde a qualquer molécula com ligações de carbono e hidrogênio. Sua resposta, porém, é pobre para compostos como o H_2S , CCl_4 ou NH_3 . Segundo o fabricante do equipamento, por ser sensível a massa do analito, e não à concentração da amostra, mudanças no fluxo do gás de arraste possuem pequeno efeito na resposta do detector (SRI, 2015b). Por utilizar uma chama de hidrogênio para ionização, as amostras são destruídas no processo. O FID geralmente é utilizado para análises de hidrocarbonetos, sendo muito sensível para compostos com alto teor de carbono (i.e. metano, propano, octano, e hidrocarbonetos alifáticos voláteis) (ASTM, 2007).

Com relação ao XSD, trata-se de um detector seletivo para compostos halogenados (Cl, Br, F), sendo geralmente utilizado no MIP para a detecção de solventes clorados (ex: tricloroeteno e percloroetileno) (GEOPROBE, 2012). O reator do XSD é operado em modo oxidativo, pirolisando os analitos a uma temperatura de até 1100°C . Esse processo converte os compostos halorgânicos em seus produtos de oxidação e átomos de halogênios livres. A superfície catódica é ativada pela neutralização dos íons alcalinos emitidos pela superfície anódica. A adsorção e reação de átomos de cloro livre com esta superfície catódica alcalina produz um aumento da emissão termiônica, constituída de elétrons livres e íons de halogênios. Essa energia é transformada em sinais eletrônicos, que são lidos pelo detector (NILSSON et. al., 2001).

Foto 1: Equipamento de detecção SRI 310C, com os detectores FID, XSD e PID.

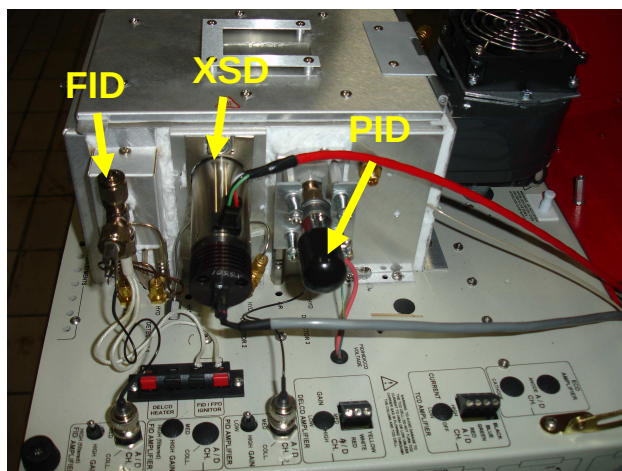
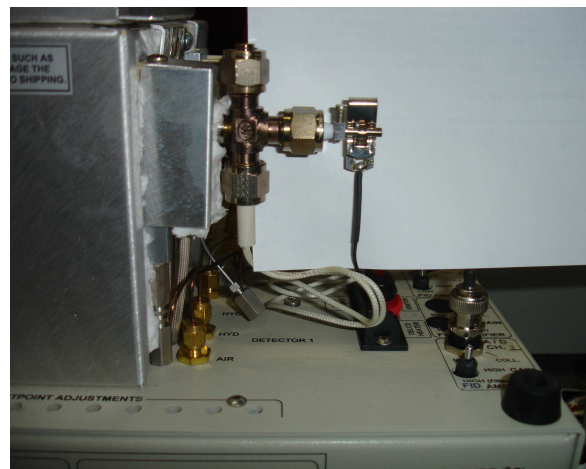


Foto 2: Detector FID.



Esses detectores geram respostas elétricas, semiquantitativas (unidade em μV), de forma quase contínua (gravadas a cada 1,6 centímetros de cravação), que são processadas e convertidas em gráficos pelo *software* DI Acquisition, da empresa Geoprobe Systems (GEOPROBE, 2012). Segundo os fornecedores desses equipamentos, os limites de detecção (LDs) aproximados são:

- PID: 0,5 partes por milhão (ppm) para BTEX (GEOPROBE, 2009);
- FID: 0,1 ppm para hidrocarbonetos (SRI, 2015b);
- XSD: 1 ppm para solventes clorados (GEOPROBE, 2009);

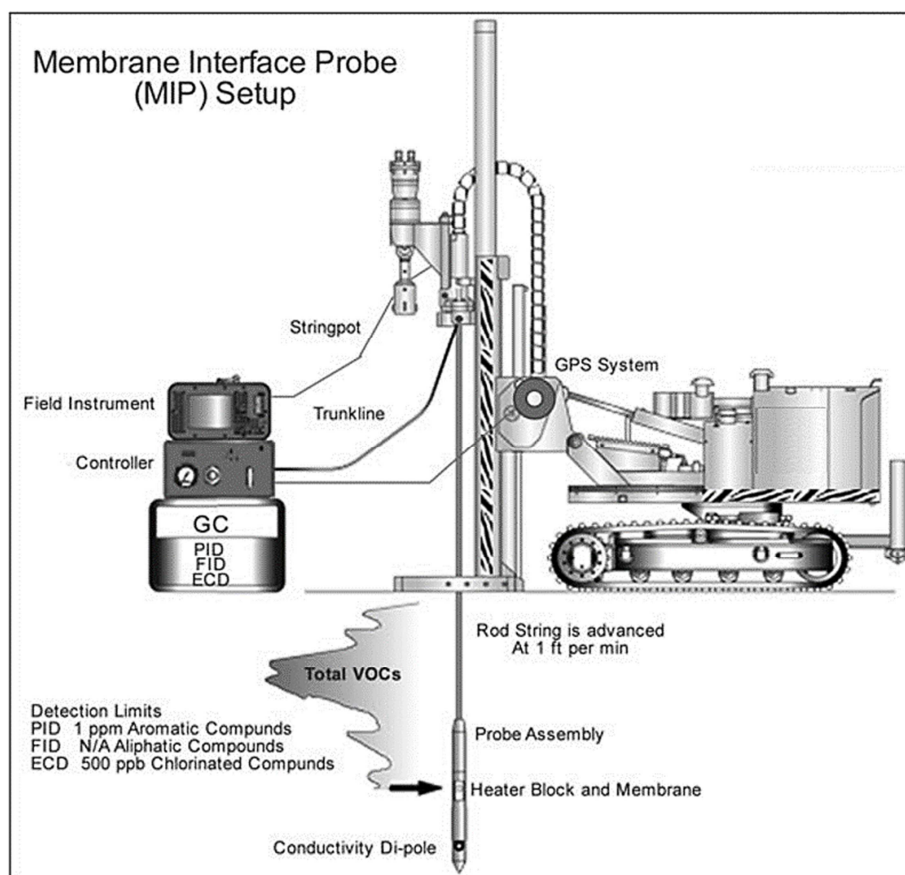
Segundo o fabricante dos detectores do MIP (SRI, 2015b), o FID apresenta uma faixa de detecção de 0,1 ppm até próximo de 100% para hidrocarbonetos em geral. No entanto, Bronders et al (2009) afirmam que, na prática, LDs menores que 1 ppm são improváveis para o detector FID deste equipamento. Estes autores obtiveram um LD de 4 ppm para tolueno, em solução aquosa, em testes laboratoriais.

Entre os fatores limitantes para os LDs são citados o nível de ruído dos sinais, o comprimento da *trunkline* e o desgaste da membrana (GEOPROBE, 2012). Porém, segundo Ravella et al. (2007) e Gilmore (2010), muitos outros fatores podem afetar a resposta dos detectores, tanto aqueles associados ao próprio equipamento (temperatura da membrana, velocidade de fluxo do gás de arraste, oscilações no fornecimento elétrico, etc), como os associados às características do subsolo (textura, grau de saturação, poro-pressão, elevados conteúdos de carbono orgânico, etc), assim como aqueles relacionados aos próprios contaminantes (pressão de

vapor e outras propriedades físico químicas dos compostos, bem como eventuais misturas de substâncias).

O ensaio é executado por meio da cravação contínua da ponteira no subsolo, utilizando uma máquina perfuratriz multifunção (**Figura 10**). Um potenciômetro elétrico, denominado *Stringpot*, é conectado diretamente na perfuratriz, para o controle e aquisição de dados relativos à profundidade e velocidade da cravação.

Figura 10. Representação do aparato de cravação e operação do sistema MIP.



Fonte: Watt et al. (2010).

Conforme o procedimento padrão de operação (em inglês *Standard Operating Procedure* - SOP), recomendado pelo fabricante, a taxa de avanço da ponteira deve ser de 1 pé por minuto (aprox. 30 cm/min), para que o bloco de aquecimento se mantenha sempre na faixa de temperatura entre 100 e 120 °C (GEOPROBE, 2009). Esta é a temperatura ótima de operação, pois além de promover a volatilização e acelerar a difusão dos COVs pela membrana, o aquecimento também contribui para a purga do sistema (membrana, linhas de gás de arraste e detectores). No entanto, dependendo das características dos compostos investigados, a temperatura pode

ser programada em outras faixas, desde a ambiente, até 140 °C, conforme os exemplos apresentados por Christy (1996b), Sara (2003) e Watt et al. (2010).

Segundo o SOP, o fluxo do gás de arraste deve se manter na faixa de 20 a 60 mL/min, com um ótimo de 40 mL/min. Este fluxo é diretamente proporcional à pressão interna do sistema, que, para uma *trunkline* de 100 pés (aprox. 30,5 m), deve ser ajustada entre 7 e 12 psi. A pressão é um importante parâmetro a ser monitorado durante os ensaios, pois seu aumento pode indicar um entupimento do sistema, enquanto que sua diminuição pode indicar vazamentos, comprometendo a qualidade dos ensaios.

Segundo Adamson et al. (2014), menores taxas de fluxo do gás de arraste podem aumentar a sensibilidade do sistema. Porém, em casos envolvendo altas concentrações e zonas de baixa permeabilidade, esta opção pode sobrecarregar os detectores e provocar o chamado efeito “*carry over*”, que seria a demora na diminuição dos sinais dos detectores (devido à impregnação do sistema), imputando incerteza aos resultados. Nesses casos, os autores recomendam o aumento da taxa de fluxo, o que diminuiria a sensibilidade dos detectores e ajudaria a purgar mais rapidamente o sistema, melhorando a resolução dos ensaios.

Diversos autores destacam as vantagens e as limitações desta ferramenta, a qual se adequa muito bem ao propósito de *screening* (varredura semiquantitativa) do perfil do subsolo para a definição dos locais de amostragem com maior probabilidade de detectar contaminantes voláteis (COSTANZA, 2002; HEINZE; DIGUISEPPI, 2003; RAVELLA et al., 2007; WATT et al., 2010; ROSSI; PITKIN, 2012).

Kram et al. (2002) classificaram o MIP como uma das ferramentas mais efetivas para a investigação de COVs no subsolo, pois possibilita análises *in-situ* mais rápidas do que qualquer outra ferramenta de cravação contínua.

Entre as técnicas de alta resolução, o MIP ganha destaque por vários motivos:

- Permite a identificação, em tempo real, do perfil de concentração no subsolo de diferentes grupos químicos, como os hidrocarbonetos aromáticos (ex: BTEX) e alifáticos (ex: metano), solventes clorados e outros contaminantes, tanto na zona vadosa, quanto na zona saturada;
- Fornece um grande volume de dados em um único ensaio, com escala vertical de centímetros (alta resolução).

- Subsidia a tomada de decisão em campo, ou seja, a eventual realocação dos pontos de investigação com base nos resultados obtidos, devido à capacidade de geração de dados em tempo real, estando alinhada às premissas da abordagem Tríade;
- Possibilita a interpretação aproximada da estratigrafia do subsolo, por meio das leituras de condutividade elétrica. A correlação dessa informação com as respostas dos detectores possibilita identificar eventuais zonas de fluxo ou de armazenamento de contaminantes;
- Contribui efetivamente para a redução das incertezas do plano de amostragem de solo e água subterrânea, indicando os locais e profundidades preferenciais para a coleta de amostras;
- Possibilita a redução do número de poços de monitoramento necessários para a investigação, o que diminui o custo e o tempo do diagnóstico, bem como minimiza a geração de resíduos e efluentes;
- Os dados são gerados tanto no formato gráfico, como em planilhas, possibilitando o desenvolvimento de modelos 2D e 3D para a representação dos resultados (i.e. Christy, 1996a; Ravella et al, 2007);
- Pode ser aplicada de modo simultâneo e acoplado com outras ferramentas de alta resolução, como o Piezocone (CPTu), o *Hydraulic Profiling Tool* (HPT) e o sensor de condutividade elétrica (EC);

Segundo a USEPA (2016), a produtividade diária dos ensaios de MIP encontra-se tipicamente entre 37 a 62 m/dia. No entanto, Ravella et al. (2007) afirmaram que a ferramenta pode coletar até 300 pés (~ 91 m) verticais de dados em um dia, dependendo das condições geológicas e da escala de trabalho.

Ao comparar o MIP com outras técnicas de investigação de alta resolução, Mahler et al. (2012) estimaram um custo até dez vezes menor de ensaios com o MIP em relação à amostragem discreta e contínua do mesmo perfil do subsolo. Ravella et al. (2007) também apresentam esta comparação, indicando o MIP como uma excelente ferramenta para a rápida localização e delimitação de áreas fonte e plumas dissolvidas de COVs clorados.

Griffin e Watson (2002) indicaram o uso do MIP como parte de um método ideal para a investigação de áreas contaminadas por solventes clorados, tendo como função a detecção inicial das áreas fontes com possível presença de DNAPLs.

Ravella et al. (2008) e Symons et al. (2012) apresentaram exemplos da aplicação do MIP antes, durante e após o processo de remediação, mostrando que significativos ganhos de eficiência podem ser obtidos ao utilizar a ferramenta, tanto para um dimensionamento adequado, quanto para o monitoramento dos resultados e readequações das remediações.

Tillman e Sohl (2010) destacam ainda que a aplicação da ferramenta MIP, no contexto da abordagem Tríade, pode auxiliar a redução de custo e prazo dos projetos, ao possibilitar a elaboração de melhores modelos conceituais para a redução das incertezas nas tomadas de decisões.

No entanto, como qualquer outra ferramenta de investigação, o MIP possui limitações, sendo fundamental que os usuários compreendam suas características e potencialidades para utilizá-la de forma adequada. Entre as principais limitações citadas na literatura, pode-se destacar:

- Capacidade de detecção baixa ou inexistente para a maioria dos compostos semivoláteis e não voláteis. A sonda aplica-se basicamente aos COVs, capazes de serem volatilizados na temperatura da sonda e permanecerem na forma gasosa durante a viagem, desde a membrana, por toda a *trunkline*, até os detectores na superfície (WATT et al., 2010);
- A resposta dos detectores pode variar em função de uma série de fatores, tanto operacionais, como do meio físico e dos próprios contaminantes, inviabilizando sua aplicação quantitativa para a determinação das concentrações dos contaminantes (GILMORE, 2010). Diversos autores relataram baixas correlações estatísticas ($R^2 < 0,5$) ao comparar os resultados do MIP com resultados analíticos de amostras de solo e água subterrânea (COSTANZA, 2002; RAVELLA et al., 2007; ADAMSON et al., 2014, etc), reforçando seu uso como uma ferramenta de *screening* qualitativa;
- Em função da característica acima, os resultados obtidos, e suas interpretações, demandam de posterior calibração, com coleta de amostras (solo, gás e/ou água subterrânea) para a confirmação dos resultados e identificação dos analitos de interesse, bem como de suas exatas concentrações (ASTM, 2007);
- O sistema não é capaz de discriminar os contaminantes, sendo sua resposta uma complexa função atribuída às diferentes substâncias presentes no

subsolo e detectáveis pelos detectores. Isso prejudica sua utilidade no caso de múltiplos contaminantes, conforme demonstrado por Gilmore (2010);

- Os limites de detecção dos detectores são relativamente altos, se comparados aos valores de referência, nacionais e internacionais, para diversos contaminantes, não permitindo a delimitação de plumas no solo e água subterrânea. Desta forma, segundo Bronders et al. (2009), o sistema MIP se mostra mais aplicável à delimitação de áreas fonte, onde, teoricamente, as concentrações são mais elevadas;
- Possui limitações para a continuidade das perfurações em substratos resistentes, e/ou rochosos;
- Quando os ensaios ocorrem em áreas fonte, com presença de fase livre ou residual, pode ocorrer o chamado efeito *carry-over* (ou *drag-down*), que seria uma resposta desproporcionalmente elevada e alongada dos detectores, após a sonda cruzar essas zonas de elevadas concentrações (GERSTNER et al., 2006). Nesses casos ocorre a contaminação cruzada da linha de amostragem e a sobrecarga dos detectores, demorando certo tempo até a purga do sistema e os detectores voltarem a responder de forma adequada. Esse efeito pode levar a conclusões errôneas e à superestimativa da massa de contaminantes presente (BUMBERGER et al., 2012).

Conforme destacado por Bronders et al. (2009), interpretações errôneas dos resultados do MIP são comuns, principalmente devido à falta de entendimento e conhecimento em relação aos detectores utilizados, seus limites de detecção e sua precisão. Uma melhor compreensão sobre sua sensibilidade, associada a interpretações com maior embasamento científico, são necessárias.

Deve-se destacar ainda, conforme citado por Riyis (2012), a necessidade de ampliar a divulgação e o uso das ferramentas de alta resolução no mercado nacional de investigação geoambiental. Apesar de serem amplamente utilizadas no exterior a mais de dez anos, a falta de conhecimento sobre essas ferramentas, a baixa oferta no mercado e o alto custo (relativo) em comparação aos métodos tradicionais, fazem com que muitas consultorias optem por técnicas mais baratas, e menos precisas, para investigação. Além disso, ressalta-se a escassez de estudos e publicações nacionais a respeito do MIP, o que dificulta ainda mais a sua difusão no mercado brasileiro.

3.4.1 Aplicação do detector FID para detecção de metano

O detector de ionização por chama (FID) é um dos principais detectores utilizados para análises químicas pela técnica de cromatografia gasosa (GC-FID). Trata-se de um detector universal, que responde à maioria dos compostos orgânicos, sendo sua resposta proporcional à quantidade de carbono da amostra introduzida na chama. Suas principais vantagens são a alta sensibilidade, a ampla faixa de trabalho, a alta linearidade, sua robustez, a facilidade de operação, baixo custo relativo de aquisição e manutenção, além de não detectar água e nem os gases de arraste (ARGENTON, 2010; POLESE, 2014).

Diversos estudos relatam a aplicação da técnica GC-FID para o monitoramento ambiental de metano no biogás encontrado em várias atividades. Prado et al. (2010) estudaram as concentrações do gás a partir de águas residuárias da produção de café. Silva et al. (2010) e Kuckartz (2014) analisaram a presença de metano em amostras de gás proveniente de minas de carvão subterrâneas. Silva et al. (2013) avaliaram as emissões superficiais de gases a partir de aterros sanitários de grande porte, assim como Kulkamp et al. (2002) analisaram o metano gerado a partir da biodegradação de diesel e etanol em aquíferos contaminados.

Conforme apresentado anteriormente, o FID é um dos detectores que compõe o sistema de aquisição de dados do MIP, sendo aplicado basicamente para a investigação de contaminações por hidrocarbonetos. Christy (1996b) apresentou exemplos de resposta do detector MIP-FID para diversos compostos químicos (butano, BTEX, TCE, metano, gasolina e diesel). Entre esses, apresentou os resultados de ensaios em uma área de armazenamento subterrâneo de combustíveis, mostrando o perfil de resposta do FID (até 6 m de profundidade), tanto para um setor com solo limpo, como com solo contaminado. No setor com solo limpo, a resposta situou-se entre 25 e 30 mV, referindo-se à linha de base do detector. No setor com solo contaminado, os sinais passaram de 60 mV, com perfil indicando contaminação entre 2,5 e 5,0 m de profundidade, aproximadamente. Análises de solo posteriores mostraram que o único hidrocarboneto presente era o metano, sendo essa informação atribuída a um vazamento de uma tubulação de gás natural, que havia ocorrido três meses antes, a 9 m do ponto.

Fiacco et al. (2010) apresentaram um exemplo da assinatura dos perfis de resposta do MIP para o metano, mostrando que o detector FID é muito mais sensível

em relação aos detectores PID e DELCD, com sinal até duas ordens de grandeza maior.

Em um experimento realizado pelo fabricante (dados não publicados¹), foi testada a resposta do sistema a várias concentrações de gás natural, de 0 até 100% (GEOPROBE, 2013). Para o detector FID, o sinal de resposta chegou a 7800 mV para uma concentração de 100% de gás natural, e a curva de resposta apontou um coeficiente de determinação (R^2) de 99,81%, indicando uma excelente correlação. Testou-se também a resposta do detector PID, que apesar de ter apresentado bom coeficiente de determinação, com $R^2 = 89,33\%$, apresentou uma resposta máxima de apenas 18 mV para o gás natural puro (100% de concentração), mostrando-se muito pouco sensível a este composto.

De fato, a aplicação do MIP para a investigação de locais com presença de metano no subsolo se mostra altamente favorável, pelos seguintes motivos:

- Por ser o composto com a menor molécula de hidrocarboneto e ocorrer naturalmente na forma gasosa, sua entrada, circulação e saída do sistema são favorecidas, mesmo na temperatura ambiente;
- As características acima também minimizam um dos principais problemas associados ao MIP, que é o efeito *carry-over*, pois o composto é rapidamente purgado do sistema;
- A sensibilidade do FID ao metano se destaca em relação aos demais detectores, tornado simples identificar o perfil de resposta associado à presença desse composto;
- Apresenta limite de detecção na faixa de ppm, sendo muito menor do que o limite inferior de explosividade (LIE) do metano (igual a 5% ou 5×10^5 ppm), o que possibilita a detecção de potenciais concentrações de risco no subsolo;
- Por fim, a alta correlação estatística obtida nos testes de respostas do FID às concentrações de metano, mostra o potencial de aplicação semiquantitativa da ferramenta para a detecção do gás, apesar das condições do meio físico também poderem influenciar diretamente nos resultados;

Devido aos fatores mencionados, a ferramenta apresenta grande potencial para a detecção e mapeamento de gás metano no subsolo, conforme já demonstrado pela publicação do Departamento de Recursos Naturais do Missouri,

¹ Dado obtidos por comunicação pessoal, via e-mail, com a empresa Geoprobe, no dia 02 de dezembro de 2015.

Estados Unidos (MDNR, 1999). Neste estudo foram mapeados os caminhos preferenciais de migração de gases a partir de aterros de resíduos domésticos, utilizando o MIP como ferramenta de *screening*, amostras de solo e poços de monitoramento de gases (PGs) para a confirmação dos resultados e modelos 3D para representação gráfica. O estudo conclui que o MIP foi efetivo para o objetivo proposto e, na maioria dos casos, o FID forneceu leituras semiquantitativas comparáveis à composição dos gases medidas nos PGs. No entanto, os autores alertam para a importância de uma caracterização minuciosa do meio físico, sendo improvável desconsiderar a amostragem direta e as análises de gás, especialmente por questões legais.

Nesta revisão bibliográfica não foram encontrados estudos ou publicações no Brasil sobre a utilização do MIP para a avaliação do comportamento do gás metano no subsolo.

3.4.2 Aplicações do sensor de condutividade elétrica

O sensor de condutividade elétrica (CE) é um dispositivo que mede a resposta do solo à injeção de uma corrente elétrica. Essa técnica provém das técnicas geofísicas, criadas na primeira metade do século XX para explorações minerais e petrolíferas. As primeiras sondas de CE destinadas à avaliação de solos foram desenvolvidas na década de 1970, tanto para pesquisas na área de agricultura (RHOADES et al., 1976 apud CHRISTY et al., 1994), como para investigações geotécnicas, utilizando o Piezocone de Resistividade (DE GRAFF; ZUIDBERG, 1985 apud DE MIO, 2005).

No início da década de 90, Christy et al. (1994) criaram uma sonda de CE específica para aplicação por cravação contínua. O princípio de funcionamento é muito similar a outros métodos de perfilagem elétrica, onde a CE aparente de um intervalo do subsolo é calculada por meio da aplicação de uma corrente por um conjunto de eletrodos, enquanto a sonda vai sendo cravada. A CE é medida na unidade de mili-Siemens por metro (mS/m), sendo registrada em um perfil, em função da profundidade (SCHULMEISTER et al., 2003). Diferentes configurações dos eletrodos são possíveis, sendo os arranjos Wenner e o Dipolo os mais utilizados (CHRISTY, 1994; GEOPROBE, 2015). O raio de alcance lateral varia entre 5 e 10 cm (BECK et al., 2000).

Os dispositivos de CE atualmente disponíveis no mercado podem ser aplicados tanto de forma isolada (ponteira dedicada apenas a este sensor), como de forma acoplada a outras sondas de imageamento direto do subsolo, como o MIP, o HPT, o CPT e o LIF (GEOPROBE, 2015; DAKOTA TECHNOLOGIES, 2015). Independentemente da conformação da sonda, esse sensor é capaz de coletar dados continuamente a cada 1,5 cm de cravação, sendo, por isso, considerada uma das mais importantes ferramentas para investigação de alta resolução (SCHULMEISTER et al., 2003).

Conforme descrito por Christy (1996a), no MIP, o sensor de CE possui o arranjo de dipolo (**Figura 8**), onde um eletrodo central isolado transmite uma corrente elétrica alterna para o eletrodo do corpo da sonda, sendo a voltagem de resposta medida entre esses eletrodos. Esse sensor é razoavelmente preciso para medições na faixa de 5 a 400 mS/m.

Ainda segundo seu idealizador (CHRISTY, 1996a), a principal função desse sensor é auxiliar na caracterização litoestratigráfica do subsolo, fornecendo informações de alta resolução vertical para a investigação do transporte de contaminantes. Como regra geral qualitativa, condutividades elétricas menores indicam a presença de materiais mais grosseiros (areias e cascalhos), enquanto condutividades mais elevadas são indicativas de materiais finos (argilas). No entanto, deve-se ter cautela na interpretação dos perfis, pois múltiplos fatores podem influenciar os resultados.

Conforme apresentado por diversos autores, tais como McCall (1996) e Schulmeister et al. (2003), a CE do subsolo é basicamente uma função da umidade do solo e das propriedades condutivas dos fluídos e da matriz do solo. Em formações onde as variações na geoquímica da água subterrânea são pequenas, as diferenças de granulometria e composição mineralógica dos sedimentos são os fatores determinantes (KEYS, 1990, apud SCHULMESITER et al., 2003). Grãos de siltes e areias, compostos por minerais com ligações covalentes, tais como quartzo, mica e feldspato, são em geral, pouco condutivos. Por outro lado, partículas argilosas, compostas por filossilicatos, substâncias húmicas e argilominerais de óxidos e hidróxidos de ferro e manganês, tendem a apresentar alta CE, devido ao pequeno tamanho dos grãos, área de superfície relativamente alta por unidade de volume e presença de cargas elétricas superficiais (LANGMUIR, 1997, apud SCHULMESITER et al., 2003).

Schulmeister et al. (2003) destacam ainda que, devido ao contraste no comportamento elétrico, camadas predominantemente arenosas ou argilosas podem ser mapeadas por meio do sensor de CE, principalmente quando ocorre um contato abrupto entre essas camadas. No entanto, dada a complexidade de variáveis envolvidas, a qualidade e a resolução das informações geralmente requerem amostras de confirmação pelos métodos convencionais, tais como a amostragem direta e análises laboratoriais de solo e água subterrânea.

McCall (1996) apresenta vários exemplos de informações que podem ser obtidas por meio do mapeamento estratigráfico com a sonda de EC, desde a elaboração de seções e modelos hidrogeológicos em três dimensões, até o mapeamento de aquitardes e o cálculo do volume de aquíferos.

Beck et al. (2000) apresentam um estudo onde a sonda de CE foi utilizada para múltiplas finalidades. Além de atuar como ferramenta de varredura para otimizar o plano de amostragem, a sonda também foi útil para a localização de tambores enterrados, identificação do nível d'água subterrânea, mapeamento de plumas inorgânicas de cromo dissolvido e ainda a avaliação de um sistema de remediação por barreira reativa.

Diversos estudos apontam ainda as potencialidades de se combinar a CE com outros métodos de investigação. Harrington e Hendry (2006) usaram a sonda, juntamente com a amostragem de solo e ensaios laboratoriais, para um estudo hidrogeoquímico, onde mapearam as propriedades físicas e a salinidade de um aquitarde no sul do Canadá. MDNR (1999) utilizaram a CE juntamente com o MIP, poços de monitoramento de gases e modelagem 3D, para o mapeamento dos caminhos preferenciais de migração de metano a partir de aterros de resíduos nos EUA. Schulmeister et al. (2010) aplicaram a sonda de EC e HPT acopladas para avaliar o transporte de plumas de cloreto em um importante aquífero no estado do Kansas, EUA. Riyis et al. (2013) indicam o sensor de CE, acoplado à ferramenta RCPTu, como uma técnica muito útil para a definição de perfis hidroestratigráficos de alta resolução. Schulmeister et al. (2003), Zume et al. (2006) e Freitas et al. (2015), destacam ainda a integração de métodos geofísicos e sondagens de CE como uma excelente estratégia para a definição lateral e vertical de estruturas e anomalias geoquímicas no subsolo.

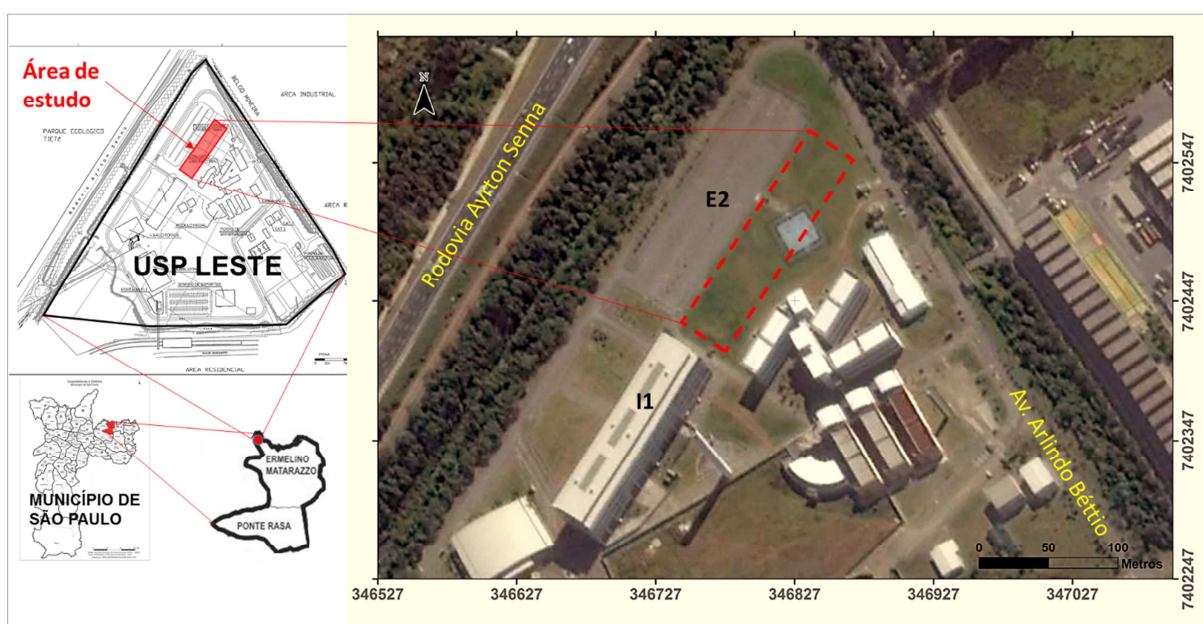
Por fim, vale ressaltar o potencial do sensor de CE para auxiliar na caracterização de ambientes heterogêneos e estratificadas, como os depósitos

aluvionares. Butler et al. (1999), entre vários outros autores (MCCALL, 1996; WILSON et al., 2005; ZUME et al., 2006; FREITAS et al., 2015) mostram que os contrastes de CE, produzidos pelos diversos estratos destes ambientes, possibilitam a delimitação e o mapeamento das principais camadas que controlam o fluxo e o transporte dos contaminantes. Além disso, o fato dos sedimentos encontrarem-se inconsolidados favorece o avanço da ponteira, que, em muitos casos, chega a atingir a base desses depósitos (aquitardes ou o topo rochoso), possibilitando inclusive a definição de sua espessura e o mapeamento tridimensional do pacote sedimentar. Essa informação certamente é de grande valia para a adoção das melhores estratégias de remediação.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido como área de estudo foi o Campus da Universidade de São Paulo - Zona Leste (USP Leste), localizada na Avenida Arlindo Bétio, N° 1000, distrito de Ermelino Matarazzo, zona leste da cidade de São Paulo (SP), sede da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH) da USP (**Figura 11**).

Figura 11. Localização do Campus da EACH-USP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Campus da USP Leste começou a ser construído em 2004, em um terreno anteriormente pertencente ao Parque Ecológico do Tietê, que foi cedido pelo Governo do Estado de São Paulo à USP. A inauguração do Campus se deu em 2005, porém suas instalações ainda estão em processo de ampliação. Atualmente, a EACH oferece dez cursos de graduação, com 1.020 vagas oferecidas anualmente (EACH, 2015).

Essa área foi selecionada para a execução dos trabalhos de campo em função do histórico de estudos ambientais já realizados no local, que englobam uma ampla caracterização do meio físico, principalmente voltada ao gerenciamento de áreas contaminadas e às questões associadas à presença de gás metano no subsolo.

A seguir, apresenta-se uma breve descrição do histórico ambiental da área e os seus principais aspectos geológicos e geotécnicos, os quais são fundamentais para o presente estudo.

4.1 USP Leste

O Campus da USP Leste se localiza na área de várzea do rio Tietê, em uma gleba anteriormente pertencente ao Parque Ecológico do Tietê e administrada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Segundo IPT (2011) e análises de fotos aéreas multitemporais apresentadas por CEMA (2008) e SERVIMAR (2012), até meados da década de 1960, o terreno era ocupado, em grande parte, por densa cobertura vegetal, estando o rio Tietê ainda em seu curso original. A partir da década de 1970, nota-se a supressão da vegetação, com o início do aterramento da área. Nas décadas de 1980 e 1990 o local foi utilizado como bota-fora para materiais dragados no desassoreamento e retificação do rio Tietê, formando um terraço elevado de aproximadamente 4 a 5 m em relação ao nível original da planície aluvial (COSTA, 2004).

Historicamente, as áreas da várzea do rio Tietê sofreram um intenso processo de degradação ambiental devido à expansão urbana e às atividades de mineração, voltadas para a indústria da construção civil, principalmente a partir de meados do século XX. No entanto, segundo informações do Relatório Ambiental Preliminar - RAP (COSTA, 2004), não há histórico de atividades minerárias na área de estudo, o que provavelmente evitou uma maior degradação associada a existência de cavas abandonadas, que antigamente eram comumente utilizadas para a disposição de resíduos e aterros de forma irregular.

Sobre os possíveis impactos ambientais associados à presença do aterro com material de dragagem, Costa (2004) destacou a possibilidade de contaminação do aquífero superficial, além de associá-lo à presença de gás metano no subsolo, identificado em sondagens geotécnicas executadas no estudo.

Em 2005, por exigências do órgão ambiental estadual, foi apresentado um estudo de “Diagnóstico ambiental da USP Campus Zona Leste” (SERVIMAR, 2005), no qual foi confirmada a ocorrência de gás metano nos níveis mais rasos do subsolo (até 1 m de profundidade) e a presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos no solo e na água subterrânea, associados ao material de dragagem anteriormente

disposto no terreno. Recomendou-se a instalação de drenos de exaustão de gases sob as edificações e o detalhamento das investigações nos pontos que apresentaram contaminações.

Entre 2006 e 2011, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) executou diversos estudos na área, contemplando duas vertentes principais: avaliar a contaminação do solo e água subterrânea e calcular o risco toxicológico à saúde humana; e, avaliar e propor adequações aos sistemas de extração gases instalados, bem como propor adaptações aos projetos das futuras edificações. Os estudos concluíram que, apesar da presença de contaminantes, não havia risco toxicológico à saúde dos usuários do Campus. Foram propostas ainda medidas de controle institucional, como a restrição ao consumo da água subterrânea, e, medidas de engenharia, voltadas à prevenção do acúmulo sob as lajes de pisos e da intrusão de gases e vapores nos edifícios do Campus. Um monitoramento contínuo destes sistemas de proteção também foi recomendado.

Novos estudos ambientais foram executados entre 2012 e 2014, porém com maior enfoque nos locais que receberam materiais de aterro sem origem certificada em 2011 (SERVMAR, 2012; SERVMAR, 2014). Uma das conclusões apresentadas foi que os gases do subsolo eram provenientes da decomposição de matéria orgânica, presente tanto nos materiais de dragagem depositados em décadas passadas, como do próprio solo da várzea, que constitui a litologia natural do terreno. As maiores concentrações foram atribuídas à capacidade do meio em trapear os gases gerados no subsolo.

Em 2012, o IPT apresentou, também, os estudos de “Ensaio Piloto do Projeto de Ventilação” (IPT, 2012) e “Detalhamento dos Sistemas de Ventilação do Subsolo de Edifícios da EACH USP” (IPT, 2013). Esses sistemas foram instalados em 2014 e vêm sendo monitorados continuamente desde março daquele ano, conforme apresentado por Weber Ambiental (2016). Além desses, uma extensa rede de poços de monitoramento de gases, pontos de utilidades subterrâneas (e.g. ralos, caixas de passagem, etc.) e ambientes confinados, também vêm sendo monitorados para a avaliação da efetividade dos sistemas.

Com base nos dados coletados até junho de 2016, a consultoria concluiu que não estava ocorrendo a intrusão de gases e vapores nas edificações da USP Leste e que os sistemas de ventilação e monitoramento instalados estavam sendo eficazes (WEBER AMBIENTAL, 2016). Conforme o Parecer Técnico da CETESB N°

010/16/CAAA (CETESB, 2016), o risco potencial decorrente da existência de gases no subsolo foi considerado controlado, permitindo o uso seguro das instalações do Campus. Porém, os sistemas de ventilação de gases, assim como o monitoramento, deveriam ser continuados, entre outras ações complementares relativas às demais questões ambientais.

4.2 Aspectos geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos

A área de estudo está inserida no contexto geológico da planície aluvial do Rio Tietê, formada por sedimentos quaternários depositados sobre os sedimentos paleogênicos da Formação Resende, pertencentes à Bacia sedimentar de São Paulo. Os sedimentos quaternários são compostos por argilas, areias, cascalhos e níveis de seixos, em geral, com granodecrescência ascendente, cuja área fonte está associada ao rebordo granítico-gnáissico pré-cambriano da bacia do Alto Tietê. Por sua vez, a Formação Resende, unidade basal e lateral do Grupo Taubaté, possui sua gênese associada a sistemas de leques aluviais de rios entrelaçados. Localmente predominam lamitos de leques aluviais medianos a distais e, areias e conglomerados de sistemas fluviais entrelaçados (RICCOMINI et al., 2004).

O pacote sedimentar da Bacia de São Paulo (BSP) se insere na porção central do *Rift* Continental do Sudeste Brasileiro, cujo embasamento cristalino Pré-Cambriano na região de interesse é constituído por rochas metamórficas e migmatíticas do Complexo Embu (RICCOMINI et al., 2004). Um poço tubular, existente na área do Parque Ecológico do Tietê, indica uma espessura média de 100 m para estes sedimentos na região (VARNIER; HIRATA, 2002).

Com relação à hidrogeologia da área, o aquífero raso é caracterizado como um aquífero livre, de porosidade primária, heterogêneo e anisotrópico, associado aos sedimentos quaternários aluviais do rio Tietê, fluindo também pelos materiais de aterro sobrejacentes. Este aquífero pode apresentar uma espessura média de até dezenas de metros, conectando-se hidraulicamente com os sedimentos terciários da BSP (VARNIER; HIRATA, 2002).

Localmente, o nível do lençol freático encontra-se a uma profundidade média aproximada de 2,0 m, variando entre 0,5 e 4,5 metros. Poços de monitoramento de água subterrânea (PMs) mais profundos, com seções filtrantes submersas e profundidades de até 9,2 m, apresentaram níveis d'água subterrânea (NAs) de até

7,16 m. O sentido preferencial do fluxo subterrâneo é para N/NO, em direção aos córregos que margeiam a área a NE e NO, com exceção do setor sul, cujo fluxo preferencial se dá em direção ao córrego ao sul do Campus. Testes do tipo “slug” foram realizados em diversos PMs na área, indicando uma condutividade hidráulica horizontal média de 10^{-5} a 10^{-6} m/s. O monitoramento dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea, realizado em novembro e dezembro de 2013, indicou que em quase todos os PMs os teores de oxigênio dissolvidos foram menores que 0,1 mg/L (exceção do PM-40) e o potencial de oxirredução (ORP) foram negativos (entre -403 e -28 mV), confirmando um ambiente hidrogeoquímico redutor (SERVMAR, 2014).

Conforme apresentado no RAP, toda a área de estudo foi recoberta por depósitos tecnogênicos provenientes da dragagem do rio Tietê e de sua várzea, formando um terraço elevado de até 8 metros de espessura, com média de 5 metros em relação à antiga planície aluvial, o que confere ao terreno baixa susceptibilidade às inundações. Dados de sondagens geotécnicas mostraram que estes depósitos são compostos predominantemente por areias, além de argilas e siltes em menor proporção, com a presença de matéria orgânica abundante, e ocorrências de materiais antrópicos, tais como plásticos, garrafas, pneus e objetos diversos. Ainda segundo o mesmo documento, em razão da superfície do terreno apresentar poucas irregularidades à época da implantação do Campus, a terraplenagem de preparação necessitou de pouca movimentação de solos, apenas obras de corte e aterro, sem a necessidade de materiais de empréstimo.

4.3 Caracterização do local dos levantamentos de campo

O local do Campus da USP Leste selecionado para a execução dos levantamentos de campo foi um setor não edificado, coberto por um extenso gramado, próximo ao estacionamento E2 e ao edifício I1, conforme a localização apresentada na **Figura 11** e nas **Fotos 3** e **4**. Além de questões logísticas e de segurança favoráveis, este local possui um histórico de estudos técnicos e acadêmicos relacionados à contaminação do solo e água subterrânea e à ocorrência de gás metano no subsolo, caracterizando-o como um campo de testes ideal para a avaliação dos métodos propostos pelo presente trabalho.

Foto 3: Aspecto geral da área de estudo no Campus da USP Leste. Visada para SO.



Foto 4: Aspecto geral da área de estudo, com a equipe executora dos levantamentos de campo ao centro. Visada para NE.



Conforme os trabalhos realizados por Servmar (2005), IPT (2011) e Servmar (2014), que envolveram amostragens de solo e água subterrânea no local em questão, não foram detectados contaminantes orgânicos nas amostras coletadas. Apenas substâncias inorgânicas (metais e íons maiores) foram detectadas, nas fases adsorvida e/ou dissolvida dessas matrizes.

Segundo o estudo apresentado por Abreu (2012), e as publicações de Mendonça et al. (2015a) e Mendonça et al. (2015b), métodos geofísicos foram empregados concomitantemente a métodos de amostragem direta para caracterização dos processos de geração, transporte e acúmulo de biogás no subsolo da área de estudo.

Abreu (2012) apresentou também uma série de levantamentos geofísicos realizados no Campus da EACH, entre os quais a magnetometria confirmou a ausência de materiais metálicos enterrados na área de estudo, sugerindo que o local não foi utilizado para a disposição de resíduos diversos, além do material de dragagem.

Mendonça et al. (2015b) apresentaram a combinação de levantamentos de tomografia de resistividade elétrica (ERT) com procedimentos de amostragens de solo, água subterrânea e gás do solo, por meio de dispositivos multiníveis instalados na área. Os resultados subsidiaram a elaboração de um modelo conceitual da área, no formato de uma seção, na qual foram delimitadas as principais camadas

litoestratigráficos e foram identificados bolsões de biogás em três níveis diferentes no subsolo. O bolsão mais próximo à superfície, contido nos materiais de dragagem depositados sobre o terreno, apresentou um gradiente de concentração e pressões niveladas com a atmosfera. Outro bolsão foi detectado entre 5 e 7 metros de profundidade, em lentes arenosas contidas em uma espessa camada de argila orgânica, a qual estaria atuando como fonte e, ao mesmo tempo, reservatório para as acumulações do gás. Um terceiro bolsão foi detectado ainda em profundidade, associado à fácies arenosa da base dos sedimentos quaternários, que estariam possibilitando o acúmulo do biogás sob pressão.

Os autores alertam ainda que estes bolsões, trapeados sob pressões maiores que a atmosférica, podem encontrar caminhos preferenciais de escape à superfície, o que configuraria uma situação de risco às edificações sobrejacentes, sendo, portanto, necessária a adoção de medidas preventivas e soluções de engenharia para a proteção dos usuários nestas áreas.

Quanto à publicação de Mendonça et al. (2015a), métodos geofísicos e microbiológicos foram integrados para compreender os processos de geração e migração do gás metano na área de estudo. Uma análise temporal de levantamentos de resistividade elétrica e polarização induzida possibilitou o cálculo de índices que associavam as alterações das propriedades geoelétricas do meio às mudanças de saturação, ocasionadas, tanto pela infiltração de água da chuva e elevação do lençol freático, como pelo acúmulo de gás e deslocamento da água dos poros. Os caminhos preferenciais de migração e acúmulo de biogás no subsolo foram modelados por seções representativas, mostrando que bolsões pressurizados em profundidade podem conectar-se ocasionalmente com a superfície, criando ebulições para a atmosfera, o que poderia se configurar como um cenário de risco ao uso e ocupação dessas áreas.

Em relação à caracterização microbiológica, um mapeamento genético mostrou uma comunidade microbiana relativamente homogênea entre os diferentes extratos do meio, com predominância de bactérias fermentadoras e metanogênicas acetoclásticas. O resultado foi associado à translocação frequente de matéria entre os extratos do subsolo, ocasionada tanto pela recarga do aquífero, como por migrações ascendentes de biogás, o que criou uma certa homogeneização das comunidades microbióticas.

Os autores recomendaram ainda que uma atualização do modelo conceitual da área deveria ser realizada com o monitoramento do biogás em uma maior variedade de profundidades, de modo a abranger todos os diferentes mecanismos e cenários de emissão Mendonça et al. (2015a).

Neste contexto, os dados apresentados serão importantes para a interpretação dos resultados do presente estudo, bem como para embasar a avaliação da aplicabilidade das ferramentas de alta resolução para caracterização geoambiental de uma área com tal histórico de informações disponíveis.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, o presente estudo compreendeu as seguintes etapas:

- 1) Ensaios preliminares para ajustes do sistema MIP e validação do experimento;
- 2) Elaboração das curvas de resposta do detector FID a diferentes misturas gasosas;
- 3) Execução dos ensaios e amostragens em campo;
- 4) Descrição tátil visual e coleta de amostras de solo para análises laboratoriais; e
- 5) Processamento e apresentação dos dados;

A seguir são descritos os materiais e métodos adotados em cada etapa.

5.1 Ensaios preliminares para ajustes do sistema MIP e validação do experimento

Em novembro de 2015, foram realizados os ensaios preliminares para a verificação e ajustes do sistema MIP, e, para a validação dos experimentos, por meio de testes de resposta qualitativos do equipamento a uma amostra padronizada de biogás. Estes ensaios foram executados no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas (LRAC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

O sistema MIP utilizado foi disponibilizado pelo IPT e possui uma configuração padrão do fabricante, a empresa Geoprobe. Os principais componentes do sistema são:

- Sonda MIP, modelo MP6520, equipada com sensor de condutividade elétrica (**Foto 5**);
- Módulo de aquisição de dados, modelo FI 6000 (**Foto 6**);
- Módulo de controle de fluxo, pressão e temperatura, modelo MP 6500 (**Foto 6**);
- Cromatógrafo gasoso de campo, marca SRI Instruments, modelo 310C, dotado dos detectores PID, FID e XSD, sem coluna de separação (**Foto 6**);
- Módulo de controle do XSD, modelo 5300, da marca OI Analytical (**Foto 6**); e
- Linha tronco (*trunkline*), modelo PEEK, com 27 m de comprimento (**Foto 5**).

Foto 5: Sonda MIP modelo MP6520.



Foto 6: Sistema MIP montado em bancada.



Para a operação, verificação e ajustes do sistema MIP, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Cilindros de gás nitrogênio U.P. (ultrapuro) e de gás hidrogênio U.P., ambos com capacidade volumétrica de 3 m³, com os respectivos manômetros;
- Carrinho para suporte dos cilindros e das hastes de cravação;
- *Notebook*, marca Itautec, modelo Infoway W7410;
- *Software* DI Acquisition, da empresa Geoprobe;
- Fluxímetro digital, marca Agilent, modelo ADM-1000;
- Multímetro digital, marca Minipa;
- Estabilizador elétrico e filtro de linha;
- Dipolo para teste do sensor de condutividade elétrica; e
- Caixas de ferramentas: kit eletricista; kit de peças de reposição do MIP, ferramentas e chaves diversas (fenda, alicate, grifos, etc.);

Para a execução dos testes de resposta foram utilizados ainda os seguintes materiais:

- Cilindro com composição padrão de biogás, marca Dräger (**Foto 7**);
- Estação de bombeamento, marca Dräger (**Foto 7**);
- Dispositivo para injeção (ou bloco de injeção) de biogás na membrana da sonda MIP (**Foto 8**);
- Mangueiras de polietileno, de 0,25" de diâmetro interno (DI), e mangueira de silicone, de 6 mm de DI;

- Equipamento portátil de medição de biogás, da marca LANDTEC, modelo GEM-2000, devidamente calibrado (**Foto 7**); e
- Cronômetro.

Foto 7: Verificação da composição do cilindro de biogás, com equipamento de medição GEM-2000.

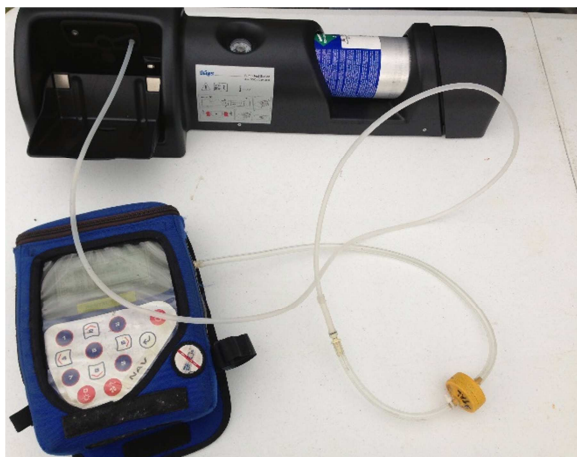


Foto 8: Execução dos testes de resposta. Destaque para o dispositivo de injeção de gás na sonda MIP.



Após a montagem dos equipamentos, realizou-se os testes de funcionamento do sistema, conforme as recomendações do manual do fabricante (GEOPROBE, 2009). O sistema de circulação interno do gás de arraste foi ajustado para uma pressão média de 45 kPa, o que gerava um fluxo aproximado de 32 mL/min.

Para garantir a concentração de metano nos testes de resposta, realizou-se a verificação prévia da concentração no cilindro de biogás, conforme apresentado na **Foto 7**. A composição original de fábrica era de 2,5% de CH_4 , porém, a concentração medida no momento da aferição foi de 1,7% (v/v), sendo essa última adotada como referência para o experimento (amostra de controle). Um equipamento portátil de medição de biogás, modelo GEM-2000, devidamente calibrado, foi utilizado para esse procedimento.

Os testes de resposta foram executados com a injeção da amostra de controle diretamente sobre a membrana do MIP, por meio da estação de bombeamento e do dispositivo de controle de injeção, conforme apresentado na **Foto 8**. Esse dispositivo, adquirido do mesmo fabricante do MIP, consiste em um bloco de alumínio, dotado de ímãs na parte inferior e uma câmara interna, com um orifício lateral para a saída do gás. Por não ser um mecanismo estanque para

controle de pressão, os testes foram realizados apenas com a saturação da câmara interna do bloco de injeção, sem a aplicação de maiores pressões.

Os testes foram realizados com duas temperaturas diferentes de aquecimento da sonda, visando avaliar também a influência deste parâmetro no experimento. Primeiramente, realizou-se o teste com o sistema de aquecimento desligado, a 51 °C, e, posteriormente, com a temperatura padrão de operação, programada para 121 °C.

Após a injeção da amostra, por um tempo aproximado de 12 segundos, monitorava-se o tempo e a magnitude do sinal de resposta, basicamente do detector FID (sensível ao metano), por meio do *software* DI Acquisition (GEOPROBE, 2010). Os resultados foram visualizados em tempo real, e, posteriormente, foram tratados com o *software* DI Viewer (GEOPROBE, 2014).

Estes testes possibilitaram a avaliação qualitativa da sensibilidade do detector FID à amostra de biogás, tanto com a sonda aquecida, como sem aquecimento, e também a verificação do bom funcionamento do sistema para a posterior execução dos trabalhos de campo.

5.2 Elaboração das curvas de resposta do FID a diferentes misturas gasosas

Em setembro de 2016 foi realizado, nas dependências do IPT, o experimento de bancada para a elaboração das curvas de resposta do detector FID a diferentes misturas gasosas com metano. Esse experimento visou avaliar, de modo semiquantitativo, a capacidade de resposta do sistema às variações de composição e concentração das misturas, bem como à operação da sonda com e sem aquecimento.

Além dos materiais descritos no Item 5.1, foram utilizados também:

- Cilindro com gás metano de alta pureza (99,5%), com seu respectivo manômetro. Este gás foi considerado um material de referência para o experimento;
- Cilindro com gás dióxido de carbono de alta pureza (99,8%), com seu respectivo manômetro;
- *Bags* plásticos, com capacidade de 1 L, marca SKC, para realização das misturas de gases;
- Seringas descartáveis de 60 mL, com graduação de 1 mL; e

- Equipamento portátil de medição de biogás, modelo LFG 20, da marca ADC, devidamente ajustado;

Foram testadas, basicamente, duas composições de misturas gasosas, em diferentes proporções: CH₄ diluído em ar atmosférico (AR) e CH₄ diluído em CO₂. As diluições de CH₄ em AR foram realizadas, primeiramente, enchendo-se um *bag* plástico com CH₄ puro (considerado como o valor de referência de 100% de CH₄). Na sequência, com o auxílio das seringas plásticas, retirava-se uma alíquota do CH₄ do *bag* e completava-se o restante da seringa com AR nas proporções desejadas. Para as diluições de CH₄ em CO₂, encheu-se também um *bag* com o CO₂ puro, do qual retirava-se, com as seringas parcialmente preenchidas com CH₄, as alíquotas de CO₂ nas proporções desejadas (**Foto 9**). Algumas dessas misturas foram injetadas no equipamento portátil de medição de biogás para verificação dos teores pretendidos, o que garantiu maior confiabilidade ao experimento.

Após a montagem do MIP, realizou-se os testes de funcionamento do sistema, conforme as recomendações do manual do fabricante (GEOPROBE, 2009). O sistema de circulação interna do gás de arraste foi ajustado para uma pressão média de 39 kPa $\pm$ 1 kPa, o que gerava um fluxo aproximado de 29,0 mL/min $\pm$ 0,5 mL/min. O detector FID foi verificado por meio da injeção da amostra controle de biogás (cilindro Dräger), conforme o procedimento apresentado no Item 5.1.

A introdução das misturas gasosas na sonda MIP se deu por meio do acoplamento da seringa na entrada superior do bloco de injeção, onde realizava-se a injeção lentamente, por cerca de 10 segundos, permitindo um fluxo aproximadamente constante para o interior da câmara do dispositivo (**Foto 10**). Após toda a amostra ter sido injetada, removia-se rapidamente a seringa, puxava-se outro volume de ar limpo, e injetava-se rapidamente no bloco, de modo a evacuar toda a mistura gasosa e limpar a câmara. Na sequência, monitorava-se o tempo de resposta e a magnitude do sinal do detector FID, por meio do *software* DI Acquisition. Os demais detectores do MIP não foram monitorados.

Foto 9: Preparação das misturas gasosa.



Foto 10: Injeção das misturas gasosas na sonda MIP.



O primeiro ensaio (Ensaio 1) foi realizado com a sonda MIP na temperatura ambiente ($27,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), utilizando misturas de CH_4 diluído em AR nas proporções apresentadas na **Tabela 2**.

Tabela 2. Proporções das misturas de CH_4 diluído em AR.

Concentração de CH_4 (%)	Volume de CH_4 + Volume de AR (mL)	Volume total da amostra (mL)
100	60 mL + 0 mL	60
75	45 mL + 15 mL	60
50	30 mL + 30 mL	60
25	15 mL + 45 mL	60
10	6 mL + 54 mL	60
5	3 mL + 57 mL	60
0	0 mL + 60 mL	60

Os resultados obtidos (apresentados no Item 6.2) mostraram que a amostra de 100% de CH_4 (sem diluição) ultrapassava o limite de escala do detector FID, que é de 5000 mV, no módulo “sem atenuação”. Optou-se por não alterar o módulo de atenuação do sistema, visando aproveitar a sensibilidade máxima do detector e manter a padronização do experimento. Com base nisto, foi realizado um segundo ensaio (Ensaio 2), injetando volumes menores de amostra para verificar a resposta do detector, mantendo-se a concentração de 100% de CH_4 . Os volumes injetados foram: 50 mL, 10 mL e 5 mL.

Os resultados do segundo ensaio (apresentados no Item 6.2) mostraram que as amostras com volume maior ou igual a 10 mL de CH_4 puro também

ultrapassavam o limite de escala do FID, porém com os picos de resposta cada vez mais próximos ao limite, conforme diminuía-se o volume. Apenas a amostra de 5 mL não ultrapassou os 5000 mV.

A partir dos resultados anteriores, optou-se por realizar um terceiro ensaio (Ensaio 3), com as mesmas configurações do primeiro ensaio, porém injetando-se apenas 5 mL de cada uma das misturas apresentadas na **Tabela 2**. O tempo de injeção passou a ser de 5 segundos, em função do menor volume de amostra. Dessa forma, todos os resultados apresentaram-se dentro dos limites de escala adotados. Neste ensaio, optou-se também por realizar todas as injeções de amostras em duplicata, utilizando as opções de “Pré-Log” e “Post-Log” do *software* DI Acquisition.

Para os demais testes de resposta, padronizou-se a realização das injeções em duplicata e com volumes de 5 mL. O valor final considerado foi a média de cada duplicata.

O quarto ensaio (Ensaio 4) foi realizado de forma similar ao terceiro, porém as misturas foram preparadas diluindo-se o CH₄ em CO₂ nas seguintes proporções (%): 100/0; 75/25; 50/50; 25/75 e 0/100. Dessa forma, simulou-se a injeção de diferentes proporções de biogás, composto basicamente por CH₄ e CO₂.

O quinto e o sexto ensaio (Ensaio 5 e 6) utilizaram as mesmas misturas gasosas do terceiro e quarto ensaio, respectivamente. Porém, estes foram realizados com o dispositivo de aquecimento da sonda MIP ligado, cuja temperatura padrão estava programada para 121 °C. De fato, a temperatura da sonda oscilava em torno de 126 °C ± 8 °C, devido ao ciclo que funcionamento do termopar.

As informações sobre os ensaios realizados são sumarizadas na **Tabela 3**.

Tabela 3. Dados dos ensaios para a elaboração das curvas de resposta do detector FID.

Ensaio	Temperatura da sonda (°C)	Misturas gasosas	Proporção das misturas (% de CH ₄ / % do diluente)	Volume das amostras (mL)	Número de testes de resposta (injeções)
1	27,0 ± 0,2	CH ₄ + AR	100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 10/90; 5/95; 0/100	60	7
2		CH ₄ + AR	100/0	50;10; 5*	4
3		CH ₄ + AR	100/0*; 75/25*; 50/50*; 25/75*; 10/90*; 5/95*; 0/100*	5	14*
4		CH ₄ + CO ₂	100/0*; 75/25*; 50/50*; 25/75*; 0/100*	5	10*

Ensaio	Temperatura da sonda (°C)	Misturas gasosas	Proporção das misturas (% de CH ₄ / % do diluente)	Volume das amostras (mL)	Número de testes de resposta (injeções)
5	126 ± 8	CH ₄ + AR	100/0*; 75/25*; 50/50*; 25/75*; 10/90*; 5/95*; 0/100*	5	14*
6		CH ₄ + CO ₂	100/0*; 75/25*; 50/50*; 25/75*; 0/100*	5	10

* Testes de resposta realizados em duplicata.

Os resultados foram posteriormente tratados com o *software* DI Viewer e tabelados com o *software* Excel, da empresa Microsoft, possibilitando a obtenção dos coeficientes de correlação e a elaboração dos gráficos de dispersão com as “linhas de tendência” (reta de regressão linear), pelos quais foram obtidas as equações da reta e o coeficiente de determinação de cada ensaio.

Segundo INMETRO (2016) e Brito et al. (2003), uma série de parâmetros podem ser adotados para a avaliação do desempenho de um método analítico, a depender da finalidade (uso pretendido) e do tipo de ensaio (quali ou quantitativo). Um dos principais parâmetros é a sua linearidade, no qual avalia-se a capacidade de gerar resultados linearmente proporcionais à concentração dos analitos, em uma determinada faixa analítica e em determinadas condições de ensaio. Essa análise pode ser realizada pelo cálculo do coeficiente de correlação (R) ou por meio de um gráfico analítico, com o qual obtêm-se a equação de regressão linear (reta de regressão) e o coeficiente de determinação (R²) do ensaio.

O coeficiente de correlação (R), possibilita a demonstração da linearidade do ensaio, por meio da análise da relação entre os valores de “x” e “y”, ou seja, se a variação da resposta (y) está relacionada à variação de concentração do analito (x). Segundo Brito et al. (2003), essa análise pode ser feita da seguinte forma:

- R = 1 → Correlação perfeita
- 0,91 < R < 0,99 → Correlação fortíssima
- 0,61 < R < 0,91 → Correlação forte
- 0,31 < R < 0,60 → Correlação média
- 0,01 < R < 0,30 → Correlação fraca
- R = 0 → Correlação nula

Quanto à equação de regressão linear, é a reta que melhor explica os resultados medidos em função da concentração dos analitos, apresentada da seguinte forma:

$$y = a + bx \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

y = resposta medida (no presente estudo equivale ao pico do sinal elétrico do detector FID, em mV);

x = concentração do analitos de interesse (concentração de CH₄ nas misturas, em %);

a = intersecção com o eixo y, quando x = 0;

b = coeficiente angular da curva analítica = sensibilidade.

Dessa forma, quanto maior o valor de “b”, mais sensível o método nas condições avaliadas. Para avaliar o ajuste da reta aos dados, pode-se calcular também o coeficiente de determinação (R^2), que indicará, em percentagem, o quanto a reta consegue explicar os valores observados. Dessa forma, quanto mais próximo R^2 for de “1”, melhor a correlação da curva analítica obtida. A partir destes parâmetros, pode-se determinar também a faixa de linearidade, que corresponde à faixa de concentração do analito em que os resultados do método são linearmente proporcionais à concentração do analito (INMETRO, 2016).

Outros dois parâmetros fundamentais na avaliação de um método analítico são o Limite de Detecção (LD) e o Limite de Quantificação (LQ). O LD está relacionado à menor quantidade de analito na amostra que pode ser detectada, mas não necessariamente quantificada. Já o LQ corresponde à menor quantidade do analito que pode ser quantitativamente determinada com precisão e exatidão aceitáveis (INMETRO, 2016). Segundo o procedimento recomendado pela IUPAC (1997), o LD e o LQ podem ser calculados da seguinte forma:

$$LD = [X_{LD} - b] / a \quad (\text{Equação 2})$$

$$X_{LD} = X_{LB} + 3 S_{LB} \quad (\text{Equação 3})$$

$$LQ = [X_{LQ} - b] / a \quad (\text{Equação 4})$$

$$X_{LQ} = X_{LB} + 10 S_{LB} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

LD: limite de detecção (concentração de CH₄ nas misturas, em %);

LQ: limite de quantificação (concentração de CH₄ nas misturas, em %);

X_{LD}: parâmetro estatístico para o limite de detecção (mV);

X_{LQ} : parâmetro estatístico para o limite de quantificação (mV);

X_{LB} : média das medidas da linha base (mV);

S_{LB} : desvio padrão das medidas da linha base (mV);

a e b: idem à Equação 1;

Neste contexto, as curvas de resposta foram avaliadas em termos de sua linearidade, faixa de linearidade, sensibilidade, LQ e LD, nas condições ensaiadas.

5.3 Execução dos ensaios e amostragens em campo

Visando avaliar o potencial da sonda MIP, juntamente com outras ferramentas de investigação de alta resolução, para a caracterização geoambiental de áreas com ocorrência gás metano, determinou-se a execução de ensaios e amostragens com estas ferramentas em campo, em um terreno com histórico comprovado da presença de metano no subsolo. Conforme abordado no Capítulo 4, o local escolhido foi o Campus da USP Leste, no Município de São Paulo (SP).

Os levantamentos de campo foram realizados entre os dias 07 e 14 de dezembro de 2015, no local indicado na **Figura 11**. Os trabalhos compreenderam as seguintes etapas:

- 1) Execução de ensaios com a sonda MIP;
- 2) Execução de ensaios com o sistema SCOST;
- 3) Amostragens discretas de gases do solo com sistema PRT;
- 4) Execução de sondagens *direct push* para amostragem de solo; e
- 5) Medição dos níveis d'água subterrânea em PMs pré-existentes.

Os ensaios executados foram agrupados em “*Clusters*”, de forma que cada grupo representasse um mesmo “ponto” de investigação, possibilitando a comparação dos resultados. A localização dos *clusters* e a distribuição espacial dos ensaios são apresentadas na **Figura 12**.

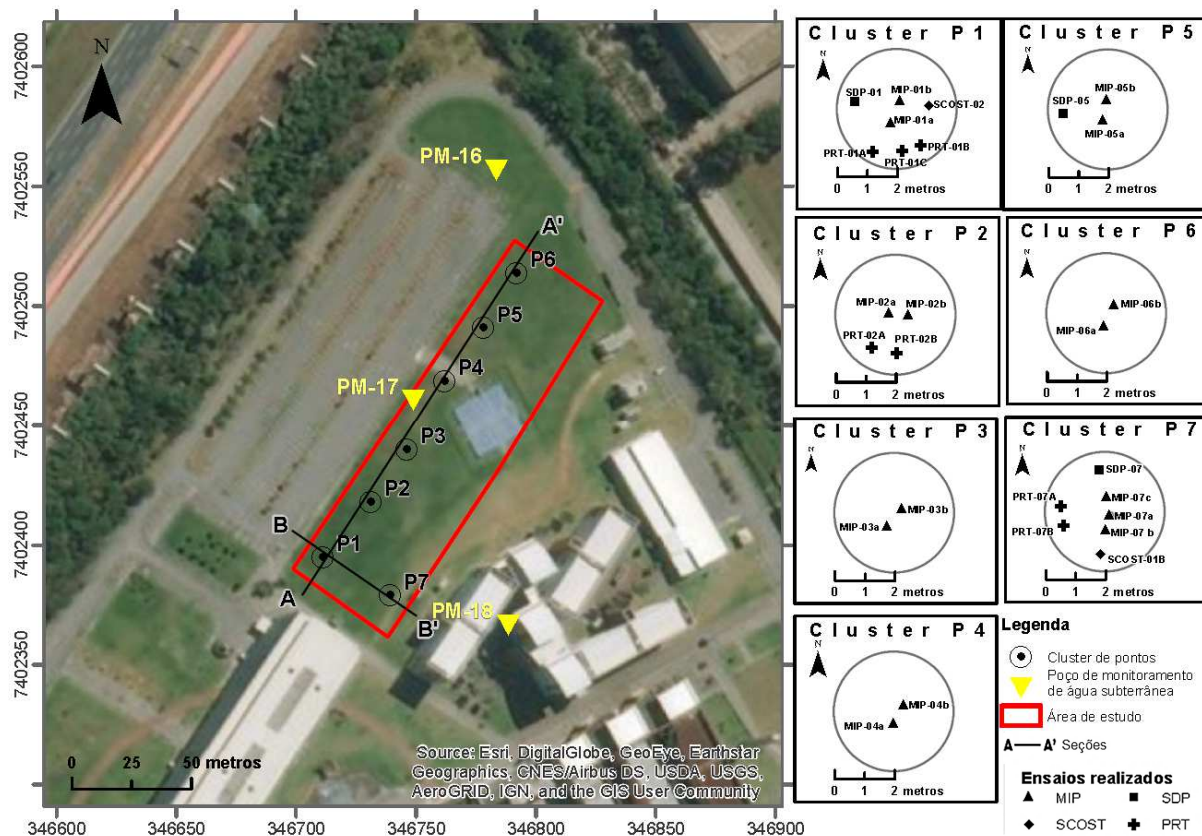


Figura 12. Localização dos pontos de investigação (*clusters*), com a distribuição espacial dos ensaios e amostragens executadas em cada um.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos esses procedimentos, os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Perfuratriz multifunção, da marca Geoprobe, modelo 6620DT (**Foto 11**);
- Acessórios (da marca Geoprobe) para a realização dos ensaios e sondagens: dispositivo de absorção de impacto (*drive cushion*), “cabeça de cravação” (*drive cap*), centralizador, hastes de cravação, etc.;
- Notebook de campo, marca Itautech, modelo Infoway W7410;
- Equipamento portátil de medição de biogás, da marca LANDTEC, modelo GEM-2000, devidamente calibrado (**Foto 12**);
- Veículo de apoio, do tipo Van, para transporte e armazenamento de equipamentos;
- Gerador elétrico a gasolina (potência de 6,5 kVA);
- Estabilizador, filtro de linha e extensão elétrica;
- Mesa de apoio dobrável e bancos;

- Caixas de ferramentas: kit eletricitista; kit de peças de reposição do MIP, ferramentas e chaves diversas (fenda, alicate, grifos, etc.);
- Materiais para limpeza das hastes: escovas de aço, esponjas, detergente não fosfatado, panos, balde;
- Materiais para tamponamento das sondagens: bentonita em pó, baldes, tubo de descida e funil;
- Trena de 50 m;
- GPS de mão, marca Garmin, modelo Montana 600; e
- Equipamentos de segurança diversos (cones, placa de sinalização, fita zebrada).

Foto 11: Perfuratriz multifunção Geoprobe.



Foto 12: Equipamento portátil para medição de biogás, modelo GEM-2000.



A seguir são descritos os materiais e métodos específicos para cada etapa.

5.3.1 Execução de ensaios com a sonda MIP

A sonda MIP é a principal ferramenta do presente estudo e foi aplicada com a finalidade de detectar e mapear a ocorrência de metano no subsolo, além de prover informações sobre a litologia da área de estudo, por meio do sensor de condutividade elétrica, fornecendo assim subsídios para a análise do comportamento do CH₄ na área de estudo.

Assim como nos itens 5.1 e 5.2, o sistema MIP utilizado foi disponibilizado pelo IPT e possui uma configuração padrão do fabricante. Além dos equipamentos

utilizados nos ensaios de bancada e aqueles mencionados no item 5.3, também foram utilizados em campo os seguintes componentes:

- Profundímetro (*string pot*) de 2,54 m de comprimento;
- Hastes de aço para cravação, com 1,22 m de comprimento e 38,1 mm D.E.; e
- Estante para suporte dos equipamentos do sistema MIP;

Os equipamentos foram transportados e montados na área de estudo com o apoio técnico de equipes do IPT e do Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC) da UNESP – Campus Rio Claro (**Fotos 13 e 14**).

Foto 13: Sonda MIP utilizada nos ensaios de campo.



Foto 14: Sistema MIP montado no interior do veículo VAN.



Previamente ao início dos ensaios, realizou-se a marcação dos locais de execução, de modo a compor 2 seções representativas da área de estudo, em formato de um “L”. Foram estabelecidos sete pontos de investigação (P1 a P7), com distância de 30 m entre cada um, medida por meio de trena. Esses locais foram devidamente georreferenciados com GPS de mão e posteriormente plotados em um sistema SIG, por meio do *software* ArcGIS, conforme apresentado na **Figura 12**.

Com o intuito de avaliar a resposta do sistema a diferentes condições de operação, realizou-se ao menos uma repetição do ensaio por local de execução,

totalizando 15 ensaios com a sonda MIP. As informações gerais da execução dos ensaios são apresentadas na **Tabela 4**.

Tabela 4. Informações gerais da execução dos ensaios com a sonda MIP.

Relação de ensaios executados	Data	Ponto de investigação	UTM-WGS84-E (m)	UTM-WGS84-S (m)	Temperatura média da sonda* (°C)	Profundidade final (m)
MIP-01a	08/12/15	P1	346710,8	7402394,6	25	10,93
MIP-01b			346711,2	7402395,4	114	10,88
MIP-02a		P2	346730,7	7402418,0	26	10,82
MIP-02b			346731,4	7402418,0	115	11,00
MIP-03a		P3	346745,7	7402439,7	27	10,93
MIP-03b			346746,2	7402440,3	114	10,94
MIP-04a	09/12/15	P4	346761,8	7402468,6	26	10,93
MIP-04b			346762,2	7402469,3	112	10,81
MIP-05a		P5	346777,9	7402490,7	28	11,03
MIP-05b			346778,0	7402491,4	111	10,81
MIP-06a		P6	346791,8	7402513,6	27	10,97
MIP-06b			346792,1	7402514,3	110	11,00
MIP-07a	10/12/15	P7	346738,9	7402379,0	25	11,03
MIP-07 b			346738,8	7402378,5	26	11,19
MIP-07c			346738,8	7402379,6	114	10,94

* Temperatura média da sonda MIP registrada ao longo do ensaio

O parâmetro de operação alternado, assim como nos ensaios de bancada, foi a temperatura do bloco de aquecimento da sonda, sendo o primeiro ensaio do ponto realizado sem aquecimento (temperatura ambiente – letra “a”), e o segundo, a uma distância aproximada de 70 cm do anterior, foi feito na temperatura de operação padrão, programada para 121 °C (letra “b”). Segundo o fabricante do MIP (GEOPROBE, 2009) e outros autores (COSTANZA et al., 2002; ADAMSON et al., 2014), a temperatura é um fator crucial no desempenho do sistema para a detecção de COVs. No entanto, tendo-se em vista que o composto de interesse do presente estudo, o metano, encontra-se naturalmente na forma gasosa na temperatura ambiente, buscou-se avaliar a influência da temperatura no desempenho do MIP para a detecção deste composto.

No ponto MIP-07, a primeira repetição (letra “b”), foi executada ainda na temperatura ambiente, trocando-se a membrana da sonda por uma membrana nova. Esse procedimento foi executado com o intuito de avaliar se o desgaste da membrana poderia influenciar nos resultados, conforme alertado por ASTM (2012).

Na sequência, realizou-se uma segunda repetição do ensaio MIP-07 (letra “c”), com a membrana nova e a sonda aquecida.

Antes do início e após a finalização de cada ensaio, foram realizados os testes de resposta dos detectores, conforme recomendações do fabricante (GEOPROBE, 2009). Os testes foram feitos por meio da injeção da amostra de controle de biogás (1,7% de CH_4) diretamente sobre a membrana (**Foto 15**), por um tempo aproximado de 15 segundos, pelo qual avaliava-se o tempo de resposta do sistema e a magnitude do sinal dos detectores (basicamente do FID) à amostra injetada. Para o teste do sensor de condutividade elétrica, utilizava-se um dispositivo de duplo dipolo, com condutividades elétricas padronizadas, sendo um lado composto pelo metal prata (condutividade “alta” = 290 mS/m) e outro composto de latão (condutividade “baixa” = 55 mS/m) (**Foto 16**). Esses testes possibilitaram a verificação do bom funcionamento do sistema.

Foto 15: Teste de resposta do detector FID à amostra de biogás.



Foto 16: Teste de resposta do sensor de condutividade elétrica.



O sistema de circulação interna do gás de arraste foi programado para uma pressão aproximada de 42 kPa, o que gerava um fluxo aproximado de 30 mL/min, um pouco abaixo do recomendado pelo fabricante (40 mL/min), com o intuito de aumentar a sensibilidade do sistema, conforme demonstrado por Adamson et al. (2014). A velocidade de cravação se manteve aproximadamente em 0,7 m/min, o que se mostrou suficiente para manter a temperatura da sonda acima dos 100 °C, conforme recomendações de ASTM (2012).

Foi registrada continuamente a resposta dos detectores FID, PID e XSD, além dos sensores EC, temperatura da sonda, taxa de cravação (ROP) e pressão do gás

de arraste (MIP *pressure*), por meio do *software* DI Acquisition. Os resultados foram visualizados em tempo real e, posteriormente, foram tratados com o *software* DI Viewer. Os perfis individuais de cada ensaio são apresentados no **Apêndice A**.

A profundidade média aproximada das cravações foi de 11 metros, limitada pela resistência à penetração dos materiais perfurados.

Após a finalização e retirada da ponteira de cada sondagem, leituras com o medidor portátil foram realizadas na boca dos furos para a avaliação qualitativa da presença de biogás. Após cada ensaio, procedeu-se à limpeza dos equipamentos e o deslocamento para o próximo ponto. Todos os furos foram devidamente tamponados após a finalização dos ensaios.

Adicionalmente, durante a realização dos ensaios, realizou-se a medição dos níveis d'água subterrânea (NAs) de PMs pré-existentes nas imediações, como uma informação complementar para auxiliar na interpretação dos resultados. Para essas medições, utilizou-se um medidor elétrico de NA, da marca Hidrosuprimentos, com fita métrica de 30 m de comprimento e escala milimétrica, disponibilizado pelo IPT. Todas as medidas foram tomadas a partir do nível do solo. Os poços medidos foram o PM-16, PM-17 e PM-18, conforme apresentado na **Figura 12**.

5.3.2 Execução de ensaios com o sistema SCOST

O sistema SCOST foi utilizado no estudo como uma técnica auxiliar, de modo a contribuir com a caracterização litoestratigráfica e a elaboração do modelo conceitual da área de estudo. O equipamento utilizado foi disponibilizado pelo LEBAC, da UNESP Campus Rio Claro, sendo um módulo complementar do equipamento UVOST (*Ultra-Violet Optical Screening Tool*), fabricado pela empresa Dakota Technologies. O sistema é composto por um osciloscópio digital, um módulo de emissão e detecção de ondas eletromagnéticas, um módulo de controle do sistema, uma caixa elétrica, um controle remoto de operação, cabeadamentos de fibra ótica e uma sonda de emissão e captação de luz (**Foto 17**).

Essa sonda possui diâmetro de 38 mm e comprimento aproximado de 40 cm (**Foto 18**), sendo equipada com um sistema interno de cabos de fibra ótica, contidos dentro de uma câmara de proteção a impactos, que alimentam um dispositivo de espelhos e uma janela de safira, conforme descrito no Item 3.3.1. A ponteira utilizada é equipada ainda com um sensor de condutividade elétrica.

Foto 17: Equipamento UVOST, com destaque para o módulo do SCOST.

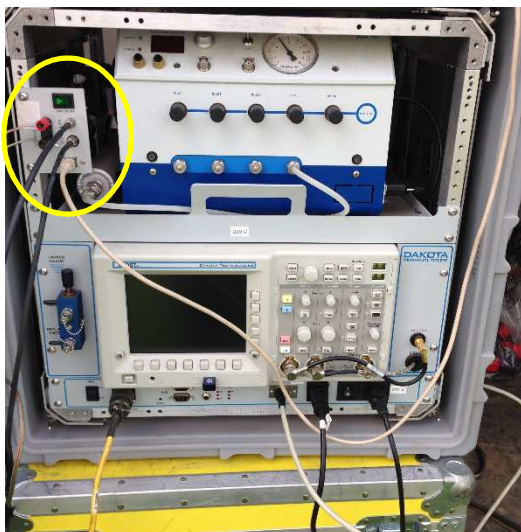


Foto 18: Ponteira utilizada nos ensaios com o sistema SCOST.



Os ensaios com o SCOST foram realizados após a finalização dos ensaios com o MIP. Além da relação citada no item 5.3, foram utilizados também os seguintes materiais e equipamentos:

- Estante para suporte do conjunto de hastes de cravação;
- *Kit* para testes de resposta do sistema SCOST: padrões de refletância certificada, tintas acrílicas com padrões de cores, dipolos com padrões de condutividade elétrica; e
- Tabela de Munsell (*Soil-Color Charts*).

Os locais de execução dos ensaios com o SCOST foram definidos a partir dos resultados da sonda MIP, buscando-se selecionar pontos representativos da área de estudo. Os pontos selecionados foram o P7 e o P1, onde foram realizados respectivamente os ensaios SCOST-01b e SCOST-02, conforme apresentado na **Figura 12**. Os ensaios com SCOST foram realizados a uma curta distância dos locais de cravação do MIP (aprox. 1,5 m), de modo a representar o mesmo perfil dos *clusters* selecionados. Esses pontos foram devidamente georreferenciados com GPS. As informações gerais da execução são apresentadas na **Tabela 5**.

Tabela 5. Informações da execução dos ensaios com o sistema SCOST.

Relação de Pontos Executados	Data	Ponto de investigação	UTM-WGS84-E (m)	UTM-WGS84-S (m)	Profundidade final (m)
SCOST-01b	10/12/15	P7	346738,6	7402377,7	10,02
SCOST-02		P1	346712,1	7402395,2	10,39

Antes de iniciar os ensaios, foram realizados os testes de resposta e a calibração do sistema SCOST, conforme as recomendações do fabricante (DAKOTA TECHNOLOGIES, 2012).

Durante os ensaios, a velocidade de cravação empregada foi de aproximadamente 2 cm/s. As profundidades atingidas foram de 10,02 m e 10,39 m, respectivamente, limitadas pela resistência dos materiais perfurados e visando prevenir danos ao equipamento.

Após a finalização e retirada da ponteira de cada sondagem, leituras com o medidor portátil foram realizadas na boca dos furos para a avaliação qualitativa da presença de biogás. Após cada ensaio, procedeu-se com a limpeza dos equipamentos e o deslocamento para o próximo ponto. Todos os furos foram devidamente tamponados após a finalização dos ensaios.

Os resultados foram processados e visualizados em tempo real, por meio do *software Optical Screening Tool PRO* (DAKOTA TECHNOLOGIES, 2013), e, posteriormente, foram comparados com a carta de cores da Tabela de Munsell (X-RITE, 2013) para a interpretação dos resultados. Esses perfis encontram-se apresentados individualmente no **Apêndice B**.

5.3.3 Amostragens discretas de gases do solo com sistema PRT

A amostragem discreta de gases do solo com o sistema PRT foi executada como uma técnica auxiliar no estudo, visando comparar os resultados do MIP com medições diretas dos gases presentes no subsolo.

O sistema PRT utilizado foi disponibilizado pelo IPT. Além da relação de materiais citada no item 5.3, foram utilizados também os seguintes materiais e equipamentos:

- Dispositivo PRT para amostragem de gases, com rosca para conexão em hastes de 31,75 mm de DE, e adaptador interno para conexão da mangueira de amostragem de 6,35 mm de DE (**Foto 19**);
- Hastes de aço para cravação, com 1,22 m de comprimento e 31,75 mm de D.E. (**Foto 19**);
- Rolo de 100 m de mangueira de polietileno de baixa densidade (PEBD), de 6,35 mm DE, para amostragem de gases;
- Ponteiros de cravação descartáveis de aço (**Foto 19**); e
- Mangueira de silicone de 6 mm de diâmetro interno.

Foto 19: Dispositivo PRT para amostragem de gases, fechado com a ponteira de cravação.



Foto 20: Ensaio de amostragem de gases do solo pelo sistema PRT.



Os locais e as profundidades de execução desses ensaios também foram definidos a partir dos resultados do MIP, visando avaliar se a presença de biogás, indicados pelos picos de resposta do detector FID, poderiam ser confirmados pelo método de amostragem PRT. Dessa forma, foram executados sete ensaios, em três locais de execução (P1, P2, P7), a uma curta distância dos locais de cravação da sonda MIP (aprox. 1,5 m), conforme apresentado na **Figura 12**. Esses pontos foram devidamente georreferenciados com GPS. As informações gerais da execução desses ensaios são apresentadas na **Tabela 6**.

Tabela 6. Informações da amostragem de gases do solo com o sistema PRT.

Relação de Pontos Executados	Data	Ponto de investigação	UTM-WGS84-E (m)	UTM-WGS84-S (m)	Profundidade ensaiada (m)
PRT-01A (1,2-1,5m)	11/12/15	P1	346711,3	7402393,7	1,20 - 1,50
PRT-01B (3,4-3,8m)			346711,9	7402393,9	3,40 - 3,80
PRT-01C (0,5-0,8m)	14/12/15		346710,3	7402393,6	0,50 - 0,90
PRT-02A (2,2-2,5m)	11/12/15	P2	346730,2	7402416,9	2,20 - 2,50
PRT-02B (3,35-3,65m)			346731,0	7402416,7	3,35 - 3,65
PRT-07A (1,7-2,0m)	11/12/15	P7	346737,3	7402379,3	1,70 - 2,00
PRT-07B (0,8-1,1m)			346737,4	7402378,6	0,80 - 1,10

O dispositivo de amostragem PRT, fechado, e acoplado às hastes de cravação, foi inserido no solo pelo método *Direct Push*, com o auxílio da perfuratriz multifunção. Após atingir a profundidade desejada, inseria-se a mangueira de amostragem (cortada em comprimentos adaptados a cada ensaio) por dentro das hastes de cravação e realizava-se a conexão com o amostrador. Em seguida, o conjunto era recuado em torno de 30 cm, promovendo a abertura do amostrador. Nesse momento, conectava-se o medidor portátil de biogás à mangueira de amostragem, de modo que a própria bomba de sucção do equipamento realizasse a amostragem do gás na profundidade escolhida (**Foto 20**).

Os parâmetros monitorados pelo medidor de biogás GEM-2000 foram: CH₄ (%); CO₂ (%); O₂ (%); Balance (N₂ + gases traço) (%); %LIE; CO (ppm); H₂S (ppm); e, pressão barométrica e pressão relativa de amostragem (mBar). Os resultados foram visualizados em tempo real e foram armazenados para tratamento posterior.

Após a finalização de cada sondagem, novas leituras foram realizadas na boca dos furos para a avaliação qualitativa da presença de biogás. Após a conclusão, realizava-se a limpeza dos equipamentos e o descarte do pedaço de mangueira usado, sendo um novo pedaço utilizado em cada ensaio. Todos os furos foram devidamente tamponados após a finalização.

5.3.4 Execução de sondagens *direct push* para amostragem de solo

As sondagens *direct push* (SDP) para a amostragem de solo foram realizadas como uma técnica auxiliar, visando a caracterização do perfil litológico da área de estudo e a obtenção de amostras para a realização de análises laboratoriais. Adicionalmente, realizou-se a comparação dos perfis das sondagens com as

informações obtidas pelos demais métodos utilizados, de modo a possibilitar uma melhor interpretação dos resultados.

O sistema SDP utilizado foi o *Dual Tube - DT* (Tubo Duplo), da marca Geoprobe, com diâmetros externos (DE) de 57,15 mm (DT22) e 82,55 mm (DT325). Os equipamentos utilizados foram disponibilizados pelo IPT e pelo LEBAC. Além da relação de materiais citada no item 5.3, foram utilizados também:

- Acessórios para SDP com sistema DT22: hastes externas de cravação de 57,15 mm DE e 1,22 m de comprimento, hastes centrais “*Light Weight*” de 31,75 mm DE e 1,22 m de comprimento; “*Cap* de cravação”, “retentor de *liner*”, e “sapata de cravação”;
- Acessórios para SDP com sistema DT325: hastes de cravação externas de 82,55 mm DE e 1,52 m de comprimento, “amostrador de aço” de 1,52 m de comprimento, hastes centrais de 31,75 mm DE e 1,52 m de comprimento; “cabeça de cravação” e centralizador; “retentor de *liner*”; “sapata de cravação”; e, “ponteira de cravação” para fechamento inferior;
- Amostradores descartáveis de PVC (*liners*) para o sistema DT22: de 35 mm DE e 1,22 m de comprimento, com retentor de amostra (*core catcher*);
- Amostradores descartáveis de PVC (*liners*) para o sistema DT325: de 50,2 mm DE e 1,52 m de comprimento, com retentor de amostra (*core catcher*);
- Tampas pretas e vermelhas para fechamento das extremidades dos *liners*, com os respectivos diâmetros;
- Extrator hidráulico de *liner* (acoplado à perfuratriz multifunção);

Os locais de execução das SDPs para amostragem de solo foram definidos a partir dos resultados da sonda MIP e do sistema SCOST, buscando-se selecionar pontos representativos da área de estudo. Dessa forma, foram executadas três sondagens por cravação contínua (SDP-01, SDP-05 e SDP-07), respectivamente nos *clusters* P1, P5 e P7, a uma curta distância (aproximadamente 1,5 m) dos locais onde foram executados os demais ensaios (**Foto 21**). Esses pontos foram georreferenciados com GPS de mão, cuja localização é apresentada na **Figura 12**. As informações da execução desses ensaios são apresentadas na **Tabela 7**.

Tabela 7. Informações gerais da amostragem de solo pelo método *direct push*.

Relação de pontos executados	Data	Ponto de investigação	UTM-WGS84-E (m)	UTM-WGS84-S (m)	Profundidade amostrada (m)
SDP-01	11 e 14/12/15	P1	346709,7	7402395,3	0,00 - 10,60
SDP-05	14/12/15	P5	346738,6	7402380,5	0,00 - 10,50
SDP-07	11 e 14/12/16	P7	346776,6	7402490,9	0,00 - 10,65

As sondagens SDP-01 e SDP-07 foram iniciadas com o sistema de amostragem DT22, sendo realizadas de modo contínuo até a profundidade aproximada de 9,5 m, quando se tornaram impenetráveis, devido a uma camada de areia grossa, cascalhos e seixos. Dessa forma, para conseguir uma amostragem que atingisse a camada de sedimentos paleogênicos da BSP (abaixo dos sedimentos quaternários), foram realizadas novas sondagens nesses pontos (distantes aproximadamente 0,5 m), utilizando o sistema SDP DT325.

Nessas novas sondagens, as perfurações foram iniciadas com as composições fechadas na parte inferior pela “ponteira de cravação”, até que atingissem a profundidade aproximada de 9,0 m. A partir daí, realizou-se a cravação do amostrador (cujo comprimento era de 60” ou 1,52 m), até a profundidade aproximada de 10,5 m, quando não foi mais possível prosseguir, devido à resistência dos materiais à perfuração (**Foto 22**). Na sondagem SDP-05, realizada na sequência, repetiu-se o mesmo procedimento, iniciando-se a amostragem com o sistema DT22, até aproximadamente 9,0 m, e prosseguindo com o sistema DT325, de 9,0 m até a profundidade de 10,5 m.

Foto 21: Execução de amostragem de solo pelo método *Direct Push*.**Foto 22:** Amostrador *liner* com presença de sedimentos paleogênicos da BSP.

Todos os *liners* foram devidamente identificados e encaminhados para o laboratório do LEBAC, no campus da UNESP em Rio Claro, para posterior abertura e coleta de amostras. Após a finalização e retirada dos amostradores de cada sondagem, leituras com o medidor portátil foram realizadas na boca dos furos para uma avaliação qualitativa da presença de biogás. Antes do deslocamento para o próximo ponto, procedia-se com a limpeza dos equipamentos. Todos os furos foram devidamente tamponados após a finalização dos ensaios.

5.4 Descrição tátil visual e coleta de amostras de solo para análises laboratoriais

Os *liners* obtidos nas sondagens *Direct Push* foram abertos em bancada para a realização das descrições tátil visual das amostras de solo e a definição dos perfis litoestratigráficos, além do registro fotográfico e coleta de amostras para caracterização geotécnica (**Fotos 23 e 24**). As atividades foram realizadas no LEBAC, no campus da UNESP em Rio Claro (SP), nos dias 21 de dezembro de 2015, 07 e 08 de janeiro de 2016.

Foto 23: Abertura dos *liners* em bancada de laboratório.



Foto 24: Descrição tátil visual e coleta de amostras de solo para caracterização geotécnica.



Os materiais utilizados foram os seguintes:

- Abridor de *liners*;
- Fita métrica, trena e régua, com escalas milimétricas;
- Espátulas, facas e pisseta;

- Sacos plásticos transparentes, sacos com fecho hermético (tipo *zip-lock*), etiquetas e canetas de marcação permanente; e
- Máquina fotográfica.

A descrição tátil visual seguiu, de forma simplificada, as diretrizes da NBR 15492 (ABNT, 2007), que se baseia na referência da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SANTOS et al., 2005).

Em função de problemas relacionados à recuperação incompleta dos testemunhos em alguns amostradores, realizou-se a comparação e correção dos perfis litológicos com base nos perfis de condutividade elétrica, gerados pelas sondas MIP e SCOST. Essas comparações serão apresentadas no Item 6.6.

A partir dos perfis corrigidos, foram elaborados os perfis geotécnicos para representação gráfica dos materiais amostrados, por meio do software AutoCad, com base na simbologia estabelecida pela NBR 13441 (ABNT, 1995). Os “Boletins de Sondagem”, contendo as informações de execução, as descrições litológicas e os perfis geotécnicos de cada sondagem, são apresentados individualmente no **Apêndice C**.

Com relação às amostras de solo para caracterização geotécnica, foram coletadas, ao todo, 111 amostras representativas das camadas identificadas nos perfis. Dessas, 70 foram encaminhadas para análises granulométricas no LEBAC-UNESP. Outras 41 amostras foram encaminhadas para análises dos demais parâmetros no LRAC-IPT. Os parâmetros selecionados, com as respectivas justificativas e as referências dos métodos utilizados, são relacionados abaixo:

- Granulometria: classificação textural dos materiais para balizar o perfil litoestratigráficos, comparando com os perfis dos demais métodos executados. Os ensaios foram realizados com base na metodologia da NBR 7181 (ABNT, 1984);
- Teor de matéria orgânica (MO) e fração de carbono orgânico (FCO): identificar possíveis camadas fonte para a geração de biogás. Os ensaios foram realizados com base na metodologia da NBR 13600 (ABNT, 1996) para MO, e nas referências de SILVA (2009) e NELSON; SOMMERS (1982) para FCO;

- pH e condutividade elétrica (CE): avaliar a ocorrência de ambientes favoráveis à metanogênese ou possíveis alterações hidrogeoquímicas. Comparação com os perfis dos demais métodos executados. Ambos os ensaios foram realizados com base na metodologia apresentada por Silva (2009).

A **Tabela 8** apresenta a relação de amostras selecionada em cada sondagem para análises granulométricas e a **Tabela 9** apresenta a relação de amostras enviadas para a análise dos demais parâmetros de caracterização geotécnica.

Os resultados obtidos foram tabelados e apresentados na forma de perfis, em função da profundidade das amostras.

Tabela 8. Amostras de solo enviadas para análise de granulometria.

Sondagem SPD-01	Sondagem SPD-05	Sondagem SPD-07
SDP-01-Gr (0,40 - 0,55m)	SDP-05-Gr (0,20 - 0,30m)	SDP-07-Gr (0,66 - 0,88m)
SDP-01-Gr (0,75 - 0,90m)	SDP-05-Gr (0,40 - 0,55m)	SDP-07-Gr (0,88 - 1,20m)
SDP-01-Gr (1,45 - 1,65m)	SDP-05-Gr (0,70 - 0,80m)	SDP-07-Gr (1,60 - 1,80m)
SDP-01-Gr (1,82 - 2,05m)	SDP-05-Gr (1,10 - 1,40m)	SDP-07-Gr (2,50 - 2,70m)
SDP-01-Gr (2,40 - 2,60m)	SDP-05-Gr (1,75 - 1,85m)	SDP-07-Gr (3,05 - 3,25m)
SDP-01-Gr (2,80 - 3,05m)	SDP-05-Gr (2,05 - 2,20m)	SDP-07-Gr (3,35 - 3,55m)
SDP-01-Gr (3,46 - 3,60m)	SDP-05-Gr (2,20 - 2,35m)	SDP-07-Gr (3,80 - 3,92m)
SDP-01-Gr (3,80 - 3,95m)	SDP-05-Gr (2,50 - 2,75m)	SDP-07-Gr (3,95 - 4,10m)
SDP-01-Gr (4,05 - 4,20m)	SDP-05-Gr (3,50 - 3,65m)	SDP-07-Gr (4,24 - 4,45m)
SDP-01-Gr (4,20 - 4,40m)	SDP-05-Gr (3,65 - 3,80m)	SDP-07-Gr (4,95 - 5,15m)
SDP-01-Gr (4,80 - 5,00m)	SDP-05-Gr (4,10 - 4,30m)	SDP-07-Gr (5,66 - 5,80m)
SDP-01-Gr (5,25 - 5,45m)	SDP-05-Gr (4,65 - 4,85m)	SDP-07-Gr (6,60 - 6,80m)
SDP-01-Gr (5,75 - 6,00m)	SDP-05-Gr (5,10 - 5,30m)	SDP-07-Gr (7,55 - 7,80m)
SDP-01-Gr (6,25 - 6,40m)	SDP-05-MO (5,45 - 5,70m)	SDP-07-Gr (8,00 - 8,25m)
SDP-01-Gr (6,50 - 6,70m)	SDP-05-Gr (5,70 - 5,80m)	SDP-07-Gr (8,50 - 8,65m)
SDP-01-Gr (7,75 - 7,80m)	SDP-05-Gr (6,70 - 6,90m)	SDP-07-Gr (8,85 - 9,00m)
SDP-01-Gr (8,20 - 8,40m)	SDP-05-MO (7,00 - 7,20m)	SDP-07-Gr (9,50 - 9,70m)
SDP-01-Gr (8,80 - 9,00m)	SDP-05-Gr (7,20 - 7,35m)	SDP-07-Gr (10,05 - 10,20m)
SDP-01-Gr (9,30 - 9,50m)	SDP-05-Gr (7,35 - 7,50m)	SDP-07-Gr (10,55 - 10,65m)
SDP-01-Gr (9,60 - 9,73m)	SDP-05-Gr (7,70 - 7,80m)	TOTAL = 19 AMOSTRAS
SDP-01-Gr (9,73 - 9,88m)	SDP-05-MO (7,80 - 8,10m)	
SDP-01-Gr (10,30 - 10,40m)	SDP-05-Gr (8,90 - 9,05m)	
SDP-01-Gr (10,45 - 10,60m)	SDP-05-Gr (9,05 - 9,20m)	
TOTAL = 23 AMOSTRAS	SDP-05-Gr (9,50 - 9,65m)	
	SDP-05-Gr (9,90 - 10,00m)	
	SDP-05-MO (10,00 - 10,20m)	
	SDP-05-Gr (10,20 - 10,30m)	
	SDP-05-MO (10,50m)	
	TOTAL = 28 AMOSTRAS	

Tabela 9. Amostras de solo enviadas para análise de MO, FCO, pH e CE.

Sondagem SPD-01	Sondagem SPD-05	Sondagem SPD-07
SDP-01-MO (0,55 - 0,65m)	SDP-05-MO (0,55 - 0,65m)	SDP-07-MO (1,20 - 1,35m)
SDP-01-MO (1,10 - 1,35m)	SDP-05-MO (0,90 - 1,10m)	SDP-07-MO (1,35 - 1,55m)
SDP-01-MO (2,05 - 2,25m)	SDP-05-MO (2,75 - 3,00m)	SDP-07-MO (1,90 - 2,30m)
SDP-01-MO (3,20 - 3,40m)	SDP-05-MO (3,30 - 3,50m)	SDP-07-MO (2,80 - 3,05m)
SDP-01-MO (3,60 - 3,80m)	SDP-05-MO (3,90 - 4,10m)	SDP-07-MO (3,60 - 3,80m)
SDP-01-MO (4,55 - 4,75m)	SDP-05-MO (4,85 - 4,97m)	SDP-07-MO (4,10 - 4,24m)
SDP-01-MO (5,00 - 5,15m)	SDP-05-MO (5,45 - 5,70m)	SDP-07-MO (5,15 - 5,45m)
SDP-01-MO (5,50 - 5,75m)	SDP-05-MO (7,00 - 7,20m)	SDP-07-MO (5,80 - 6,00m)
SDP-01-MO (6,10 - 6,25m)	SDP-05-MO (7,80 - 8,10m)	SDP-07-MO (6,30 - 6,60m)
SDP-01-MO (6,70 - 7,00m)	SDP-05-MO (9,20 - 9,40m)	SDP-07-MO (7,35 - 7,55m)
SDP-01-MO (7,40 - 7,65m)	SDP-05-MO (10,00 - 10,20m)	SDP-07-MO (8,25 - 8,40m)
SDP-01-MO (8,50 - 8,75m)	SDP-05-MO (10,50m)	SDP-07-MO (8,65 - 8,85m)
SDP-01-MO (9,15 - 9,30m)	TOTAL=12 AMOSTRAS	SDP-07-MO (9,70 - 9,90m)
SDP-01-MO (9,50 - 9,60m)		SDP-07-MO (10,30 - 10,45m)
SDP-01-MO (10,20 - 10,30m)		TOTAL = 14 AMOSTRAS
TOTAL = 15 AMOSTRAS		

5.5 Processamento e apresentação dos dados

Os resultados dos ensaios com a sonda MIP foram tratados por meio dos *softwares* DI Viewer e Excel, tanto para montagem dos perfis e seções representativas do subsolo, como para a análise dos dados. Diferentes combinações de perfis foram confrontadas e/ou sobrepostas, possibilitando assim uma análise interpretativa e a discussão dos resultados. Esses ensaios foram comparados ainda com os perfis obtidos pelas demais técnicas, como os perfis de cores e condutividade elétrica do solo, obtidos nos ensaios com o sistema SCOST.

Além da comparação com os resultados da sonda MIP, os perfis de cores do sistema SCOST foram confrontados com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, como o teor de MO, FCO e granulometria, visando auxiliar na caracterização litoestratigráfica e na identificação de possíveis camadas geradoras de metano.

Os resultados da amostragem de gases do solo com sistema PRT foram tabelados e transformados em gráficos, que foram confrontados com os resultados da sonda MIP. Dessa forma, pode-se verificar a presença de metano nas camadas

indicadas pelo detector FID, bem como analisar o comportamento do biogás, em função das mudanças de composição, nas diferentes profundidades amostradas.

Os perfis geotécnicos, obtidos pelas descrições tátil-visuais, foram comparados com os resultados obtidos pelas análises granulométricas e com os perfis de condutividade elétrica da sonda MIP, subsidiando a definição da litoestratigrafia e uma análise das possíveis limitações associadas à amostragem de solo pelo método *Direct Push*. Quanto às análises laboratoriais de solo, os resultados foram tabelados e apresentados na forma de perfis, em função da profundidade das amostras.

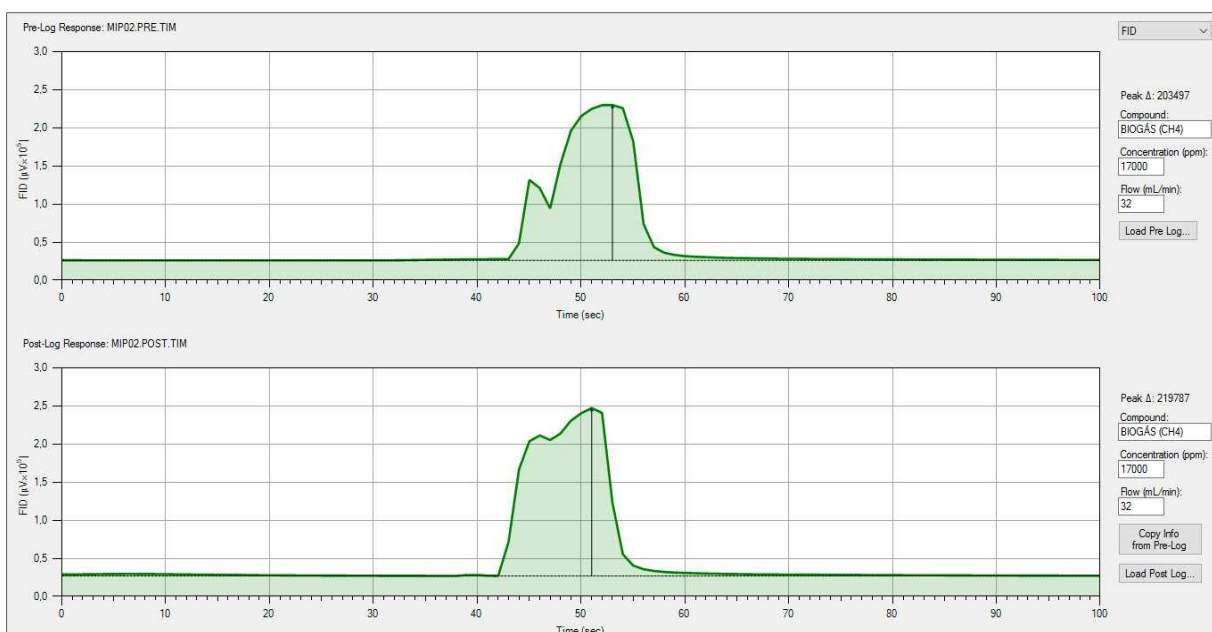
Por fim, a integração e análise dos dados obtidos, bem como a comparação com outros estudos anteriormente executados no local, subsidiou a elaboração de um modelo conceitual do comportamento do metano na área de estudo. Essa metodologia possibilitou avaliar a contribuição das técnicas de investigação de alta resolução utilizadas para a caracterização geoambiental do comportamento do metano no subsolo, com enfoque para a questão das áreas de várzea afetadas por atividades antrópicas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Ensaios preliminares

A seguir é apresentado o resultado dos ensaios preliminares, com os gráficos de resposta do detector FID (**Figura 13**), tanto com a sonda na temperatura de 51 °C, como na temperatura padrão de operação, por volta de 121 °C.

Figura 13. Gráficos de resposta do detector FID com a sonda MIP a 51 °C (acima) e a 121 °C (abaixo).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de resposta ao biogás foi de aproximadamente 42 segundos. Os sinais de resposta do detector FID variaram de uma linha de base (LB) aproximada de 28 mV, para um pico de 230 mV, com a sonda a 51 °C, e, para um pico de 247 mV, com a sonda a 121 °C, indicando uma sensibilidade maior do sistema na temperatura mais alta, o que era esperado, segundo ASTM (2012). Pode-se observar também o rápido declínio no sinal de resposta, em um intervalo aproximado de 5 segundos, confirmando a premissa de que o biogás é rapidamente purgado do sistema, minimizando o efeito de prolongamento do sinal (*carry-over*). Os demais sensores do MIP não se mostraram sensíveis ao biogás.

Esses resultados permitiram a validação do arranjo experimental pretendido, pois o detector FID se mostrou sensível à injeção da amostra padrão de biogás, com 1,7% de metano, em ambas as temperaturas de aquecimento da sonda testadas. Os testes certificaram ainda o bom funcionamento do sistema para a posterior execução dos trabalhos de campo.

6.2 Curvas de resposta do detector FID a diferentes misturas gasosas

Neste item são apresentados os resultados e a análise dos dados obtidos nos ensaios para a elaboração das curvas de resposta do detector FID.

Nos testes de verificação inicial, realizados com a injeção da amostra de controle (biogás com 1,7% de CH₄), o tempo de resposta foi de aproximadamente 47 segundos, para uma pressão do sistema de 39 kPa, o que gerava um fluxo aproximado do gás de arraste de 29 mL/min. Com a sonda na temperatura ambiente (27,0 °C ± 0,2 °C), o sinal de resposta do detector FID variou de uma linha de base média (LBM) de 168 mV, para um pico de 288 mV, enquanto que com o aquecimento da sonda ligado (126 °C ± 8 °C), o sinal variou de 175 mV, para um pico de 299 mV. Esses valores da LBM acima do padrão normal do FID (que é de aproximadamente 25 ± 5 mV) foram associados à possível contaminação residual (traços) remanescente no sistema, que, provavelmente, não foi suficientemente purgado antes da realização dos ensaios. Apesar disso, a capacidade de detecção não foi afetada para o nível de concentração analisado, sendo considerada aceitável para os ensaios pretendidos.

A resposta do detector FID foi considerada como a diferença entre o valor do pico de sinal, menos o valor da LBM de cada teste de resposta. Os resultados foram tabelados, a partir dos quais foram elaborados os gráficos analíticos e realizadas as análises pretendidas, conforme os critérios apresentados no Item 5.2.

6.2.1 Ensaio 1

O primeiro ensaio foi realizado com a sonda MIP na temperatura ambiente, utilizando volumes de 60 mL para misturas de CH₄ diluído em ar atmosférico (AR). Os resultados são apresentados na **Tabela 10** e no gráfico analítico da **Figura 14**.

Tabela 10. Resultados do Ensaio 1 para elaboração da curva de resposta.

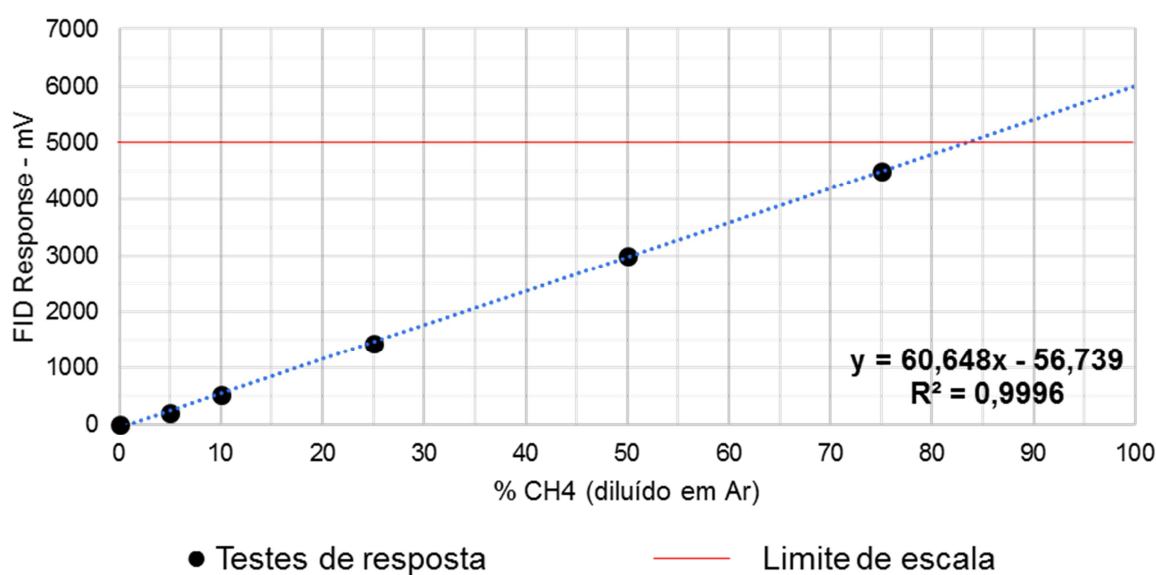
Concentração de CH ₄ (%)	Pico de sinal do FID (mV)	Linha de Base Média do FID (mV)	Resposta do FID (mV)
100	>5000	170	>4830
75	4662	171	4490
50	3165	170	2996
25	1609	169	1450
10	695	170	526
5	383	168	215
0	NA	169	0
Máximo		171	>4830
Mínimo		168	0
Média		170	NA
Desvio Padrão		0,976	NA

Observação: Resultados obtidos em μV e arredondados para a unidade mV.

NA = não aplicável

Figura 14. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 1.

Ensaio 1: CH₄ + AR / Vol. = 60 mL / Temp. = 27 °C



Fonte: Elaborado pelo autor.

A linha de base média dos testes de resposta variou entre 168 e 171 mV. A equação da reta obtida foi $y = 60,648x - 56,739$, com $R^2 = 99,96\%$, o que demonstra a correlação quase absoluta entre a resposta do FID e a concentração de CH₄ das misturas. O ponto equivalente à concentração de 100% de CH₄ não pode ser plotado, pois ultrapassou o limite de escala do sistema (conforme justificado no Item 5.2). Porém, considerando a equação da reta obtida, esse ponto apresentaria uma resposta de 6008 mV.

O coeficiente de correlação (R) obtido foi de 0,9998, considerada uma correlação fortíssima, tendendo a perfeita ($> 0,99$), segundo o critério apresentado por Brito et al. (2003). Dessa forma, a resposta do detector FID, para as condições do primeiro ensaio, podem ser consideradas lineares no intervalo avaliado (entre 0% e 75% de CH_4).

O LD e o LQ calculados foram de 3,78 % e 3,89 % de CH_4 , respectivamente.

6.2.2 Ensaio 2

O segundo ensaio foi realizado nas mesmas condições de operação do primeiro, porém, com diferentes volumes de injeção da mistura padrão de 100% de CH_4 . Os resultados são apresentados na **Tabela 11**. Neste ensaio não foi possível elaborar o gráfico analítico e não foram analisados os parâmetros de desempenho.

Tabela 11. Resultados do Ensaio 2 para elaboração da curva de resposta.

Volume de injeção (mL)	Pico de sinal do FID (mV)	Linha de Base do FID (mV)	Resposta do FID (mV)	Média das respostas do FID (mV)
50	>5000	188	>4812	NA
10	>5000	168	>4832	NA
5*	3926	169	3757	3762
	3940	173	3767	

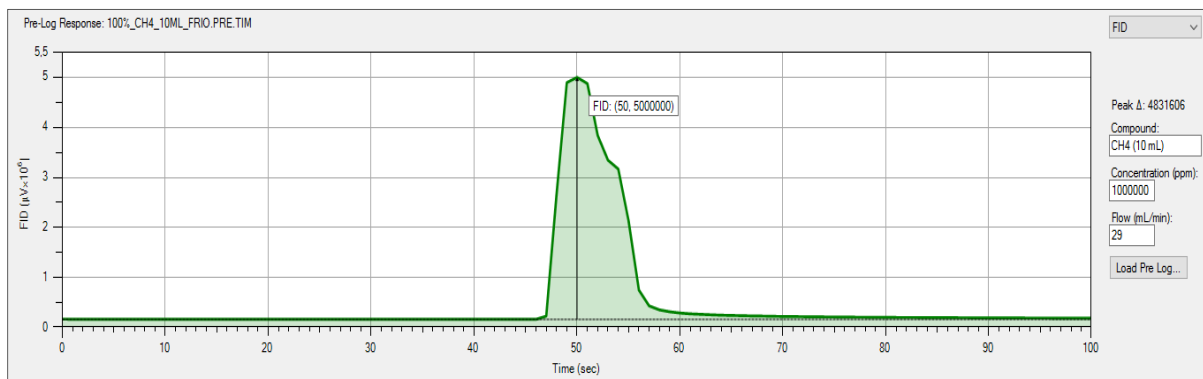
Observação: Resultados obtidos em μV e arredondados para a unidade mV. NA = não aplicável.

*teste realizado em duplicata

Os resultados mostram que os testes de resposta realizados com volumes de 50 mL e 10 mL (além do teste com 60 mL, apresentado no Ensaio 1) ultrapassam o limite de escala do sistema (5000 mV). Porém, no teste de 10 mL, o pico de sinal do FID ficou muito próximo a esse limite, por volta do tempo de 50 segundos, conforme apresentado na **Figura 15**.

Com base nesses resultados, pode-se avaliar qualitativamente, que o sistema é mais sensível para maiores volumes de amostra, apresentando sinais de resposta mais altos (sinal para 60 mL $>$ sinal para 10 mL $>$ sinal para 5 mL), mesmo com todas as misturas na mesma concentração de CH_4 (100%).

Figura 15. Teste de resposta para 10 mL de mistura gasosa com 100% de CH₄, realizado no Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.3 Ensaio 3

O terceiro ensaio foi realizado nas mesmas condições de operação do primeiro, porém, utilizando volumes de 5 mL para as misturas de CH₄ diluído em AR, com injeções em duplicata. Os resultados são apresentados na **Tabela 12** e no gráfico da **Figura 16**.

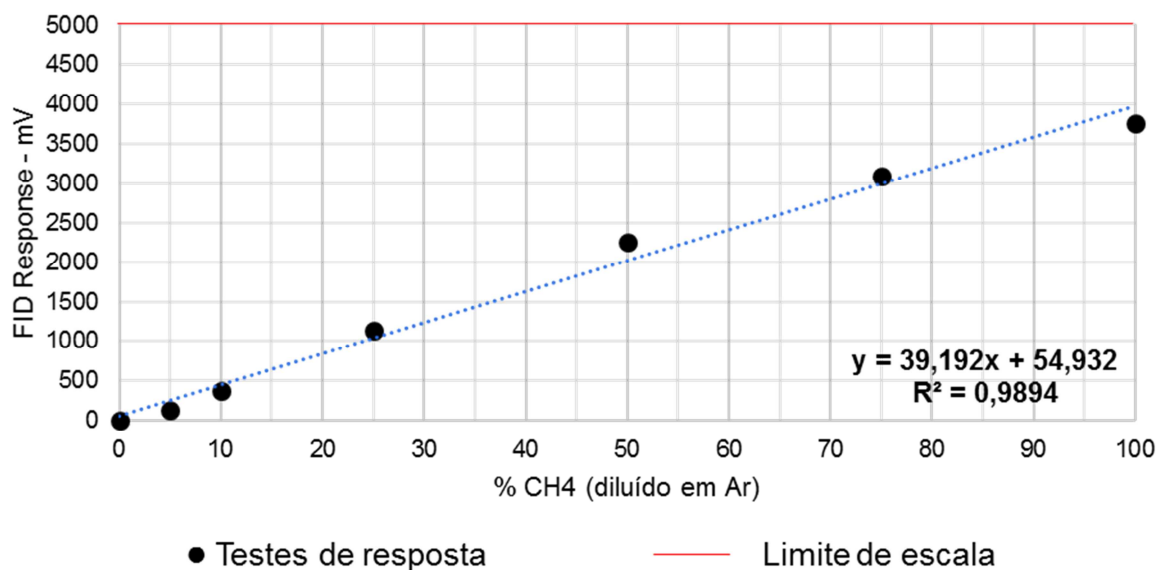
Tabela 12. Resultados do Ensaio 3 para elaboração da curva de resposta.

Concentração de CH ₄ (%)	Pico de sinal do FID (mV)	Linha de Base do FID (mV)	Resposta do FID (mV)	Média das respostas do FID (mV)
100	3926	169	3757	3762
	3940	173	3767	
75	3284	169	3115	3098
	3252	171	3082	
50	2450	174	2276	2256
	2409	173	2237	
25	1294	171	1123	1138
	1324	170	1154	
10	550	169	381	378
	545	170	375	
5	304	169	135	137
	307	169	138	
0	NA	174	0	0
	NA	174	0	
Máximo		174	3767	-
Mínimo		169	0	-
Média		171	NA	-
Desvio Padrão		2,093	NA	-

Observação: Resultados obtidos em μV e arredondados para a unidade mV. NA = não aplicável.

Figura 16. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 3.

Ensaio 3: CH₄ + AR/ Vol. = 5 mL / Temp. = 27 °C



Fonte: Elaborado pelo autor.

A linha de base média dos testes de resposta variou entre 169 e 174 mV. A equação da reta obtida foi: $y = 39,192x + 54,932$, com $R^2 = 98,94\%$, indicando novamente alta correlação entre a resposta do FID e a concentração de CH₄ das misturas. Porém o sistema mostrou-se menos sensível às misturas de 5 mL, em relação às misturas de 60 mL ($b_{\text{ensaio1}} \approx 61 > b_{\text{ensaio3}} \approx 39$), corroborando com a constatação obtida no segundo ensaio.

O coeficiente R foi de 0,9947, novamente considerado uma correlação fortíssima, tendendo a perfeita, segundo o critério apresentado por Brito et al. (2003). Dessa forma, a resposta do detector FID, para as condições do Ensaio 3, podem ser consideradas lineares no intervalo avaliado (entre 0% e 100% de CH₄).

O LD e o LQ calculados foram de 3,12 % e 3,50 % de CH₄, respectivamente.

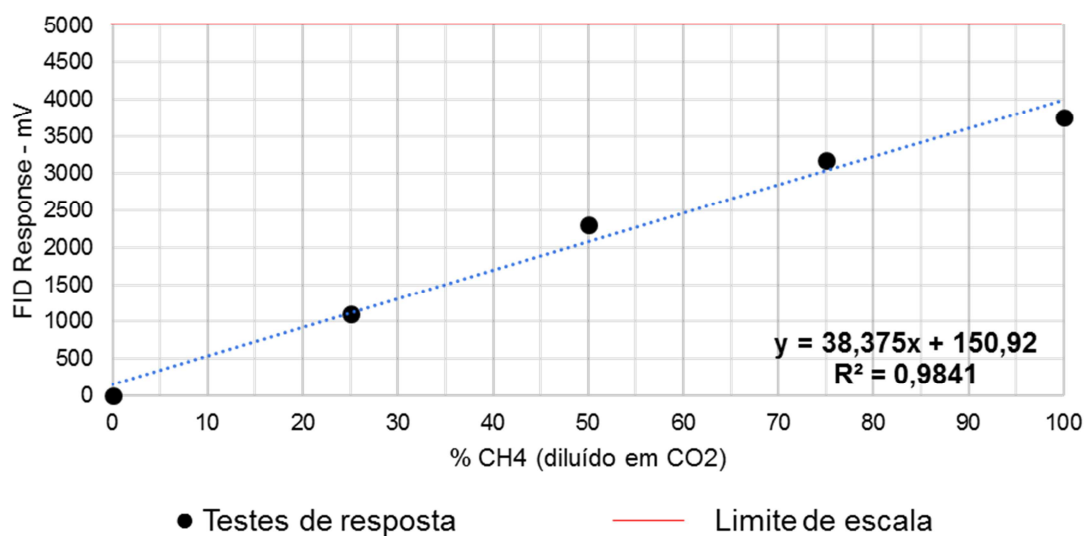
6.2.4 Ensaio 4

O quarto ensaio foi realizado nas mesmas condições de operação dos anteriores, porém, utilizando misturas de CH₄ diluído em dióxido de carbono (CO₂). Os testes de resposta foram feitos com a injeção de 5 mL de cada mistura. Os resultados são apresentados na **Tabela 13** e no gráfico da **Figura 17**.

Tabela 13. Resultados do Ensaio 4 para elaboração da curva de resposta.

Concentração de CH ₄ (%)	Pico de sinal do FID (mV)	Linha de Base do FID (mV)	Resposta do FID (mV)	Média das respostas do FID (mV)
100	3925,9	169,1	3756,8	3761,9
	3939,9	172,8	3767,1	
75	3400,3	173,5	3226,8	3178,6
	3310,0	179,5	3130,5	
50	2483,4	177,4	2306,0	2299,5
	2470,4	177,5	2292,9	
25	1280,3	175,8	1104,5	1107,6
	1287,4	176,7	1110,7	
0	NA	175,3	0,0	0,6
	176,1	174,9	1,2	
Máximo		179,5	3767,1	-
Mínimo		169,1	0,0	-
Média		175,3	NA	-
Desvio Padrão		2,913	NA	-

Observação: Resultados obtidos em μV e arredondados para a unidade mV. NA = não aplicável.

Figura 17. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 4.**Ensaio 4: CH₄ + CO₂ / Vol. = 5 mL/ Temp. = 27 °C**

Fonte: Elaborado pelo autor.

A linha de base média dos testes de resposta variou entre 169 e 179 mV. A equação da reta obtida foi: $y = 38,375x + 150,92$, com $R^2 = 98,41\%$, indicando novamente alta correlação entre a resposta do FID e a concentração de CH₄ das misturas. O sistema mostrou pouca diferença de sensibilidade em relação às misturas de 5 mL de CH₄ e AR ($(b_{\text{ensaio3}} - b_{\text{ensaio4}}) < 1$).

No teste de injeção da mistura de 100% de CO₂ (0% CH₄), a replica apresentou uma pequena elevação do sinal do FID (1,2 mV), indicando uma possível influência, porém pequena, sobre a resposta do detector.

O coeficiente R obtido foi de 0,992, novamente considerada uma correlação fortíssima, tendendo a perfeita, segundo o critério apresentado por Brito et al. (2003). Dessa forma, a resposta do detector FID, para as condições do Ensaio 4, podem ser consideradas lineares no intervalo avaliado (entre 0% e 100% de CH₄).

O LD e o LQ calculados foram de 0,86 % e 1,39 % de CH₄, respectivamente.

6.2.5 Ensaio 5

O quinto ensaio foi realizado com a sonda aquecida, cuja temperatura oscilou em torno de 126 °C ± 8 °C, utilizando volumes de 5 mL para misturas de CH₄ diluído em AR. Os resultados são apresentados na **Tabela 14** e no gráfico da **Figura 18**.

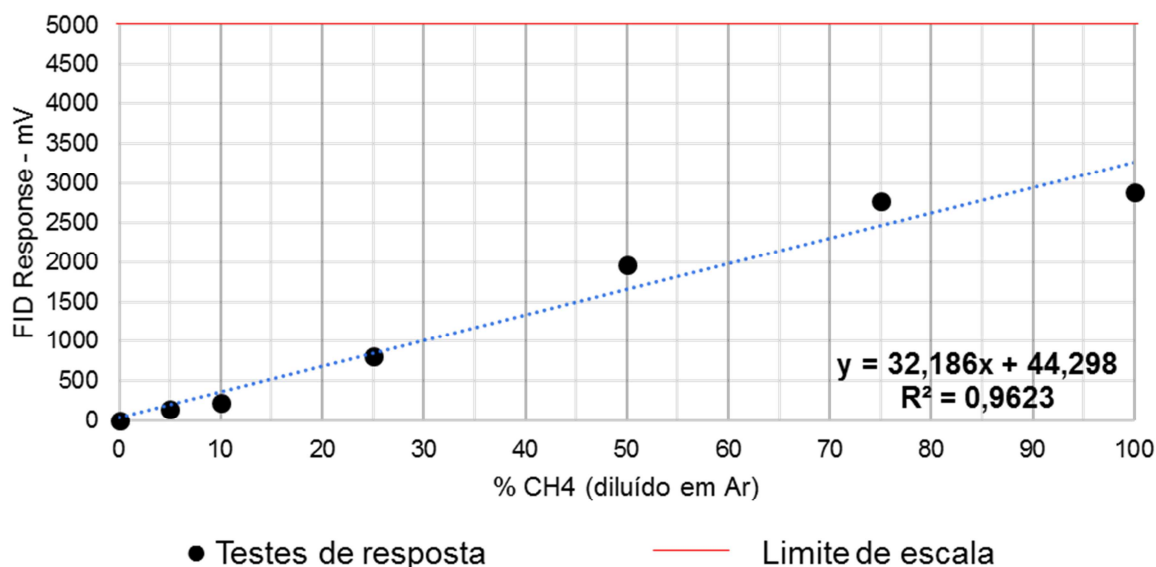
Tabela 14. Resultados do Ensaio 5 para elaboração da curva de resposta.

Concentração de CH ₄ (%)	Pico de sinal do FID (mV)	Linha de Base do FID (mV)	Resposta do FID (mV)	Média das respostas do FID (mV)
100	3083	180	2903	2892
	3060	180	2880	
75	2991	177	2814	2775
	2913	177	2736	
50	2112	177	1935	1967
	2175	177	1998	
25	974	175	799	821
	1018	175	843	
10	417	175	243	235
	402	175	227	
5	323	175	149	150
	326	174	152	
0	NA	175	0	0
	NA	175	0	
Máximo		180	2903	-
Mínimo		174	0	-
Média		176	NA	-
Desvio Padrão		1,888	NA	-

Observação: Resultados obtidos em µV e arredondados para a unidade mV. NA = não aplicável.

Figura 18. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 5.

Ensaio 5: CH₄ + AR / Vol. = 5 mL / Temp. = 126 °C



Fonte: Elaborado pelo autor.

A linha de base média dos testes de resposta variou entre 174 e 180 mV. A equação da reta obtida foi: $y = 32,186x + 44,298$, com $R^2 = 96,23\%$, indicando novamente alta correlação entre a resposta do FID e a concentração de CH₄ das misturas, porém com uma perda de 2,7% em relação ao Ensaio 3, principalmente para a amostra de 100% de CH₄. O sistema mostrou-se menos sensível em relação aos Ensaios 3 e 4 ($b_{\text{ensaio5}} \approx 32 < b_{\text{ensaio4}} \approx 38 < b_{\text{ensaio3}} \approx 39$).

O coeficiente R obtido foi de 0,9809, novamente considerado como fortíssimo, segundo o critério apresentado por Brito et al. (2003). Porém, devido à defasagem de resposta no teste com 100% de CH₄, a resposta do detector FID foi considerada linear apenas no intervalo de 0% a 75% de CH₄, para as condições do Ensaio 5.

O LD e o LQ calculados foram de 4,27 % e 4,69 % de CH₄, respectivamente.

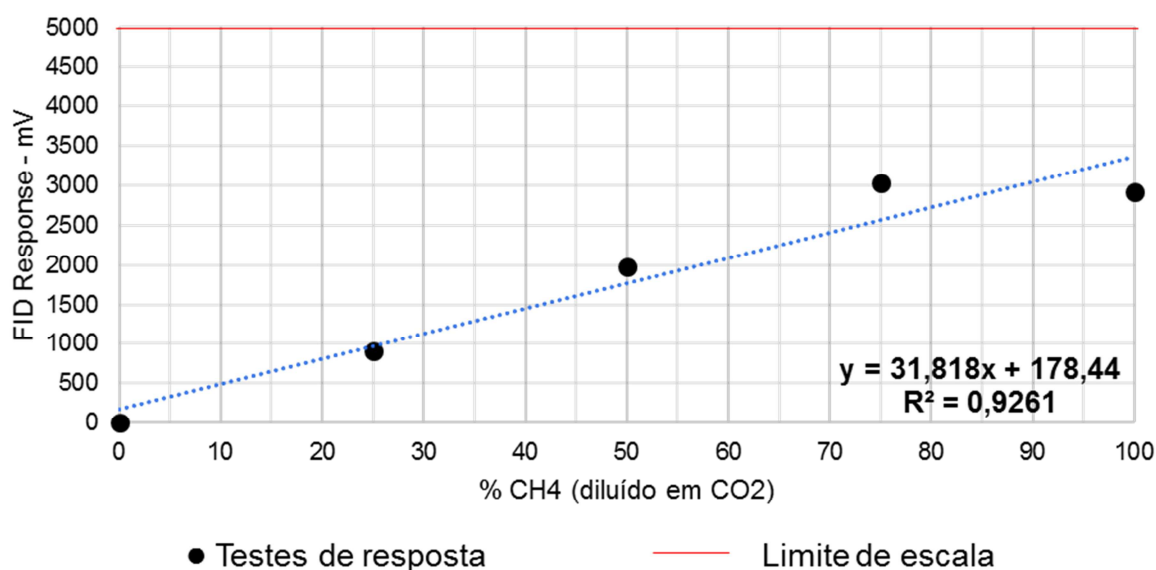
6.2.6 Ensaio 6

O sexto ensaio foi realizado nas mesmas condições de operação do quinto, porém, utilizando volumes de 5 mL para misturas de CH₄ diluído em CO₂. Os resultados são apresentados na **Tabela 15** e no gráfico da **Figura 19**.

Tabela 15. Resultados do Ensaio 6 para elaboração da curva de resposta.

Concentração do CH ₄ (%)	Pico de sinal do FID (mV)	Linha de Base do FID (mV)	Resposta do FID (mV)	Média das respostas do FID (mV)
100	3063,7	175,6	2888,0	2914,3
	3116,3	175,8	2940,5	
75	3182,8	174,2	3008,6	3037,7
	3242,6	175,9	3066,7	
50	2187,3	177,4	2009,9	1986,1
	2138,1	175,8	1962,4	
25	1061,8	176,7	885,1	905,9
	1103,1	176,3	926,8	
0	178,7	176,6	2,2	2,8
	178,2	174,7	3,5	
Máximo		177,4	3066,7	-
Mínimo		174,2	2,2	-
Média		175,9	NA	-
Desvio Padrão		0,951	NA	-

Observação: Resultados obtidos em μV e arredondados para a unidade mV.

Figura 19. Gráfico analítico com os resultados do Ensaio 6.**Ensaio 6: CH₄ + CO₂ / Vol. = 5 mL / Temp. = 126 °C**

Fonte: Elaborado pelo autor.

A linha de base média dos testes de resposta variou entre 174 e 177 mV. A equação da reta obtida foi: $y = 31,818x + 178,44$, com $R^2 = 92,61\%$, indicando novamente alta correlação entre a resposta do FID e a concentração de CH₄ das misturas, no entanto, consideravelmente menor que os demais ensaios, indicando a possibilidade de outros fatores estarem influenciando na resposta do detector, principalmente para a amostra de 100% de CH₄. O sistema mostrou pouca diferença

de sensibilidade em relação às misturas de CH₄ e AR do Ensaio 5 ($(b_{\text{ensaio5}} - b_{\text{ensaio6}}) < 0,5$), porém apresentou menor sensibilidade em relação ao Ensaio 4, com a sonda na temperatura ambiente ($b_{\text{ensaio6}} \approx 38 < b_{\text{ensaio4}} \approx 32$).

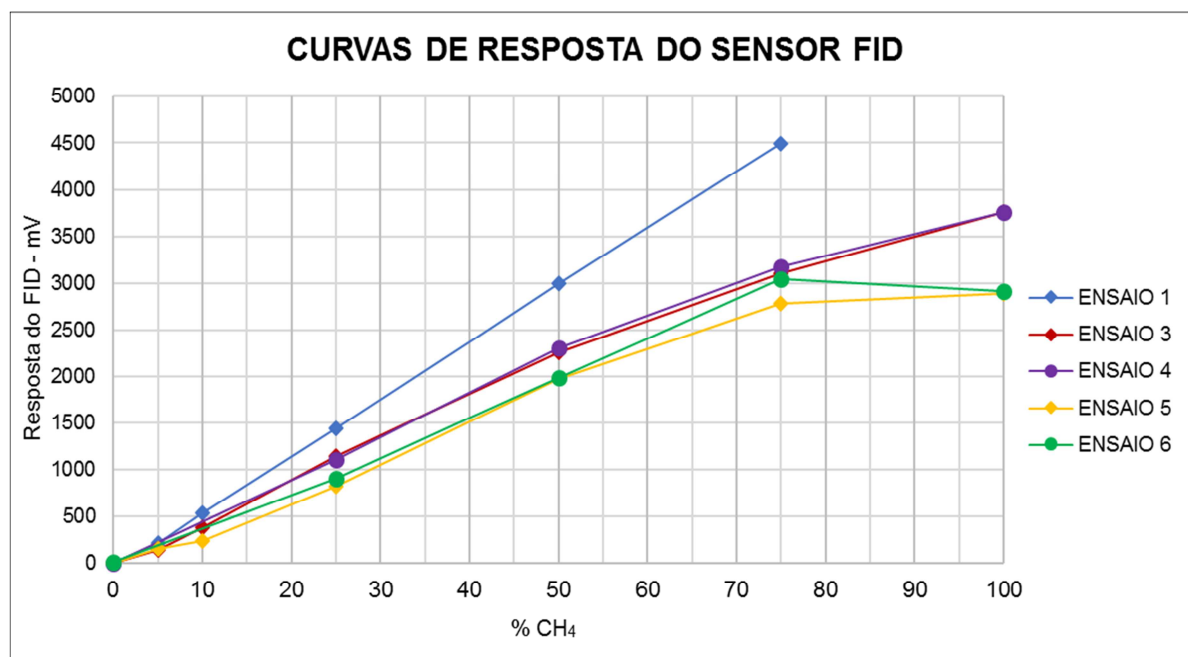
No teste de injeção da mistura de 100% de CO₂ (0% CH₄), ambas as duplicatas apresentaram uma pequena elevação do sinal do FID (2,2 e 3,5 mV, respectivamente), concordando com a hipótese levantada no Ensaio 4, de que outros fatores podem ter influenciado a resposta do detector para esses testes.

O coeficiente R obtido foi de 0,9623 novamente considerada como fortíssima, segundo o critério apresentado por Brito et al. (2003). Porém, devido ao resultado incoerente no teste com 100% de CH₄, a resposta do detector FID foi considerada linear apenas no intervalo de 0% a 75% de CH₄, para as condições do Ensaio 6.

O LD e o LQ só puderam ser calculados com a eliminação do ponto de 100% de CH₄, que foram, respectivamente, de 5,48 % e 5,64 % de CH₄. Eliminando-se esse ponto *outlier*, o coeficiente R também apresenta uma melhora considerável, com R = 0,9993.

6.2.7 Considerações sobre o experimento

Os resultados mostraram que todos os ensaios realizados apresentaram uma correlação fortíssima ($R > 0,91$) entre a resposta do detector FID e as concentrações de CH₄ das amostras. Para auxiliar na comparação dos ensaios, a **Figura 20** apresenta a compilação das curvas de resposta obtidas.

Figura 20. Compilação das curvas de resposta do detector FID.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme verificado, principalmente nos ensaios 5 e 6, houve uma defasagem na resposta do FID para as amostras de 100% de CH₄, prejudicando os coeficientes de correlação. Ao eliminar esse ponto, todos os ensaios (com exceção do 1 e 2, que já não o tinham) apresentaram melhores coeficientes de correlação e melhor sensibilidade, conforme demonstrado na **Tabela 16**. Para os ensaios 5 e 6 esses incrementos foram mais significativos do que para os ensaios 3 e 4.

Tabela 16. Valores dos dados de regressão linear e parâmetros experimentais dos ensaios.

Ensaio	a	b	R	LD (%)	LQ (%)	T (°C)	Vol. (mL)	Diluyente
1	60,648	-56,739	0,9998	3,78	3,89	27	60	AR
3	39,192	54,932	0,9947	3,12	3,50	27	5	AR
4	38,375	150,92	0,9920	0,86	1,39	27	5	CO ₂
5	32,186	44,298	0,9810	4,27	4,69	126	5	AR
6	31,818	178,44	0,9623	0,01*	0,22*	126	5	CO ₂
Parâmetros dos ensaios com a exclusão do ponto de 100% de CH₄								
3'	42,739	-7,246	0,9976	4,32	4,66	27	5	AR
4'	42,904	37,689	0,9982	3,41	3,89	27	5	CO ₂
5'	38,392	-64,489	0,9976	6,42	6,76	126	5	AR
6'	40,739	-44,571	0,9993	5,48	5,64	126	5	CO ₂

*LD e LQ irrealis devido à inconsistência na curva analítica.

Com base nesses dados, pode-se afirmar que o método adotado apresenta linearidade na faixa de 0% a 75% de CH_4 para todas as condições de operação avaliadas. Provavelmente, a amostra de 100% de CH_4 apresentou perda do analito por oxidação antes da medição no detector, o que foi ainda agravado quando a sonda se encontrava aquecida (Ensaio 5 e 6). Quanto aos LDs e LQs obtidos, o fato da linha de base do FID estar acima dos níveis normais (média de 174 mV nos ensaios, contra uma média de 27 mV em campo) certamente influenciou negativamente os resultados, porém não impediu as análises pretendidas.

Os resultados mostram que as melhores condições experimentais foram obtidas no Ensaio 4, devido ao menor LD e LQ obtidos, mesmo considerando a amostra de 100% de CH_4 . Isso indica que o uso do CO_2 como diluente mostrou-se mais adequando em termos analíticos, corroborando o fato de evitar a oxidação do metano antes da medição, fenômeno passível de ocorrer utilizando AR como diluente, o qual possui oxigênio. A menor temperatura do MIP também se mostrou mais efetiva, sendo menos passível de proporcionar perdas por oxidação. No entanto, esse fenômeno tende a ser irrelevante em campo, pois a captação do CH_4 pela membrana do MIP ocorre em meio poroso, onde sua oxidação seria minimizada.

Com relação à linearidade e sensibilidade, o melhor resultado foi obtido no Ensaio 1, realizado com a injeção de volumes maiores de amostra (60 mL), com uma linearidade quase perfeita ($R = 0,9998$) e sensibilidade consideravelmente maior em relação aos ensaios realizados com 5mL de amostra. O resultado do Ensaio 2 corrobora com o primeiro, no sentido de confirmar que o detector FID se mostra mais sensível para amostras de maior volume (com as mesmas concentrações), apresentando sinais de resposta mais elevados. Essa constatação corrobora com a informação apresentada pelo fabricante do equipamento (SRI, 2015b), de que o detector o FID é sensível à massa de carbono, pois para uma mesma concentração, amostras de maior volume terão maior massa de CH_4 .

Entre os ensaios de mesmo volume, realizados com a diluição de CH_4 em AR e em CO_2 , as diferenças de linearidade e sensibilidade foram pouco expressivas. De fato, a presença de moléculas de carbono oxidado, como o CO_2 , não interfere na resposta do FID, cujo sinal é proporcional ao número de grupos $-\text{CH}_2-$ que entram na chama (POLESE, 2014). No entanto, outros componentes traço podem influenciar na resposta do detector, pois os gases utilizados na composição das amostras (CH_4 ,

CO₂ e ar atmosférico) não eram 100% puros. Essa questão pode explicar a razão pela qual as amostras com “100%” de CO₂ (que na verdade eram de 99,8%) apresentaram um pequeno nível de resposta, o que não é possível detectar quando há presença de CH₄, pois o sinal se sobrepõe aos interferentes.

Neste contexto, o experimento mostra que o detector FID do MIP tende a apresentar um comportamento linear para as concentrações de CH₄ possivelmente encontradas em campo. No entanto, diversos outros fatores podem influenciar na resposta do equipamento, conforme descrito no item 3.4. O FID também deverá apresentar maior resposta para acumulações de biogás que apresentarem maior massa de CH₄, seja por conterem maiores concentrações, volume ou pressão. Teoricamente, a sonda também deverá ser capaz de detectar o metano, tanto na temperatura ambiente, como com o aquecimento ligado.

6.3 Ensaios de campo com a sonda MIP

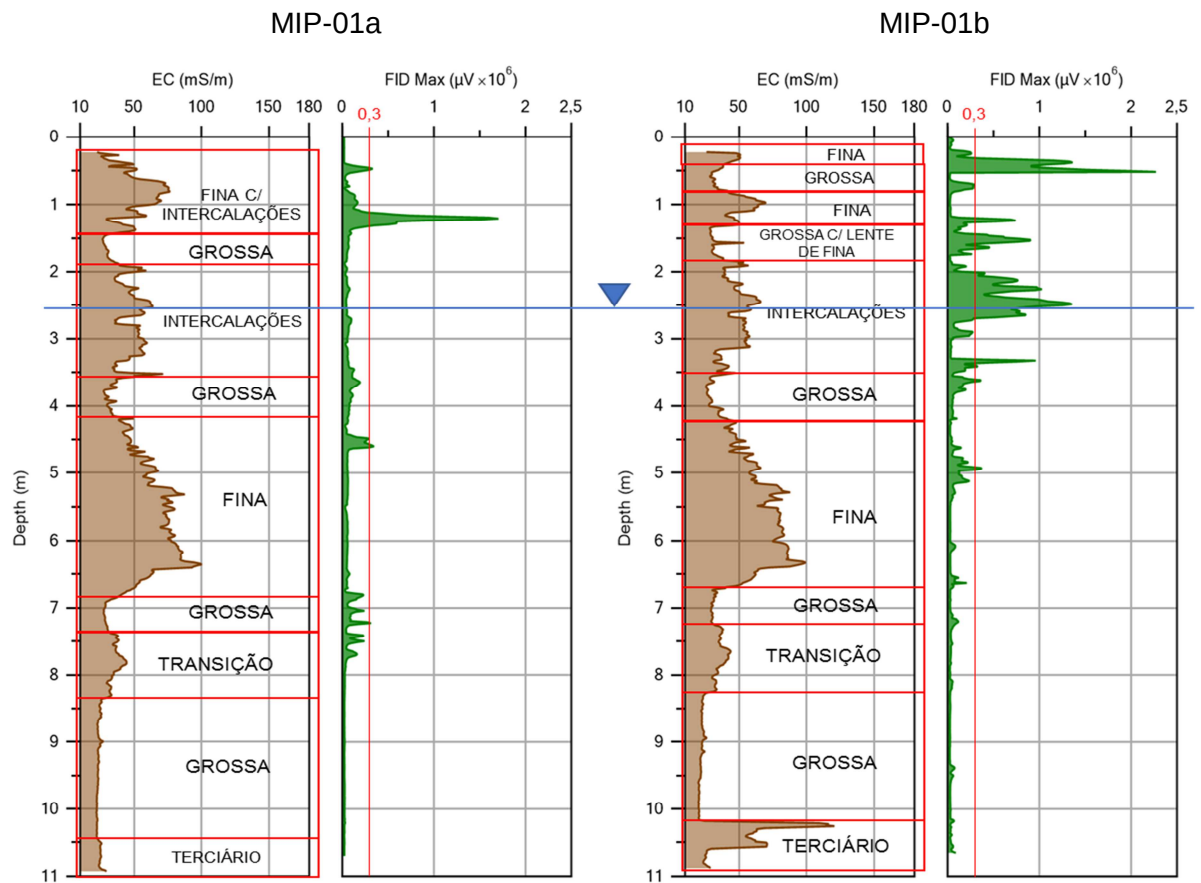
Os principais resultados dos ensaios de campo com a sonda MIP foram obtidos pelo detector FID e pelo sensor de condutividade elétrica (EC), cujos perfis comparativos, para cada um dos sete *clusters*, são apresentados nas **Figuras 21 a 27**. Os resultados na íntegra de cada ensaio podem ser conferidos no **Apêndice A**.

A interpretação foi iniciada pela análise dos perfis do EC, buscando-se identificar feições características que possibilitassem o reconhecimento das principais camadas do subsolo e uma inferência qualitativa de suas características físicas (textura), bem como a comparação dessas informações com o modelo conceitual previamente estabelecido em estudos anteriores, conforme o apresentado no Capítulo 4. Essas informações, que inicialmente foram visualizadas em campo, foram tratadas e consolidadas em seções esquemáticas, e, posteriormente, foram comparadas com os perfis das sondagens *direct push* e com os resultados das análises de laboratório.

Quanto aos resultados do detector FID, a análise foi executada por meio da comparação dos perfis, obtidos com a sonda nas temperaturas ambiente e aquecida, para cada *cluster*. Em seguida, foram analisados com base nos resultados do sensor EC, tanto em perfis individuais, como em seções esquemáticas. Por fim, realizou-se uma análise integrada com as demais técnicas utilizadas.

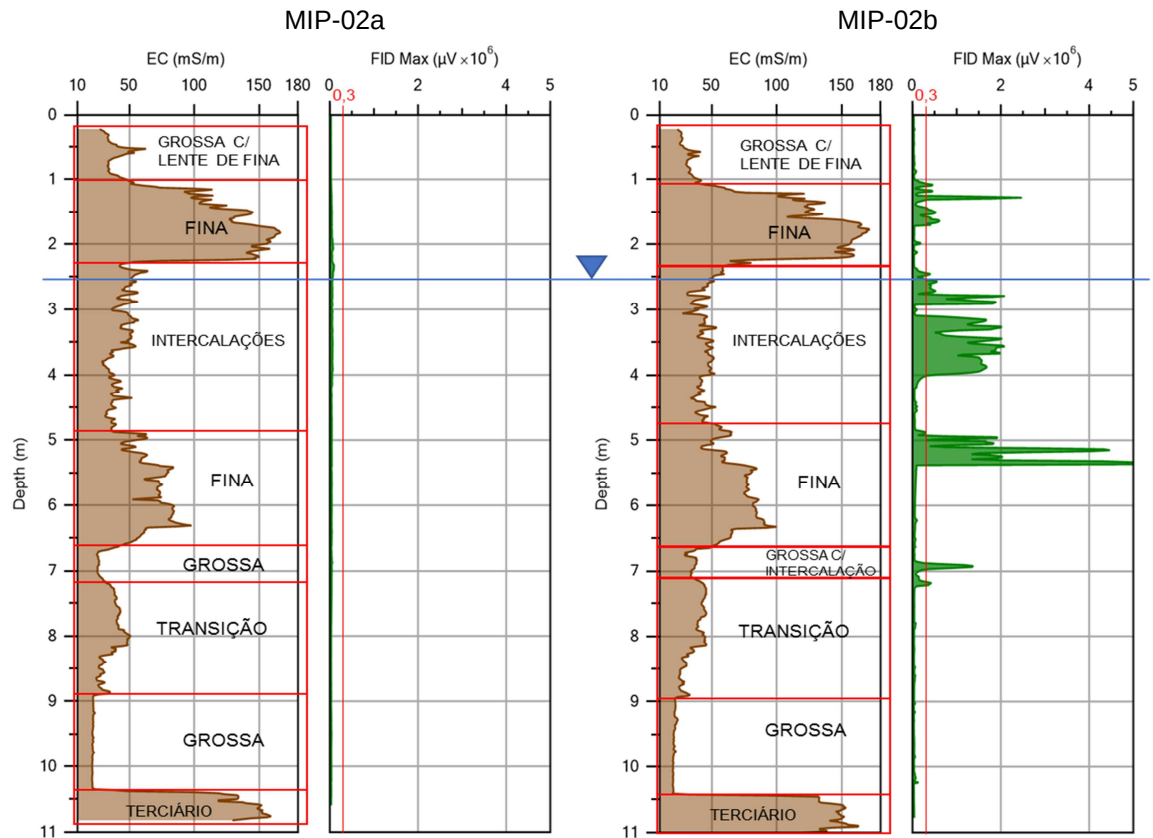
Adicionalmente, foi inserido nos perfis e seções esquemáticas, o NA aproximado de cada ponto, obtido pelas médias das medições realizadas nos PMs mais próximos.

Figura 21. Resultados dos ensaios MIP-01, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).



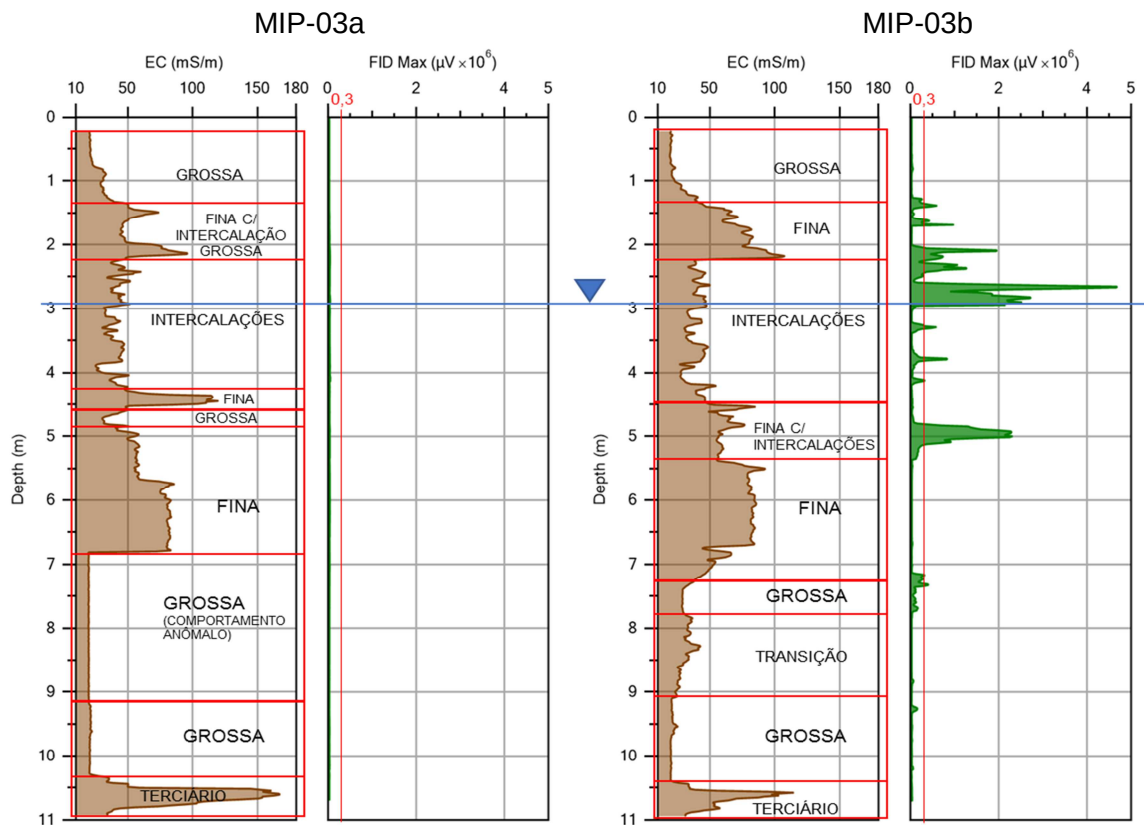
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22. Resultados dos ensaios MIP-02, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).



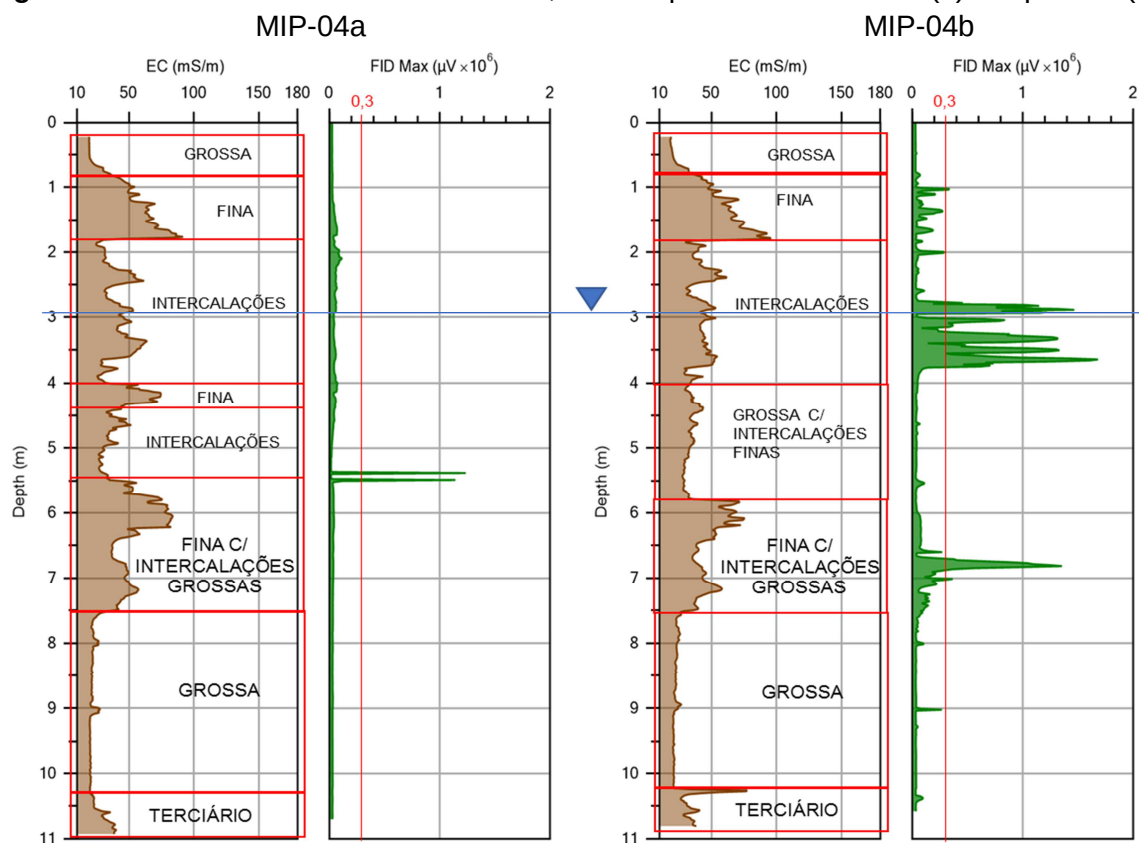
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23. Resultados dos ensaios MIP-03, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).



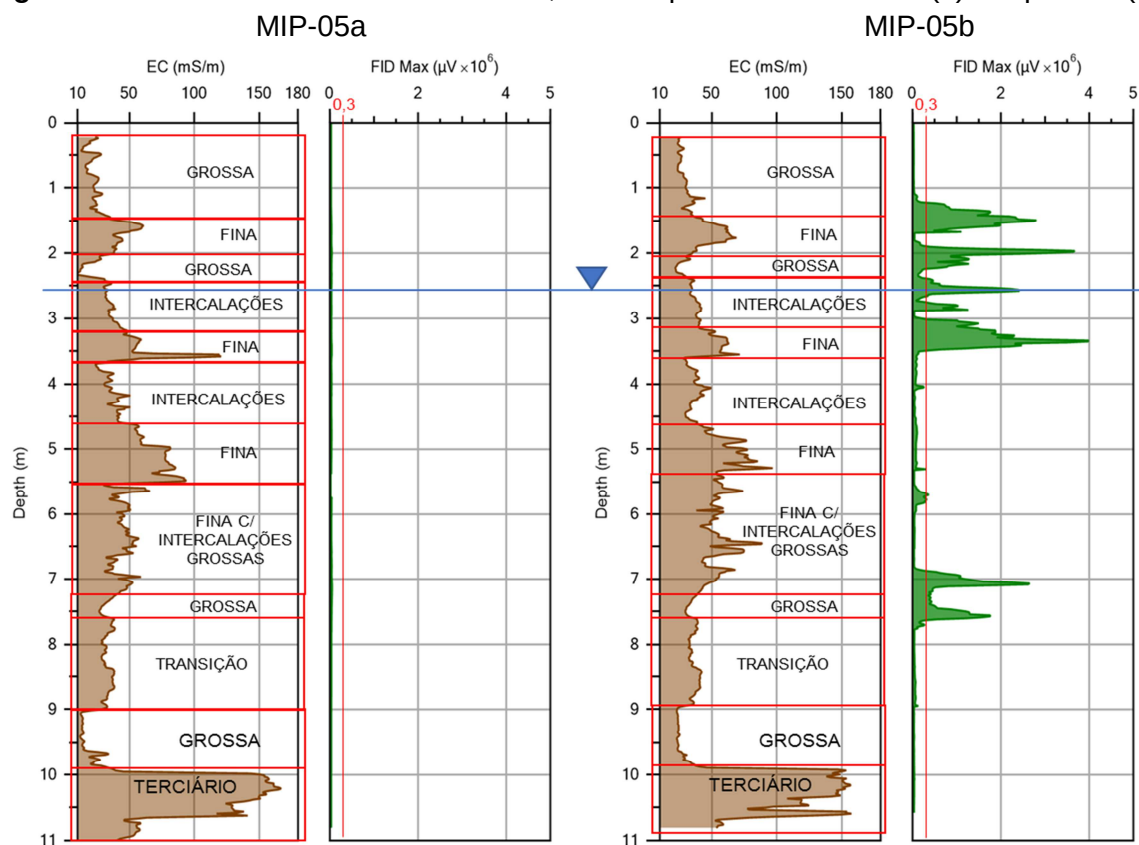
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24. Resultados dos ensaios MIP-04, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).



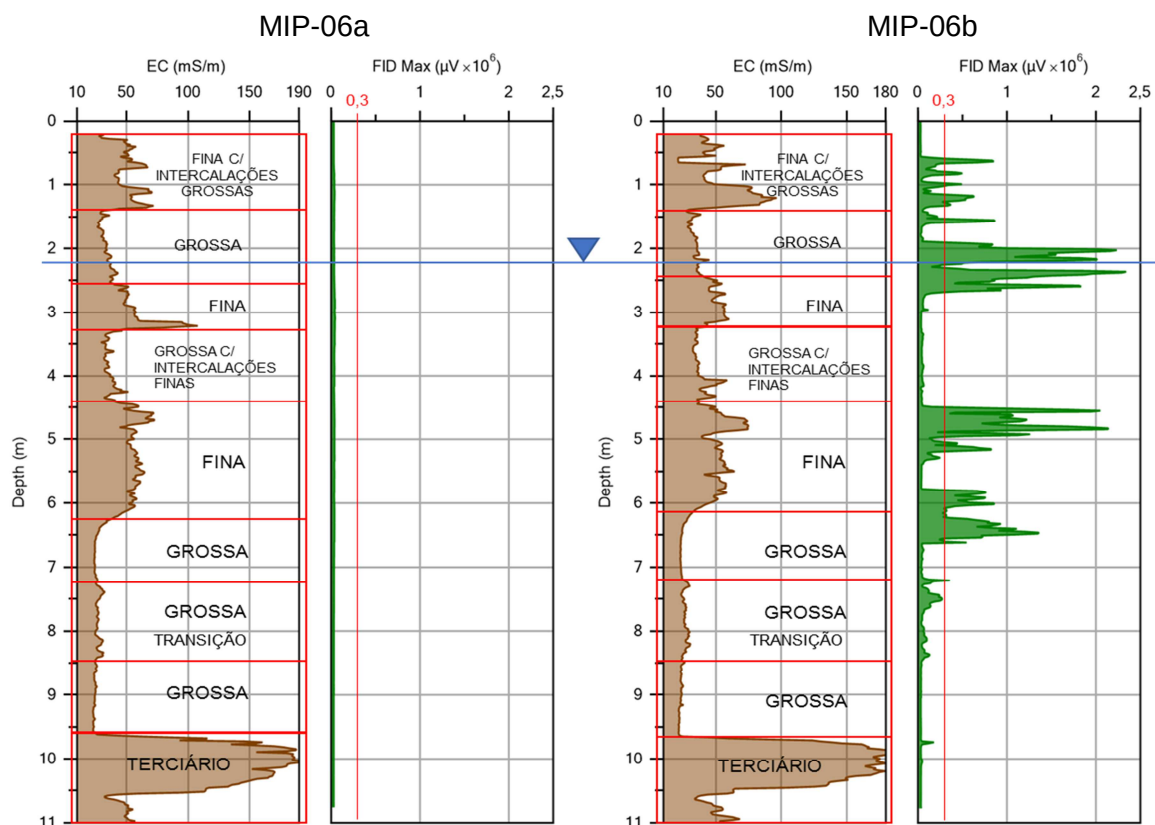
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25. Resultados dos ensaios MIP-05, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).



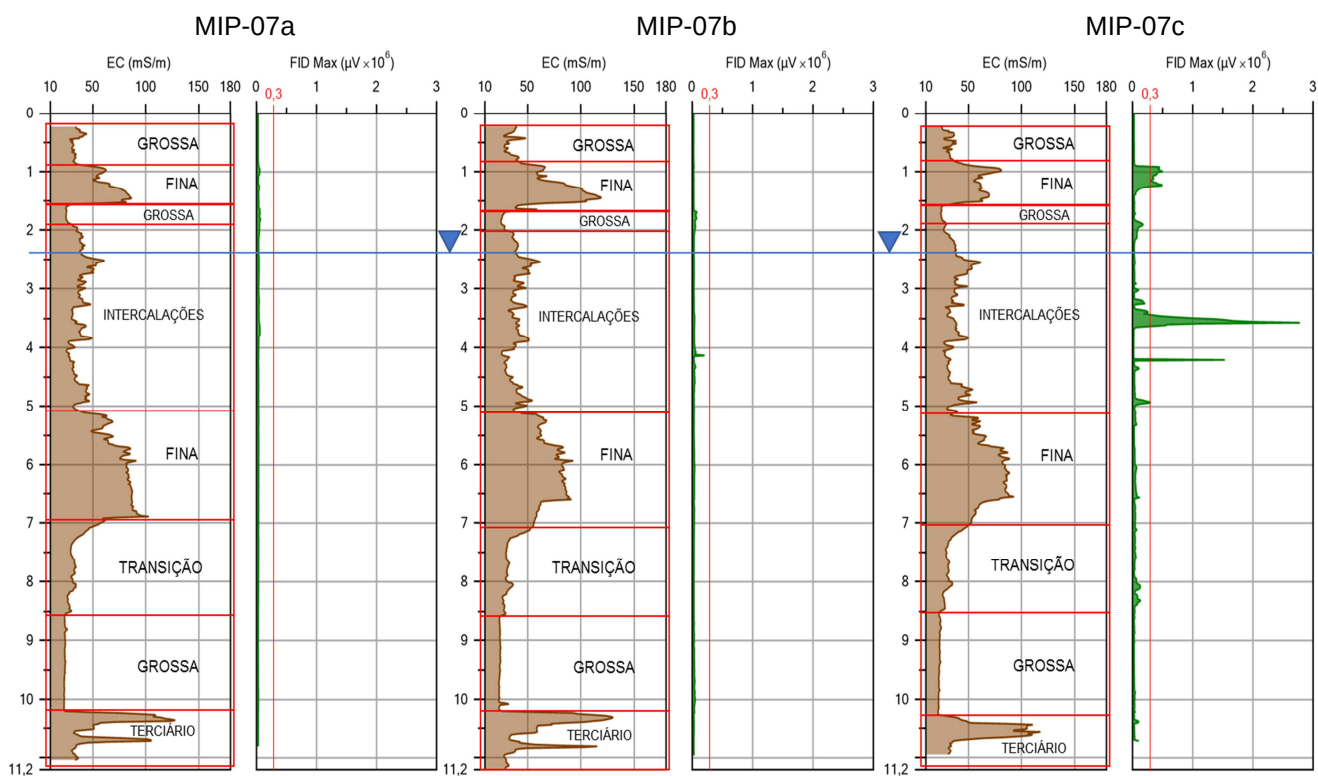
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26. Resultados dos ensaios MIP-06, nas temperaturas ambiente (a) e aquecida (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27. Resultados dos ensaios MIP-07 nas temperaturas ambiente (a), ambiente com a membrana nova (b) e aquecida com a membrana nova (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.1 Resultados do sensor de condutividade elétrica

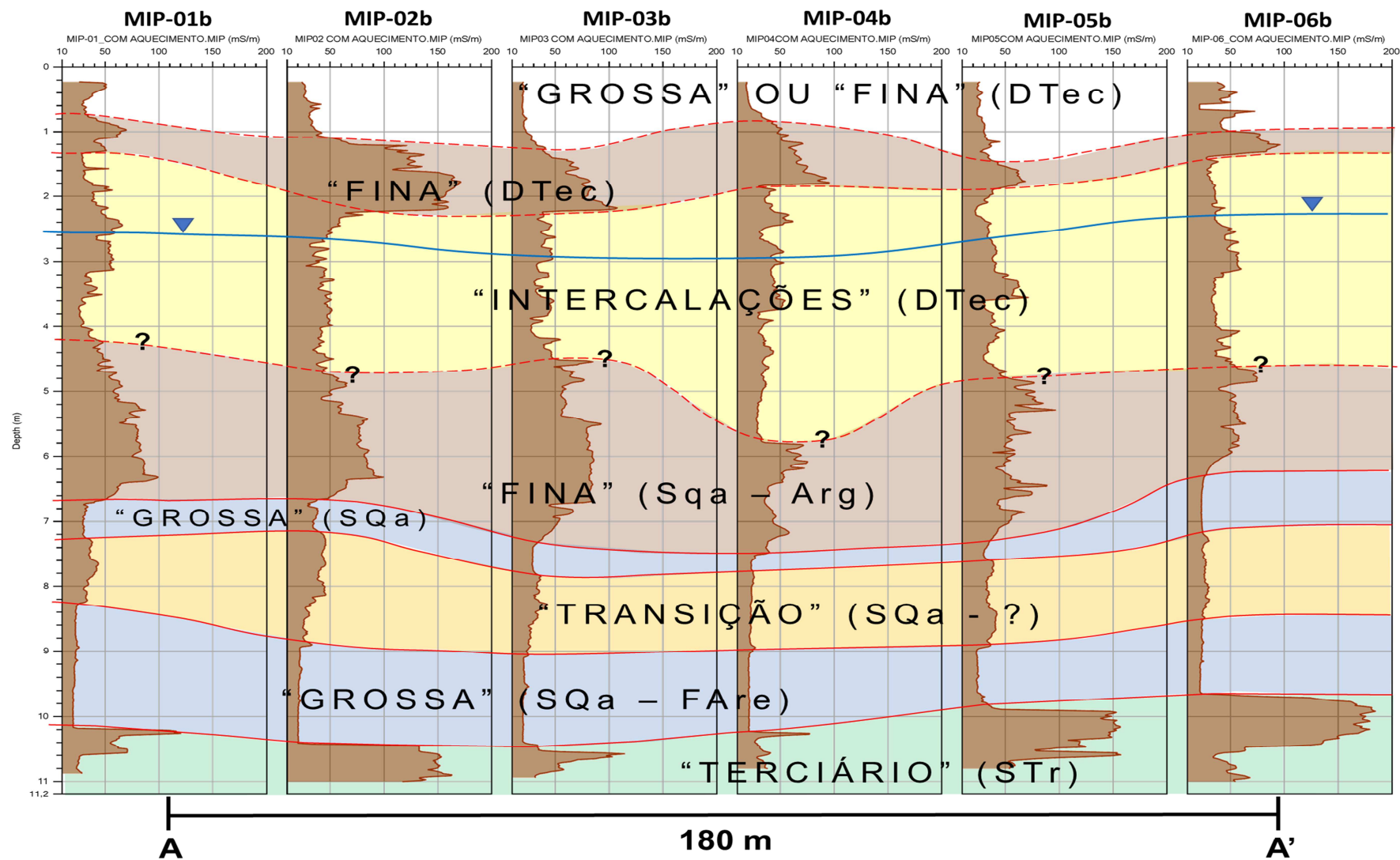
A interpretação dos perfis do EC foi feita por meio da categorização das feições identificadas, com base nos seguintes critérios:

- Grossa: relativa às texturas granulares grossas (areias, areia siltosa, cascalhos e seixos), definidas por condutividade elétrica menor que 35 mS/m (aproximadamente) e feições geralmente côncavas no sentido crescente do perfil EC;
- Fina: relativa às texturas granulares finas (argila, silte, argila siltosa, argila arenosa e silte arenoso), definidas por condutividade elétrica maior que 35 mS/m (geralmente > 50 mS/m) e feições convexas no sentido crescente do perfil do EC;
- Intercalações: camadas com oscilações curtas do sinal do EC, envolvendo variações de categoria e geralmente associadas com texturas intermediárias (e.g. areia fina siltosa, silte arenoso, areia argilosa, etc);
- Transição: camadas com variações graduais, ou menos abruptas, do sinal do EC, envolvendo trechos de transição entre camadas bem definidas (fina ou grossa). Geralmente localizadas por volta de 7 a 9 m de profundidade;
- Terciário: aumento (geralmente) abrupto do sinal do EC, associado à mudança litológica, com a entrada da sonda nos sedimentos terciários da Formação Resende (STr).

As categorias estabelecidas mostraram-se condizentes com o modelo conceitual previamente consultado e possibilitaram a realização de interpretações coerentes, tanto entre os perfis realizados nos mesmos *clusters*, conforme apresentado nas **Figuras 21 a 27**, como entre os diferentes *clusters*, por meio de seções esquemáticas.

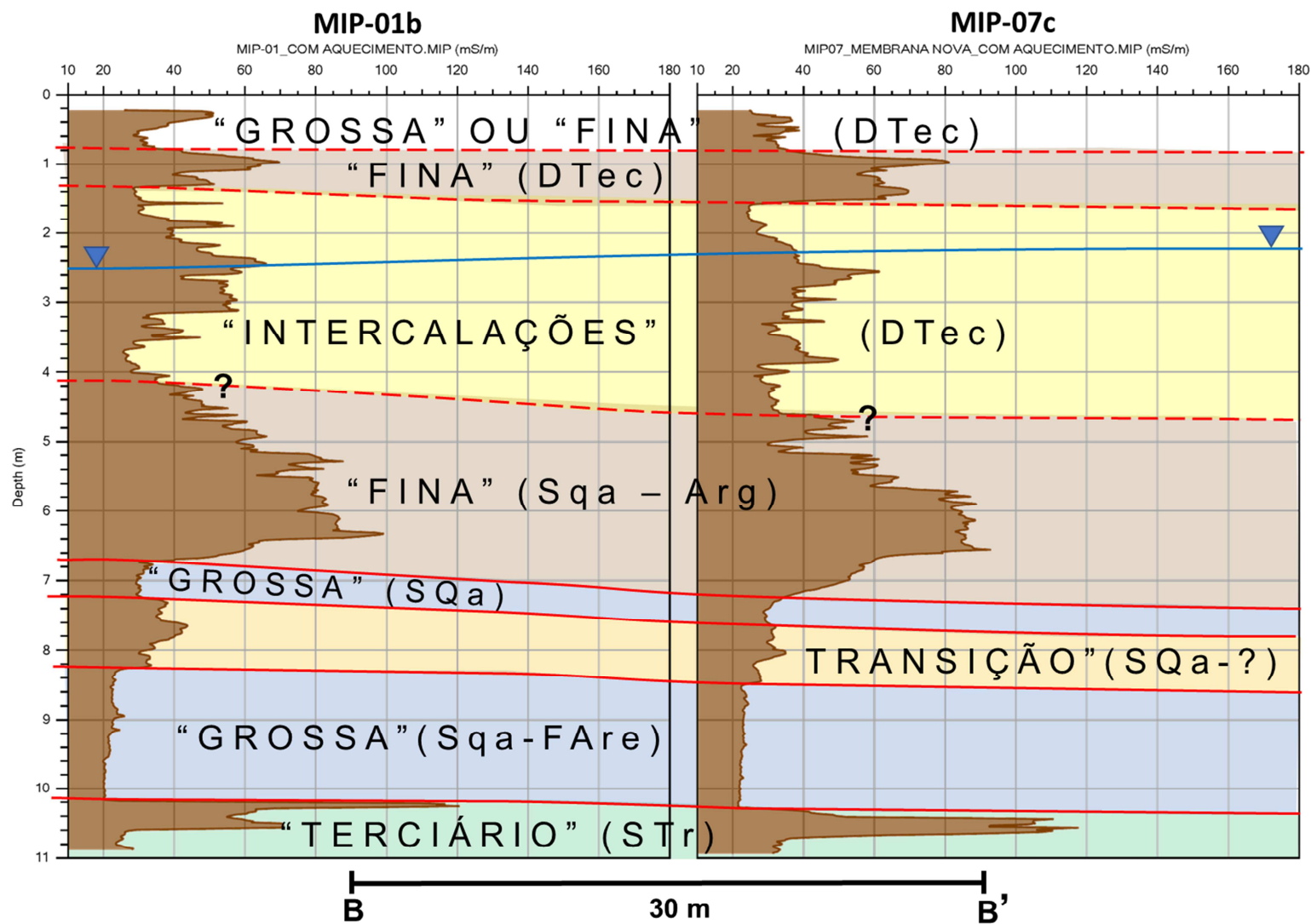
Algumas feições, comuns a praticamente todos os perfis, puderam ser identificadas, tais como: a camada de textura fina, entre as profundidades médias de 4,8 a 7,0 m; a camada de textura grossa, entre 8,6 e 10,25 m; e, o aumento abrupto do sinal, na profundidade média de 10,2 m. Essas feições foram associadas com possíveis “marcos estratigráficos” da geologia da área, sendo fundamentais na interpretação dos resultados, conforme apresentado nas seções esquemáticas de condutividade elétrica A-A’ e B-B’, das **Figuras 28 e 29**. Para a elaboração dessas seções foram utilizados os perfis do EC obtidos com a sonda aquecida, pois um dos perfis na temperatura ambiente (MIP-03a) apresentou problemas elétricos.

Figura 28. Seção esquemática de condutividade elétrica A-A'.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29. Seção esquemática de condutividade elétrica B-B'.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado nas seções esquemáticas, as camadas superficiais, até uma profundidade aproximada de 4,8 m, foram associadas com os depósitos tecnogênicos (DTec), referentes aos materiais de dragagem. Essas camadas apresentam uma característica heterogênea, alternando texturas finas e grossas, bem como a presença da camada de “intercalações”, associada com variações texturais frequentes. O limite inferior, entre os depósitos tecnogênicos e os sedimentos quaternários (terreno natural), não pode ser definido com precisão em alguns pontos, pois a composição dos materiais, na maioria dos pontos, é muito parecida, gerando comportamentos elétricos similares e/ou confusos. Essa característica pode ser correlacionada à origem comum dos materiais, associados aos sedimentos de várzea do Rio Tietê.

A camada de textura fina identificada em todos os ensaios, abaixo dos depósitos tecnogênicos, foi associada à fácies argilosa dos sedimentos quaternários (SQa-FArg). Essa camada apresenta formato convexo nos perfis do EC, por vezes bastante irregular, com espessuras aproximadas de até 2,8 m (e.g. MIP-03b), se destacando das camadas adjacentes por apresentar condutividade elétrica geralmente acima de 50 mS/m, podendo ultrapassar 100 mS/m. Encontra-se delimitada em profundidade por uma transição relativamente gradual para camadas de textura grossa, nitidamente caracterizadas pelo formato côncavo.

Na maioria dos ensaios (com exceção do MIP-03a, que apresentou um problema elétrico entre 6,8 e 9,1 m), foi identificada uma camada intermediária, denominada “transição”, associada à mudança de litologia, da fácies argilosa (FArg) para a fácies arenosa (FAre) dos SQa. Outros métodos de caracterização (e.g. análises granulométricas) foram necessários para definir os grupos texturais dessa camada.

Com relação à camada de textura grossa, identificada em todos os ensaios, foi associada à fácies arenosa que compõe a base dos SQa (SQa-FAre). Essa camada apresenta uma feição elétrica relativamente retilínea, com valores de condutividade na faixa de 20 a 25 mS/m, podendo apresentar espessuras de até 2,7 m (e.g. MIP-04a e MIP-04b). Seu limite em profundidade se dá pelo aumento, geralmente abrupto, no perfil elétrico, associado à mudança litológica para os sedimentos paleogênicos da Formação Resende (STr).

Essa última camada, denominada “terciário” nos perfis, apresenta feições elétricas “tabulares” abruptas, mais ou menos delgadas, com condutividade

geralmente ultrapassando 100 mS/m, podendo chegar a 190 mS/m (e.g. MIP-06a). Na maioria dos pontos, abaixo das “lentes” superficiais de textura fina, ocorrem intercalações para texturas grossas, evidenciadas por diminuições abruptas no sinal do EC. Essas camadas mostraram-se altamente resistentes à penetração da sonda MIP, implicando na finalização dos ensaios.

Apesar das interpretações coerentes e muito úteis dos perfis do EC, sabe-se que outros fatores, além da granulometria, podem influenciar na condutividade elétrica dos materiais, conforme apresentado no Item 3.4.2. Dessa forma as interpretações foram comparadas e validadas com outras técnicas de investigação, conforme as recomendações apresentadas por Schulmeister et al. (2003), entre outros autores.

6.3.2 Resultados do detector FID

Conforme os perfis de resposta do detector FID, apresentados nas **Figuras 21 a 27**, a profundidade final de investigação variou entre 10,58 m e 10,96 m, sendo suficiente para atingir os sedimentos terciário em todos os ensaios.

Com base no histórico de estudos realizados na área de interesse, apresentado no Item 4.3, atribuiu-se os resultados obtidos pelo detector FID à presença de metano no subsolo. Essa correlação foi reforçada pela diferença de comportamento do FID em relação aos demais detectores do MIP (PID e XSD), que apresentaram respostas nulas ou pouco significativas, conforme os respectivos perfis disponibilizados no **Apêndice A**.

Para a interpretação dos resultados, foi estabelecido um valor de referência para o sinal do FID de 300 mV, acima do qual os resultados foram considerados “relevantes” quanto à presença do CH₄ no subsolo. Esse valor foi obtido a partir de uma aproximação da média dos resultados obtidos pelas equações das retas dos 5 ensaios de bancada (apresentadas no Item 6.2), para uma concentração de 5% de CH₄, corrigidos para a linha base média obtida nos ensaios de campo. Esse cálculo pode ser resumido pela seguinte equação:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \times \sum (F_i(x) + \overline{BL}) \quad (\text{Equação 6})$$

onde:

$F_i(x)$ = função equivalente à equação da reta de regressão para cada um dos 5 ensaios de bancada (Ensaio 1, 3, 4, 5 e 6);

n = número de ensaios de bancada onde foi obtida a reta de regressão = 5;

x = concentração percentual de referência de CH_4 = 5;

$\overline{BL}$ = linha base média obtida nos ensaios de campo (mV) = 27;

$\bar{y}$ = média dos resultados obtidos pelas equações das retas (para $x=5$) = 303,6 mV $\approx$ 300 mV.

O valor de 5% de CH_4 foi escolhido por representar o limite inferior de explosividade (LIE) do metano no ar atmosférico, o qual, segundo Sepich (2008), representa a concentração mínima de CH_4 no solo capaz de gerar alguma possibilidade de risco em casos de intrusão em construções.

A **Tabela 17** a seguir apresenta um resumo dos principais resultados obtidos pelo detector FID nos ensaios de campo.

Tabela 17. Principais resultados do detector FID obtidos nos ensaios de campo.

Ensaio MIP	Pré-Response Test		Post-Response Test		Resultados dos ensaios			
	BL FID (mV)	Pico FID p/ 1,7% CH_4 (mV)	BL FID (mV)	Pico FID p/ 1,7% CH_4 (mV)	Profundidade final do ensaio (m)	BL FID (mV)	FID max. (mV)	Profundidades (m) com FID>300mV (FIDmax do pico)
MIP-01a	18	202	-	-	10,70	23	1704	0,47 (331 mV) 1,13-1,31 (1704 mV) 4,57-4,62 (345 mV) 7,22 (313 mV)
MIP-01b	19	262	24	260	10,65	25	2271	0,32-0,52 (2271 mV) 1,20-1,25 (741 mV) 1,45-1,65 (904 mV) 2,01-2,68 (1356 mV) 3,31-3,41 (960 mV) 3,61-3,63 (362 mV) 4,92-4,95 (368 mV)
MIP-02a	20	224	26	79	10,59	25	93	FIDmax< 300mV
MIP-02b	31	217	30	215	10,77	30	5000	1,07-1,10 (461 mV) 1,17-1,19 (447 mV) 1,26-1,31 (2477 mV) 1,45-1,71 (615 mV) 2,45-2,47 (410 mV) 2,54-2,91 (2091 mV) 3,11-4,01 (2085 mV) 4,94-5,36 (>5000 mV) 6,89-6,96 (1374 mV) 7,18-7,22 (429 mV)

Ensaio MIP	Pré-Response Test		Post-Response Test		Resultados dos ensaios			
	BL FID (mV)	Pico FID p/ 1,7% CH ₄ (mV)	BL FID (mV)	Pico FID p/ 1,7% CH ₄ (mV)	Profundidade final do ensaio (m)	BL FID (mV)	FID max. (mV)	Profundidades (m) com FID>300mV (FIDmax do pico)
MIP-03a	27	209	27	108	10,70	28	51	FIDmax< 300mV
MIP-03b	28	186	26	234	10,71	29	4685	1,36-1,40 (607 mV) 1,62-1,63 (439 mV) 1,69 (989 mV) 2,06-2,44 (1959 mV) 2,61-2,94 (4685 mV) 3,28-3,31 (593 mV) 3,78-3,81 (832 mV) 4,12-4,13 (322 mV) 4,82-5,12 (2314 mV) 7,16-7,18 (317 mV) 7,32-7,33 (411 mV)
MIP-04a	24	206	27	122	10,70	25	113	FIDmax< 300mV
MIP-04b	30	206	30	219	10,58	30	1681	1,02-1,04 (337 mV) 2,77-2,94 (1466 mV) 3,03-3,16 (839 mV) 3,23-3,75 (1681 mV) 6,71-6,87 (1355 mV) 7,01 (366 mV)
MIP-05a	27	190	27	89	10,80	28	52	FIDmax< 300mV
MIP-05b	27	194	30	188	10,58	29	3984	1,23-1,68 (2803 mV) 1,91-2,23 (3671 mV) 2,39-2,65 (2417 mV) 2,76-2,87 (1265 mV) 3,02-3,49 (3984 mV) 5,3 (303 mV) 5,69-5,78 (366 mV) 6,89-7,62 (2650 mV)
MIP-06a	18	213	28	205	10,76	28	43	FIDmax< 300mV
MIP-06b	28	192	29	170	10,78	30	2339	0,61-0,66 (851 mV) 0,81-0,84 (499 mV) 0,99-1,01 (495 mV) 1,16-1,33 (629 mV) 1,54-1,59 (865 mV) 1,92-2,24 (2234 mV) 2,30-2,67 (2339 mV) 4,51-4,95 (2141 mV) 5,06-5,18 (824 mV) 5,81-6,54 (1361 mV) 6,61 (546 mV) 7,21 (359 mV)
MIP-07a	26	188	25	147	10,80	27	65	FIDmax< 300mV
MIP-07b	24	208	24	142	10,96	25	204	FIDmax< 300mV
MIP-07c	25	214	26	202	10,71	26	2780	0,91-1,23 (504 mV) 3,44-3,61 (2780 mV) 4,21 (1533 mV) 4,92 (302 mV)
Média na Temp. Ambiente	23	205	26	127	10,75	26	291	
Média na Temp. Quente	27	210	28	213	10,68	28	3249	
Média Geral	25	207	27	170	10,72	27	1671	

Observações: “ - ” = teste de resposta não realizado

Os resultados acima, bem como os perfis comparando a sonda nas temperaturas ambiente e aquecida, mostram que a capacidade de detecção de CH_4 é significativamente maior com a sonda aquecida. Todos os ensaios realizados neste modo apresentaram diversos picos, com sinal de resposta acima de 300mV, sendo a média das leituras máximas de cada ensaio igual a 3249 mV. Já com a sonda na temperatura ambiente, com exceção do ensaio MIP-01a, todos os demais apresentaram respostas de FID menores que 300 mV, sendo que a média das leituras máximas nesse modo foi igual a 291 mV.

Essa diferença de sensibilidade, da sonda nas temperaturas ambiente e aquecida, pode ser atribuída a uma série de fatores. Primeiramente, conforme indicado pelos idealizadores do MIP (CHRISTY, 1996b), o desempenho da sonda aquecida se mostra otimizado em campo, pois além de aumentar a pressão de vapor dos compostos amostrados, aumentando a taxa de difusão através da membrana, também auxilia na purga do sistema, acelerando a remoção de partículas e contaminantes residuais adsorvidos à membrana. Adicionalmente, no contexto do presente estudo, o aquecimento promove a evaporação da fração dissolvida do metano na água subterrânea e a liberação da fração residual, eventualmente trapeada, na forma de microbolhas, em camadas menos permeáveis (materiais de textura fina), aumentando a massa de CH_4 amostrada pela sonda.

Conforme verificado nos ensaios de bancada, a presença de CH_4 em fase gasosa no subsolo, principalmente no caso de acumulações mais volumosas (e.g. bolsões de biogás), deveria ser nitidamente detectada pela sonda MIP, mesmo no modo sem aquecimento. Essa é a explicação mais plausível para os resultados obtidos no ensaio MIP-01a (**Figura 21**), onde picos de FID acima de 300mV foram obtidos alinhados com camadas de textura grossa no perfil do EC, podendo ser atribuídos a acumulações de biogás. No entanto, nos demais ensaios realizados à temperatura ambiente, estes níveis de resposta não foram registrados.

Uma possível explicação para a diferença acima pode estar relacionada a um processo de colmatção da membrana do MIP durante as cravações na temperatura ambiente, ocasionado pelo depósito de materiais finos (argila) e matéria orgânica, ou ainda pelo acúmulo de água nos poros da membrana, o que interfere no processo de difusão do analito, conforme demonstrado por Costanza et al (2002). Essa hipótese também se baseia nos testes de resposta, conforme apresentado na **Tabela 17**, onde nota-se uma queda significativa (maior que 20%, chegando a 65%)

no pico de sinal do FID para os testes realizado após os ensaios MIP-02a, MIP-03a, MIP-04a, MIP-05a, MIP-07a e MIP-07b. Por outro lado, esse processo tende a ser minimizado nos ensaios com a sonda aquecida, o que também concorda com os testes de resposta, pois a maior queda de sinal nos testes pós ensaio foi de 11%, sendo que, na média, as respostas aumentaram em 1,2%.

Outra possível explicação, mais simples, porém menos provável, para essas diferenças, poderia ser a ausência de acumulações expressivas de CH₄ em fase gasosa nesses pontos no momento dos ensaios, contrastando com a ocorrência de “bolsões” de biogás no ponto P1. De fato, sabe-se que os processos de transporte e a acumulação de CH₄ no subsolo podem ser dinâmicos, influenciados por uma série de fatores climáticos. Isto pode ser uma das razões para o pico de FID detectado no ensaio MIP-01a (1704 mV) entre 1,1 e 1,3 m, pois foi registrada uma grande precipitação no dia anterior (48 mm) (INMET, 2016), o que pode ter provocado a saturação da camada superficial de solo fino e a acumulação de biogás abaixo dessa camada. No entanto, essa situação deveria provocar o mesmo efeito nos demais pontos (feitos na sequência), o que não foi constatado. Além disso, a hipótese da ausência de acumulações de biogás, ao longo do perfil, não se sustenta frente ao modelo conceitual estabelecido por estudos anteriores (IPT, 2011; MENDONÇA et al, 2015b) e nem frente aos resultados da amostragem de gases com o sistema PRT, conforme apresentado adiante.

Com relação à comparação dos resultados do FID com os perfis do EC, uma correlação muito forte pode ser estabelecida entre a ocorrência de metano (picos de sinal do FID) e a presença de camadas intercaladas de texturas grossas e finas, conforme apresentado nas **Figuras 21 a 27**. A seguir são apresentados os resultados para cada um dos *clusters* executados.

a) Cluster P1

Nos ensaios MIP-01a e MIP-01b as maiores respostas de FID estão localizadas nas camadas superficiais, até 3,5 m de profundidade, associadas à camada de depósitos tecnogênicos (DTec). Os maiores picos (FID_{max}) ocorrem nas profundidades de 1,13-1,31 m (1704 mV) e 0,32-0,52 m (2271 mV), respectivamente, na interface entre feições do EC associadas a texturas grossas e texturas finas. Picos menores também são identificados em meio à camada de

textura fina (SQa-FArg), entre 4,5 e 5,0 m de profundidade, e na camada de textura grossa abaixo, entre 6,8 e 7,5 m.

b) Cluster P2

No ensaio MIP-02a não foram obtidas respostas acima de 300 mV, sendo o $FID_{max} = 93$ mV. Quanto ao ensaio MIP-02b, respostas significativas foram obtidas nas camadas superficiais de DTec, com picos entre 1,0 e 1,7 m e entre 2,5 e 4,0 m de profundidade, principalmente na camada denominada como “intercalações”. No entanto, as maiores leituras foram obtidas em uma pequena intercalação “grossa” (lente), nas profundidades de 4,9 a 5,4 m, em maio à camada de feição “fina”, associada aos SQa-Arg. Nesses picos obteve-se um $FID_{max} > 5000$ mV, ultrapassando o limite de escala do equipamento. Outros picos menores também foram constatados entre 6,9 e 7,2 m, com $FID_{max} = 1374$ mV, na camada de feição “grossa com intercalações”, localizada logo abaixo da anterior.

c) Cluster P3

No ensaio MIP-03a as respostas foram baixas, com $FID_{max} = 51$ mV. Quanto ao ensaio MIP-03b, os maiores picos foram obtidos nas camadas de DTec, principalmente na camada com feição de “intercalações” no EC, logo abaixo de uma camada de feição “fina”, entre 2,0 e 3,0 m de profundidade, onde o FID_{max} chegou a 4685 mV. Picos de resposta menores também foram obtidos logo acima dessa camada de feição “fina”, 1,3 e 1,7 m. Outros picos de resposta menores também foram constatados na mesma camada de “intercalações”, nas profundidades de 3,3 m, 3,8 m e 4,1 m. Logo abaixo, entre 4,8 e 5,1 m, em uma feição do EC denominada “fina com intercalações”, outro pico de FID expressivo foi obtido, com $FID_{max} = 2314$ mV. Picos menores, com $FID_{max} = 411$ mV, também foram constatados na camada de feição “grossa”, entre 7,3 e 7,5 m, abaixo da camada “fina” do SQa-Arg.

d) Cluster P4

No ensaio MIP-04a ocorreu um problema com o detector FID entre 5,3 e 5,5 m, onde os picos de resposta, registrados durante a manutenção, devem ser desconsiderados. No restante do ensaio não foram obtidas respostas acima de 300 mV, sendo o $FID_{max} = 113$ mV.

Quanto ao ensaio MIP-04b, os maiores picos novamente foram obtidos nas camadas de DTec, principalmente na camada de “intercalações” no EC, logo abaixo da camada de feição “fina”, entre 2,7 e 3,8 m de profundidade, onde o FID_{max} chegou a 1681 mV. Picos menores também foram obtidos nesse trecho de feição “fina”, entre 1,0 e 2,0 m. Novamente, respostas expressivas foram obtidas na camada do EC denominada “fina com intercalações grossas”, entre 6,7 e 7,0 m, associada aos SQA-Arg, com $FID_{max} = 1355$ mV.

e) Cluster P5

No ensaio MIP-05a as respostas também foram baixas, com $FID_{max} = 52$ mV. Quanto ao ensaio MIP-05b, os maiores picos também foram obtidos em intercalações de feições “finas” e “grossas” do EC, entre 1,2 e 3,5 m, com $FID_{max} = 3984$ mV, associadas às camadas de DTec. Pequenos picos foram obtidos entre 5,3 e 5,8 m, na camada denominada “fina com intercalações grossas”, associada aos SQA-Arg. Logo abaixo, na transição para a camada de feição “grossa”, entre 6,5 e 7,2 m, picos de FID também foram constatados, com o sinal chegando a 2650 mV.

f) Cluster P6

No ensaio MIP-06a as respostas do FID foram mínimas, com $FID_{max} = 43$ mV. Quanto ao ensaio MIP-06b, diversos picos foram obtidos nas camadas superficiais de DTec, entre 0,6 e 2,7 m, principalmente em feições “grossas” intercaladas a feições “finas” do EC, com $FID_{max} = 2339$ mV. Mais abaixo, na camada de feição “fina” associada aos SQA-Arg, entre 4,5 e 5,2 m, respostas expressivas também foram obtidas, com $FID_{max} = 2141$ mV, assim como na transição para a camada de feição “grossa” abaixo, entre 5,8 e 6,6 m, com $FID_{max} = 1361$ mV.

g) Cluster P7

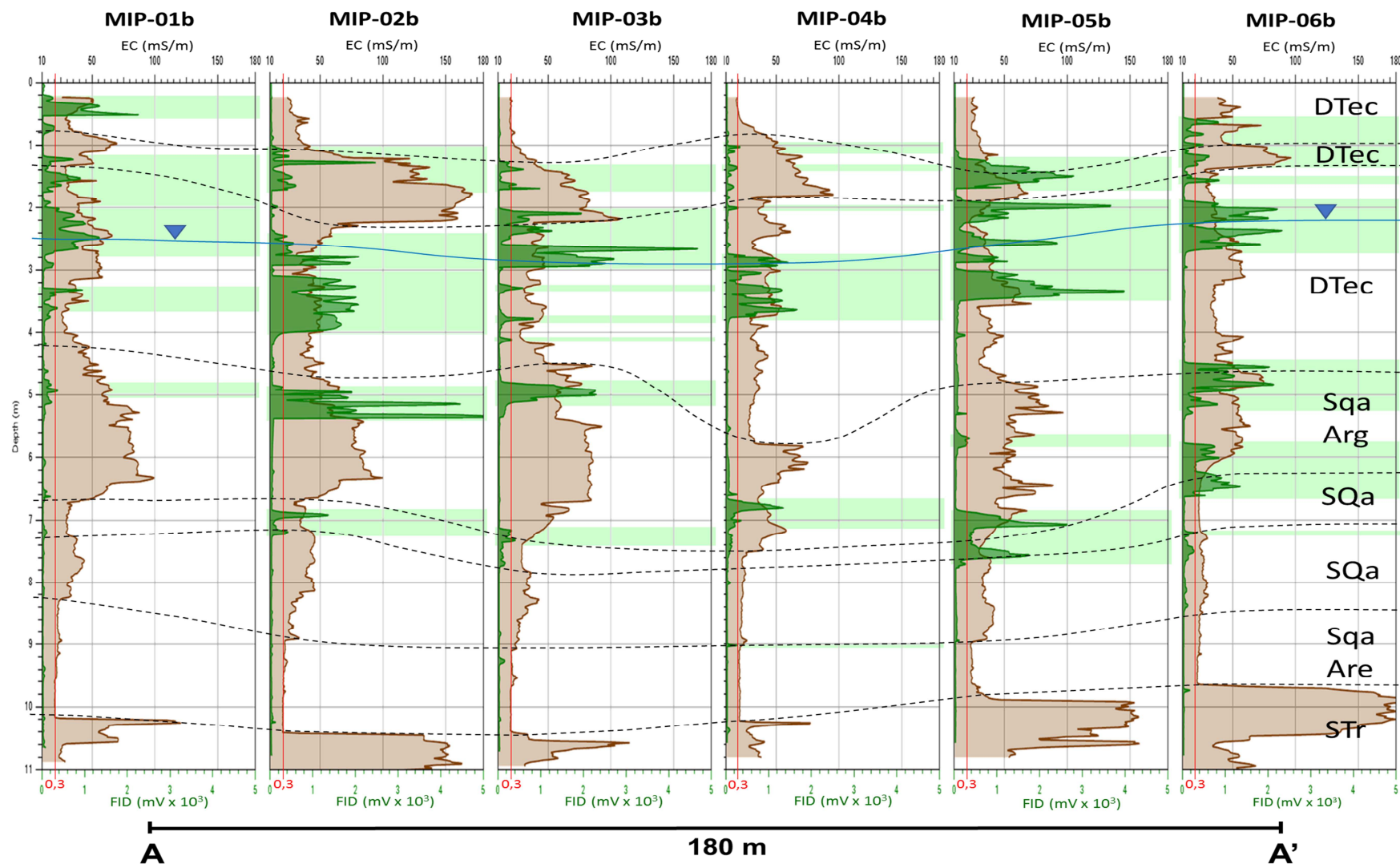
O ensaio MIP-07a também apresentou baixas respostas, com $FID_{max} = 65$ mV. No ensaio MIP-07b, repetiu-se a cravação com a sonda da temperatura ambiente, porém com uma membrana nova. Foi constatado um aumento no nível de resposta, com $FID_{max} = 204$ mV, porém ainda abaixo do valor de referência de 300 mV. Essa melhora do sinal pode ser associada à ausência de desgaste da membrana nova, assim como ao fato desta não apresentar “colmatação” no início do

ensaio. Mesmo assim, uma queda de sinal de 32% foi verificada no teste de resposta pós ensaio.

Com relação ao ensaio MIP-07c, realizado aquecido e com a membrana nova, todos os picos de resposta foram obtidos nas camadas associadas aos DTec, principalmente na feição do EC denominada “intercalações”, na profundidade de 3,4 a 3,6 m, onde obteve-se um pico de sinal de 2780 mV, e na profundidade de 4,21 m, onde obteve-se outro pico de sinal, com 1533 mV. Picos de resposta menores também foram obtidos na mesma camada de “intercalações”, por volta de 4,92 m, e na camada de feição “fina”, entre 0,9 e 1,2 m, $FID_{max} = 504$ mV.

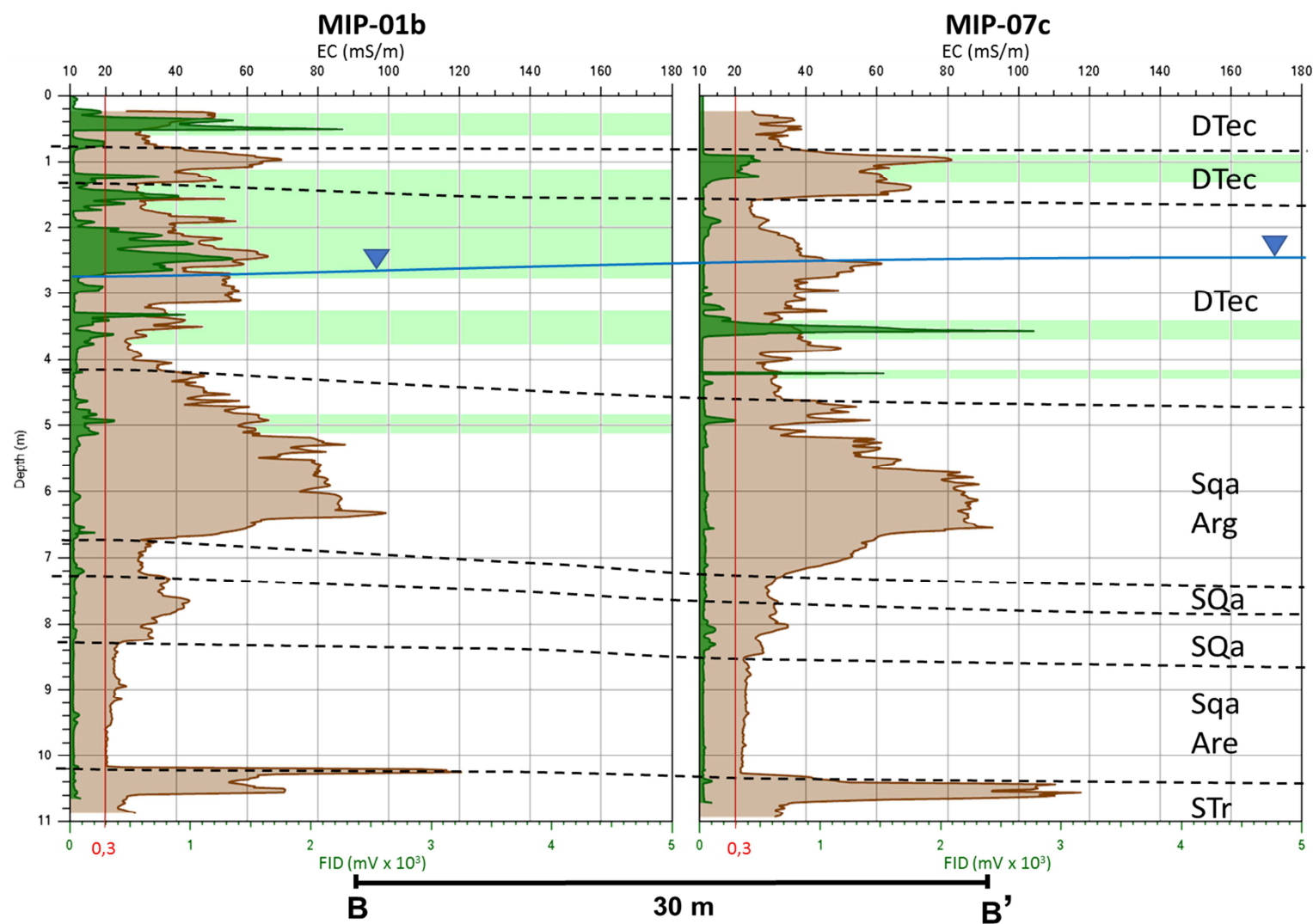
Para uma análise integrada dos resultados, os perfis do detector FID foram sobrepostos aos do sensor EC, compondo duas seções esquemáticas, A-A' e B-B', conforme apresentado nas **Figuras 30 e 31**. Nessas seções foram utilizados os resultados dos ensaios com a sonda aquecida, devido às melhores respostas obtidas.

Figura 30. Seção esquemática A-A', com a sobreposição dos resultados do detector FID e do sensor EC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31. Seção esquemática B-B', com a sobreposição dos resultados do detector FID e do sensor EC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas seções apresentadas, pode-se observar que os picos do detector FID são maiores, tanto em quantidade (número de picos), com em espessura e comprimento (intensidade), nas camadas de intercalações de feições grossas e finas do perfil do EC, entre 1,0 e 4,0 m de profundidade. Essas camadas foram relacionadas aos depósitos tecnogênicos, compostos pelos materiais de dragagem depositados na área de estudo. Picos menores também podem ser observados nas camadas mais superficial de aterro, em feições de texturas grossas intercaladas com feições de texturas finas. Adicionalmente, alguns picos expressivos foram constatados em intercalações de texturas relativamente “grossas”, entre 4,5 e 5,5 m (aproximadamente), em meio à grande camada de textura “fina”, associada à fácies argilosa dos SQa, bem como na fina camada de textura “grossa”, localizada logo abaixo, em profundidades variando entre 6,2 e 7,6 m.

Estes resultados foram interpretados como acumulações de metano em camadas com intercalações de feições grossas e finas, o que possivelmente cria condições favoráveis para a acumulação de biogás em ambientes metanogênicos. Tal padrão litoestratigráfico tende a criar restrições ao transporte vertical do metano em direção à superfície, promovendo o aumento de concentração, e, conseqüentemente, da pressão e do volume acumulado sob camadas de baixa permeabilidade, ao mesmo tempo que reduz a penetração de oxigênio atmosférico no subsolo, limitando a atuação das bactérias metanotróficas no consumo do CH₄.

No entanto, os resultados obtidos com a sonda MIP são indiretos e semiquantitativo, sendo, portanto, necessária a aplicação de ferramentas auxiliares que possibilitem a confirmação destas hipóteses, conforme apresentado a seguir.

6.4 Ensaios de campo com o sistema SCOST

Os ensaios com o sistema SCOST possibilitaram a obtenção de perfis de cores em alta resolução do subsolo, nos *clusters* P1 (SCOST-02) e P7 (SCOST-01b), conforme apresentado no **Apêndice B**. Estes perfis foram comparados com a Carta de Munsell para cores do solo, pela qual foram delimitadas as principais camadas, com base nas faixas de cores identificadas, bem como no perfil de condutividade elétrica gerado, conforme apresentado, respectivamente, nas **Figuras 32 e 33**.

Essas camadas foram inicialmente interpretadas, buscando-se correlacionar as cores com possíveis características geoquímicas do subsolo, bem como às interpretações da litoestratigrafia, obtidas pelo sensor EC da sonda MIP. Posteriormente, os resultados foram comparados com as demais técnicas de investigação, auxiliando na interpretação e na elaboração do modelo conceitual da área de estudo.

Foi verificado um pequeno deslocamento nos perfis do EC do SCOST, de aproximadamente 25 cm para baixo, que foi corrigido com base nos perfis elétricos obtidos pelo MIP, tornando mais precisa a correlação destes perfis com as camadas delimitadas pelas cores.

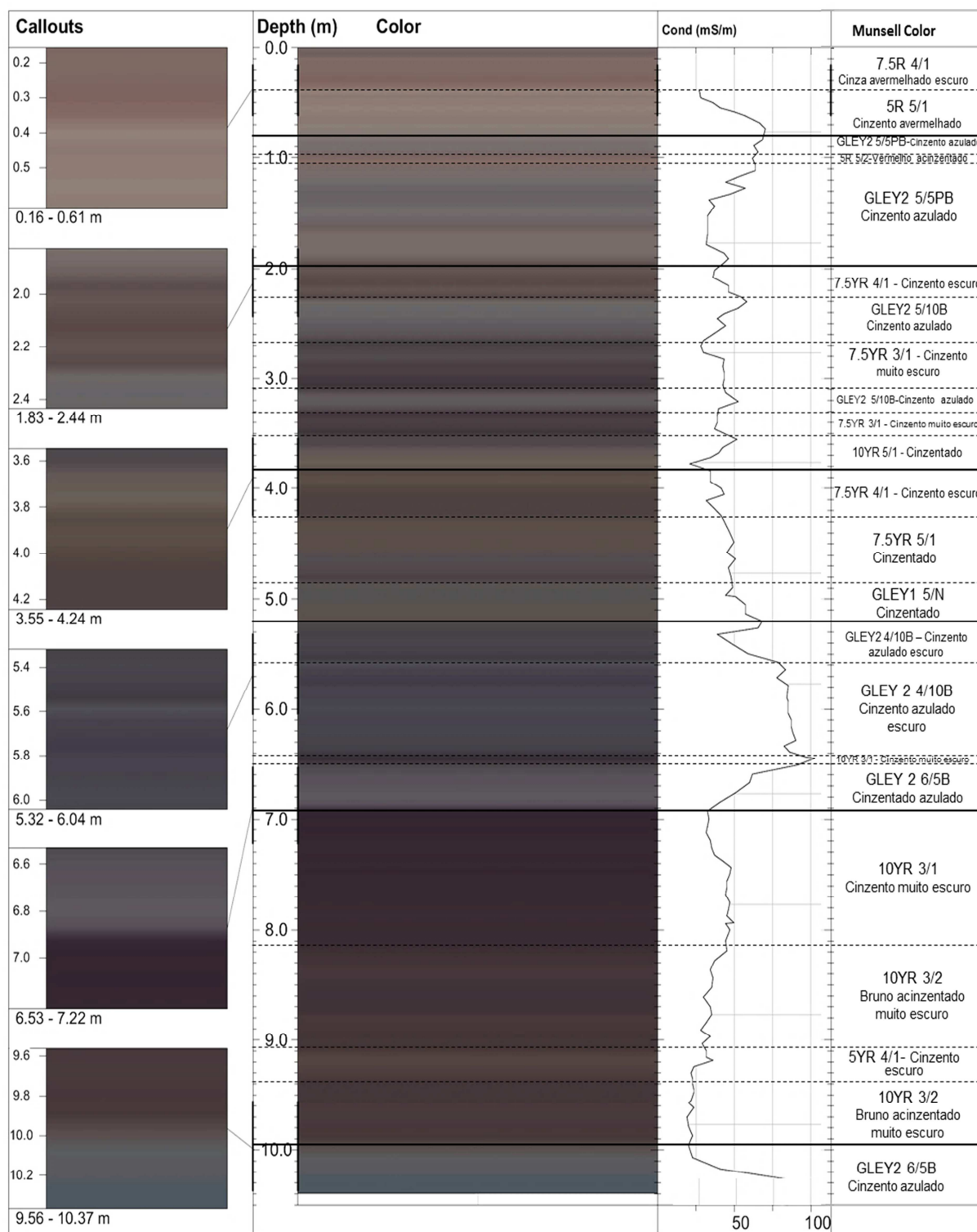
As cores predominantes foram as cinzentas, das matizes neutras, principalmente GLEY 2, com cinzas escuros ou azulados, intercaladas com matizes 5R, 7.5R, 5YR, 7.5YR, 10YR, de tonalidades cinza amarronzadas ou avermelhadas e cinza escuro.

Nas camadas mais superficiais, até aproximadamente 0,8m de profundidade, foram observadas cores avermelhadas, entre cinza avermelhado escuro a vermelho acinzentadas. Abaixo disso, observam-se as intercalações de tonalidades de cinza, variando entre azulado e avermelhado, geralmente com valores (brilho) intermediários, entre 4 e 6, até uma profundidade média de 5,5 m.

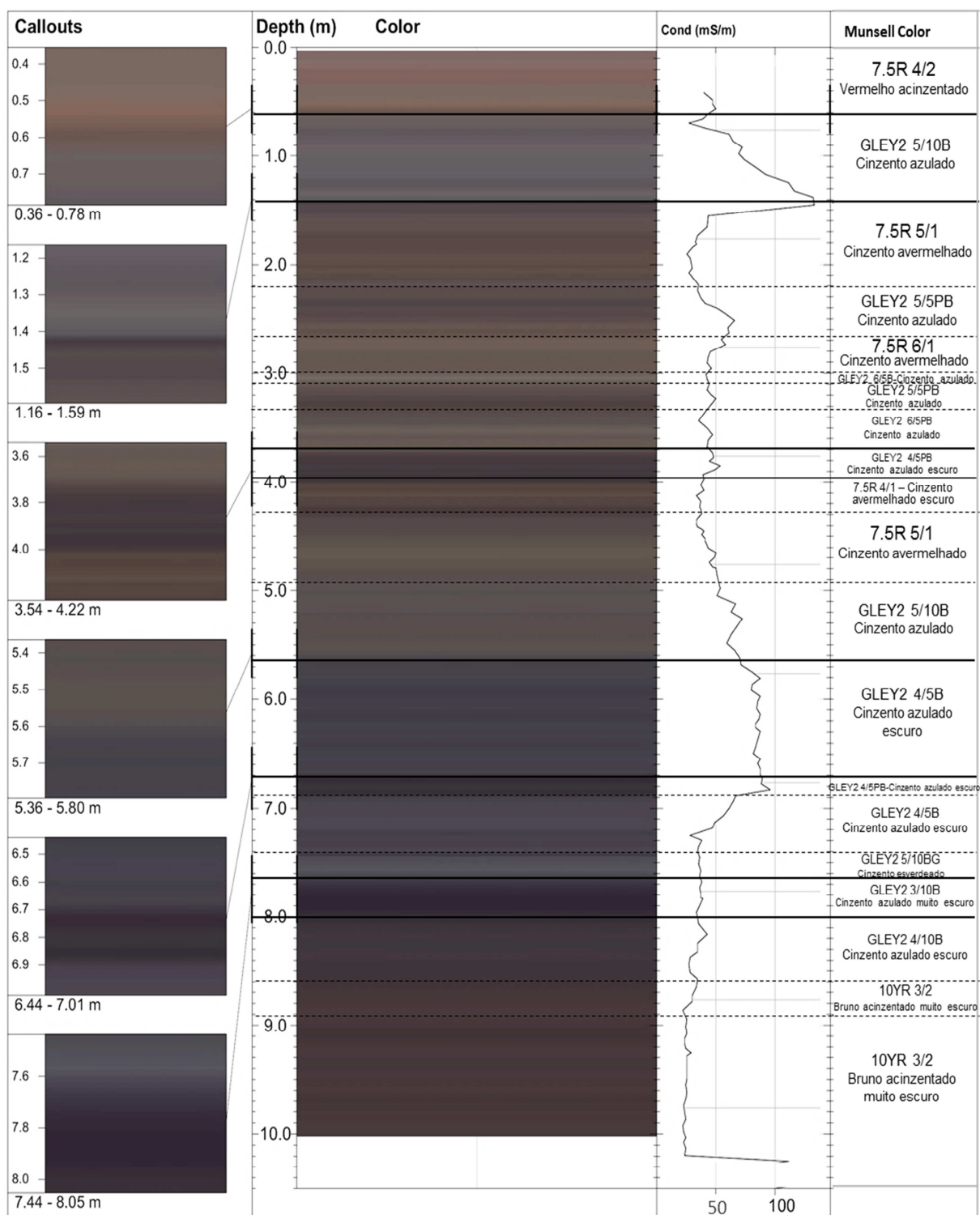
Entre 5,5 m até 7,0 ou 7,6 m, observa-se uma espessa camada de matiz GLEY 2, de cores cinza azulada e brilho entre 4 e 5, intercalada com uma fina camada cinzenta muito escura. Abaixo dessas camadas, observa-se uma espessa camada (até aproximadamente 8,4 m) cinzenta azulada escura ou muito escura, a cinzenta muito escura, com valores entre 3 e 4, nas matizes GLEY 2 e 10YR.

Abaixo de 8,4 m (em média), observam-se camadas espessas de cores bruno acinzentadas, nas matizes 10YR e 5YR, com valores variando entre 4 e 3 (escuro a muito escuro) e croma entre 1 e 2. Essa camada foi delimitada em profundidade no ensaio SCOST-02 (o ensaio SCOST-01b encerrou antes) por uma transição bastante nítida em 10,0 m de profundidade, para uma cor cinzenta azulada (GLEY 2), com brilho 6 e croma 5B.

Figura 32. Perfil do ensaio SCOST-02, com a delimitação das principais camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33. Perfil do ensaio SCOST-01b, com a delimitação das principais camadas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa delimitação de camadas pode ser nitidamente correlacionada com os perfis elétricos obtidos pelo sensor EC do SCOST, que por sua vez são muito parecidos com os perfis elétricos obtidos nos ensaios da sonda MIP. Dessa forma, mesmo que de modo aproximado e com algumas incertezas, pode-se relacionar as camadas de cores com as feições litológicas da área de estudo, analogamente ao que foi executado para os perfis do sensor EC do MIP no Item 6.3.1.

Neste contexto, as camadas superficiais, de cores cinza avermelhadas, e as camadas intercaladas abaixo, de cores cinza azuladas, avermelhadas e cinza escuras, até a profundidade média de 5,5 m, podem ser associadas com as camadas de materiais de dragagem (DTec), enquanto que a camada abaixo, de cor cinza azulada escura, até a profundidades médias de 7,5 m, pode ser associada com a fácies argilosa dos SQa. No entanto, assim como nos perfis do EC, o limite entre esses estratos não pode ser definido com certeza, pois os materiais apresentam características de cores muito próximas, por possuírem a mesma origem e estarem sujeitos ao mesmo ambiente hidrogeoquímico.

As camadas delimitadas abaixo, entre 7,5 e 10,0 m, de cores cinzento escuro, cinzento azulado escuro a muito escuro e bruno acinzentado muito escuro, podem ser associadas às feições elétricas denominadas “transição” e “grossa”, relacionadas à fácies arenosa dos SQa. No entanto, a correlação das cores escuras com as possíveis texturas grossas não é óbvia, demandando uma análise com outros métodos, conforme apresentado adiante. Abaixo dos 10 m, a cor cinzenta azulada (mais clara) pode ser diretamente atribuída aos sedimentos terciários.

Segundo CA-EPA (2012), a caracterização das cores do solo pela Carta de Munsell pode ser utilizada para identificação de solos hidromórficos, potencialmente afetados pela presença de metano, possibilitando inferir as suas condições de drenagem e estado de oxirredução, bem como para identificar camadas ricas em matéria orgânica e potenciais fontes geradoras de biogás. Neste contexto, os perfis obtidos pelo SCOST indicam, já no primeiro metro do subsolo da área de estudo, um incremento nas condições redutoras, marcado pela transição de camadas relativamente avermelhadas (provável presença de oxigênio), para uma sequência litoestratigráfica de cores cinza a cinza azulada, mais ou menos escuras, e bruno acinzentado muito escuro.

Adicionalmente, a presença de cores escuras a muito escuras, principalmente nas camadas abaixo de 5,5 m de profundidade, pode ser um indicativo de maiores

concentrações de matéria orgânica, o que poderia favorecer a atividade metanogênica. No entanto, ressalta-se novamente que essas correlações são indiretas, e devem ser confirmadas pela comparação com métodos analíticos diretos, conforme apresentado a seguir.

6.5 Medições de gases nos furos de sondagens e amostragens discretas pelo sistema PRT

As medições de gases na boca dos furos de sondagem foram executadas em pelo menos um dos ensaios realizados em cada *cluster*, alguns minutos após a sua finalização, visando uma simples avaliação qualitativa da presença de biogás. As maiores leituras obtidas são apresentadas na **Tabela 18**.

Tabela 18. Maiores leituras de biogás obtidas na boca dos furos de sondagem.

Ensaio	Cluster	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Balance (%)
MIP-01a	P1	4,1	1,5	20,4	74,0
MIP-02a	P2	10,8	3,0	18,5	67,7
MIP-03a	P3	5,4	1,5	19,6	73,5
MIP-03b	P3	19,2	2,7	16,6	61,5
MIP-04b	P4	11,3	2,3	18,3	68,1
MIP-05b	P5	31,0	6,1	13,1	49,8
MIP-06a	P6	40,5	12,7	4,8	42,0
MIP-06b	P6	40,4	14,5	2,8	42,3
MIP-07a	P7	31,1	7,6	12,0	49,3
MIP-07c	P7	25,1	8,1	12,3	54,5
SCOST-01B	P7	7,4	1,6	19,6	71,4
PRT-01A	P1	16,7	10,0	10,4	62,9
PRT-02A	P2	9,2	4,7	15,0	71,1
PRT-02B	P2	19,7	6,3	10,4	63,6
SDP-01	P1	3,4	1,5	19,8	75,3
SDP-07	P7	28,8	7,7	11,7	51,8

Esse procedimento, juntamente com as amostragens pelo sistema PRT, possibilitou a confirmação da presença de biogás no subsolo em toda a área de estudo, corroborando o modelo conceitual apresentado em estudos anteriores.

Com relação à amostragem pelo sistema PRT, foi realizada visando a comparação com os resultados da sonda MIP, de modo a avaliar se esses poderiam ser confirmados por análises diretas com o equipamento de detecção de biogás. Dessa forma, as profundidades de amostragem foram selecionadas com base nos

picos de resposta do detector FID, tanto com a sonda na temperatura ambiente, como aquecida.

A **Tabela 19** apresenta a referência dos ensaios MIP e dos respectivos picos de respostas do detector FID (FID_{max}), utilizados na seleção das profundidades de amostragem, bem como os resultados das maiores leituras de CH_4 em cada ponto.

Tabela 19. Principais resultados da amostragem de gases do solo pelo sistema PRT.

Amostragem PRT (profundidade)	Ensaio MIP e FID_{max} de referência	CH_4 (%)	CO_2 (%)	O_2 (%)	Balance (%)	% do LIE	CO (ppm)	H_2S (ppm)	BP* (mbar)	RP** (mbar)
PRT-01A (1,2-1,5 m)	MIP-01a: 1704 mV MIP-01b: 741 mV	34,0	19,4	0,2	46,4	680	0	18	919	201,48
PRT-01B (3,4-3,8 m)	MIP-01a: 194 mV MIP-01b: 904 mV	76,6	20,4	0,4	2,6	1532	0	7	919	0,02
PRT-01C (0,5-0,8 m)	MIP-01a: 139 mV MIP-01b: 2271 mV	0,7	15,9	0,8	82,6	14	2	0	918	1,78
PRT-02A (2,2-2,5 m)	MIP-02a: 93 mV MIP-02b: 410 mV	33,2	7,8	13,8	45,2	664	3	1	920	5,08
PRT-02B (3,35-3,65 m)	MIP-02a: 64 mV MIP-02b: 2085 mV	42,9	11,0	9,6	36,5	858	3	0	920	-301,51
PRT-07A (1,7-2,0 m)	MIP-07b: 81 mV MIP-07c: 173 mV	0,4	0,0	21,2	78,4	8	40	0	921	-0,09
PRT-07B (0,8-1,1 m)	MIP-07a: 55 mV MIP-07c: 504 mV	0,6	16,0	4,9	78,5	12	1	0	921	-6,83

*Pressão barométrica; ** Pressão relativa (medida na amostragem).

A comparação das maiores respostas do FID-MIP com as maiores leituras de CH_4 do medidor portátil mostra, no geral, uma fraca correlação entre os dados ($R^2 = 1,11\%$), principalmente devido aos resultados das amostras PRT-01B, PRT-01C e PRT-02A. Se fossem consideradas apenas as amostras PRT-01A, PRT-02B, PRT-07A e PRT-07B, a correlação seria fortíssima ($R^2 = 97,95\%$).

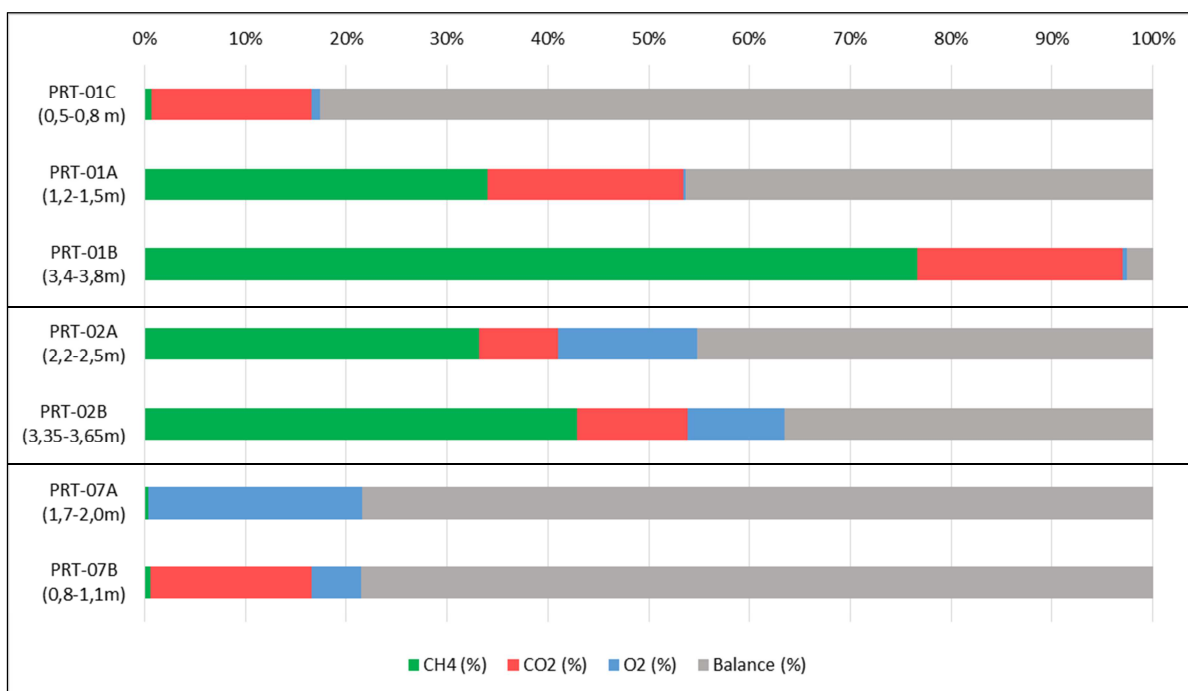
Esses resultados podem ser explicados pela natureza dinâmica dos gases no subsolo, principalmente nas camadas mais rasas, que podem ser rapidamente influenciadas por fatores climáticos, como pluviosidade, temperatura e pressão atmosférica, uma vez que as amostras não foram coletadas no mesmo dia que os ensaios de MIP (até 6 dias depois). Um exemplo claro foi o baixo teor de CH_4 no PRT-01C, realizado na profundidade de 0,5 a 0,8 m, com apenas 0,7%, enquanto que o ensaio MIP-01b apresentou um pico de FID de 2271 mV na mesma

profundidade. Esse resultado foi associado à suposta mudança nas condições de umidade do solo, pois, conforme discutido no Item 6.3.2, a ocorrência de um grande volume de chuva no dia anterior ao ensaio MIP-01b pode ter contribuído para a saturação e impermeabilização das camadas superficiais ao escape dos gases, provocando o acúmulo de biogás. Para uma comparação representativa, de fato, as amostragens com o sistema PRT deveriam ter sido realizadas logo após a realização de cada ensaio do MIP.

Quanto às medidas de pressão dos gases, apenas o ensaio PRT-01A apresentou um valor significativo (201,5 mbar), indicando possível pressurização do biogás nessa camada. O ensaio PRT-02B apresentou uma rápida exaustão do gás com o bombeamento do aparelho de medição, implicando no bombeamento de água subterrânea pelas mangueiras, e, conseqüentemente, um valor de pressão negativa (-301,5 mbar $\approx$ -3,07 mca). Os demais pontos apresentaram baixas pressões.

A análise da composição dos gases do solo pode fornecer ainda informações importantes para o estudo, tanto em relação à dinâmica do biogás no subsolo, quanto em relação ao próprio procedimento de amostragem com o sistema PRT. A **Figura 34** mostra a composição das amostras obtidas. Os resultados de monóxido de carbono (CO) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) não foram avaliados.

Os resultados mostram um gradiente de concentração do metano no *Cluster* P1, com concentrações variando de 0,7%, próximo à superfície (0,5 a 0,8 m), até 76,6% de CH₄ entre 3,4 e 3,8 m, o que corresponderia a uma composição, praticamente, de biogás em fase livre (76,6% de CH₄ e 20,4% de CO₂). Esses resultados indicam que, provavelmente, as fontes geradoras do CH₄ encontram-se em profundidades maiores ou iguais à camada mais funda amostrada e que as concentrações são atenuadas em direção à superfície. Provavelmente, a camada de textura “fina”, existente por volta de 1,0 m, está atuando como um “selo”, proporcionando o confinamento do biogás. Já a amostra entre 0,5 e 0,8 m indica que a atmosfera do solo se encontra praticamente anóxica, apesar da baixa concentração de CH₄, que provavelmente está sendo oxidado pela atividade metanotrófica.

Figura 34. Composição das amostras de gases do solo obtidas pelo sistema PRT.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mesmo gradiente é observado no *Cluster* P2. No entanto, a presença de oxigênio indica uma provável contaminação cruzada com o ar atmosférico, o que também foi observado, em maior ou menor grau, nas demais amostras. Uma possível explicação pode ser associada à não utilização dos anéis de vedação (*O-ring*) nas ponteiros de cravação, o que prejudicou a estanqueidade da amostragem.

Quanto ao *Cluster* P7, as baixas concentrações de CH₄ corroboraram com os baixos níveis de resposta obtidos pela sonda MIP.

6.6 Descrições litológicas e resultados das análises laboratoriais

Na amostragem de solos pelo método de sondagens *direct push* (SDP), alguns amostradores *liners* apresentaram defasagem de recuperação dos testemunhos, o que é uma limitação comum deste método, conforme relatado por autores como Riyis (2012) e USEPA (2016). As taxas de recuperação variaram de 53% a 100% (média de 81%) na sondagem SDP-01, 67% a 97% (média de 82%) na sondagem SDP-05, e 74% a 100% (média de 92%) para a sondagem SDP-07. Os

amostradores de maior diâmetro (DT325) tiveram uma média de recuperação de 91%, enquanto que os de menor diâmetro (DT22) tiveram uma média de 84%.

Considerando que todos os *liners* utilizados possuíam retentores de amostra (*core catchers*), essas defasagens foram basicamente associadas à: compactação e deformação das amostras no interior dos *liners*; à coleta incompleta de solos muito moles (e.g. argilas orgânicas) ou de areias finas (eventualmente “liquefeitas”); ou ainda, à limitação de amostragem de areias compactadas, cascalhos e seixos, com o amostrador de menor diâmetro (DT22), na profundidade aproximada de 9 a 10 m.

Neste contexto, as descrições tátil visuais, realizadas em laboratório, foram posteriormente comparadas com os perfis elétricos obtidos pela sonda MIP e com os perfis de cores do sistema SCOST, possibilitando a correção de eventuais incertezas na definição da litoestratigrafia da área. Os perfis corrigidos, com as respectivas simbologias texturais, são apresentados no **Apêndice C**.

Com base nessas correções, realizou-se também a adequação das profundidades das amostras de solo enviadas para análises laboratoriais. Os resultados dessas análises também contribuíram para refinar o modelo conceitual da área de estudo.

As **Tabelas 20, 21 e 22** apresentam os resultados das análises granulométricas dos pontos SDP-01, SDP-05, e SDP-07, respectivamente. Estes resultados foram representados em perfil, conforme apresentado na **Figura 35**.

Tabela 20. Resultados das análises granulométricas do ponto SDP-01.

Intervalos amostrais (m)	Pedregulho Grosso (%)	Pedregulho Fino (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação NBR 6502
	$\varnothing > 4,8 \text{ mm}$	$4,8 > \varnothing > 2,0 \text{ mm}$	$2,0 > \varnothing > 0,6 \text{ mm}$	$0,6 > \varnothing > 0,2 \text{ mm}$	$0,2 > \varnothing > 0,06 \text{ mm}$	$0,06 > \varnothing > 0,002 \text{ mm}$	$\varnothing < 0,002 \text{ mm}$	
0,40-0,55	0,0	3,1	9,1	22,8	36,5	16,3	12,2	Areia fina a média siltosa
0,75-0,90	0,0	0,2	0,4	1,4	4,5	52,5	41,0	Silte argilosa
1,45-1,65	0,0	0,2	0,4	6,4	58,0	27,3	7,7	Areia fina siltosa
1,82-2,05	0,0	0,1	0,4	1,6	8,0	64,0	26,0	Silte argilosa
2,40-2,60	13,2	6,2	11,2	31,4	19,5	9,5	9,0	Areia fina a média com pedregulho grosso
2,80-3,05	0,0	4,6	29,9	9,5	15,0	12,0	29,0	Areia grossa argilosa
3,46-3,60	0,0	6,5	12,2	34,2	25,0	9,0	13,0	Areia argilosa
3,80-3,95	0,0	11,0	10,7	31,3	31,0	9,2	6,8	Areia fina a média com pedregulhos finos
4,05-4,20	0,0	0,2	0,6	4,1	55,0	19,0	21,0	Areia fina argilo siltosa
4,20-4,40	0,0	0,3	0,2	1,5	15,0	57,0	26,0	Silte argilosa com areia fina
4,80-5,00	0,0	0,0	0,1	1,9	39,0	29,0	30,0	Areia fina argilo siltosa
5,25-5,45	0,0	0,1	0,1	0,2	0,7	42,4	56,5	Argila siltosa
5,75-6,00	0,0	0,0	0,3	0,7	8,0	59,0	32,0	Silte argilosa
6,25-6,40	0,0	0,1	0,2	0,4	31,3	35,5	32,5	Silte argilosa com areia fina
6,50-6,70	0,0	0,2	20,5	6,3	2,0	40,6	30,4	Silte argilosa com areia grossa
7,75-7,80	0,0	0,0	0,0	0,5	11,5	20,0	68,0	Argila siltosa com areia fina
8,20-8,40	0,0	0,0	0,3	19,7	47,0	12,0	21,0	Areia fina argilosa
8,80-9,00	0,0	0,0	0,1	12,9	46,0	15,5	25,5	Areia fina argilosa
9,30-9,50	0,0	0,0	12,4	70,6	12,4	2,4	2,2	Arenosa
9,60-9,73	0,0	29,1	6,7	26,1	26,0	9,1	2,9	Areia com pedregulhos finos
9,73-9,88	68,6	2,4	10,0	10,0	6,5	1,9	0,6	Pedregulho grosso com areia
10,30-10,40	0,0	0,0	0,0	5,0	28,0	15,0	52,0	Argila areno siltosa
10,45-10,60	0,0	0,0	1,7	26,3	46,0	18,0	8,0	Areia siltosa

Tabela 21. Resultados das análises granulométricas do ponto SDP-05.

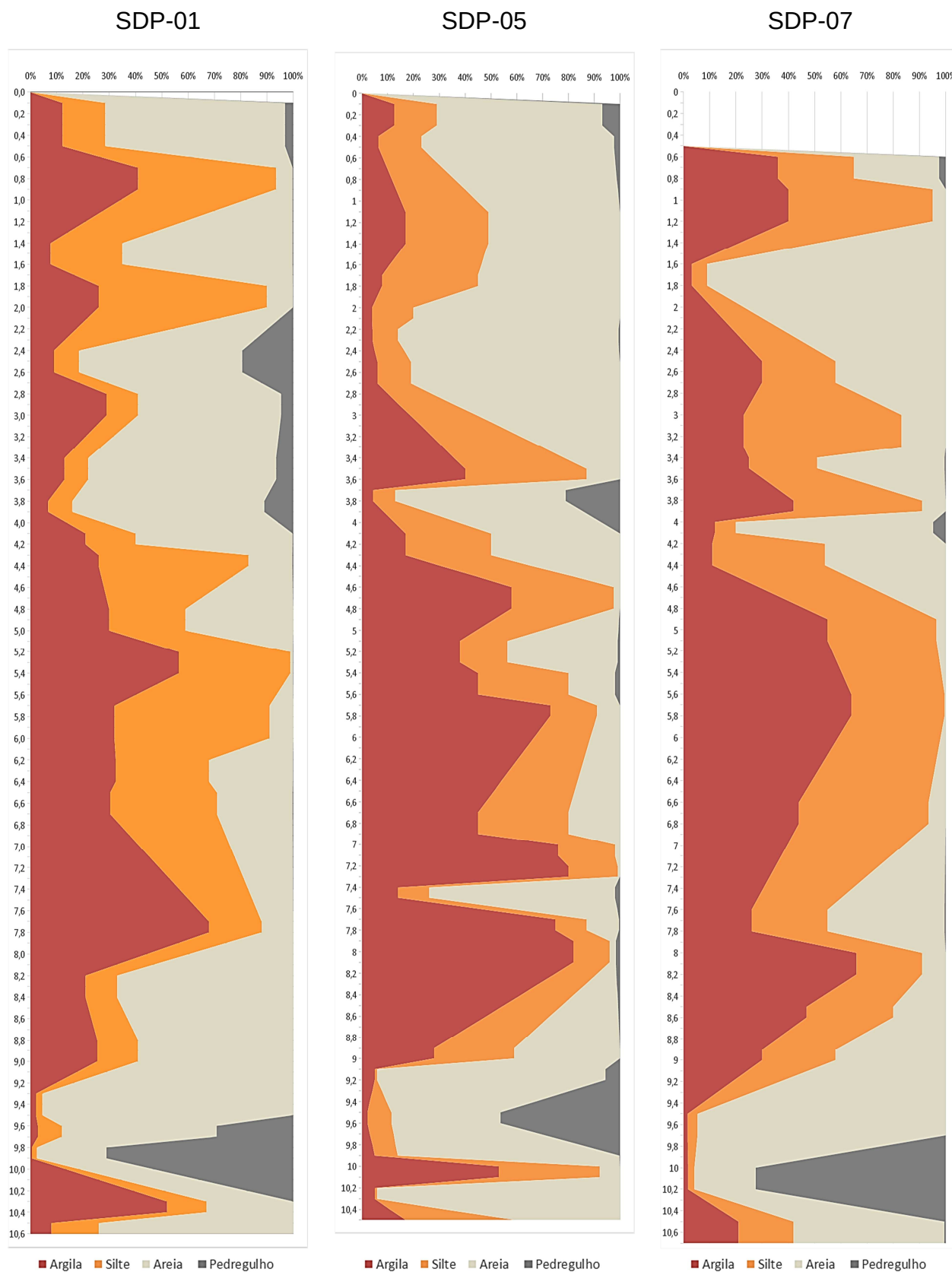
Intervalos amostrais (m)	Pedregulho Grosso (%)	Pedregulho Fino (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação NBR 6502
	$\varnothing > 4,8 \text{ mm}$	$4,8 > \varnothing > 2,0 \text{ mm}$	$2,0 > \varnothing > 0,6 \text{ mm}$	$0,6 > \varnothing > 0,2 \text{ mm}$	$0,2 > \varnothing > 0,06 \text{ mm}$	$0,06 > \varnothing > 0,002 \text{ mm}$	$\varnothing < 0,002 \text{ mm}$	
0,20-0,30	0,0	6,9	12,2	21,9	30,0	16,5	12,5	Areia fina a média siltosa
0,40-0,55	0,0	2,4	7,6	37,0	30,0	16,5	6,5	Areia média a fina siltosa
0,70-0,80	0,0	0,0	1,1	28,9	54,0	10,0	6,0	Areia fina a média
1,10-1,40	0,0	0,0	0,3	3,7	47,0	32,0	17,0	Areia fina silto argilosa
1,75-1,85	0,0	0,0	0,9	5,1	49,0	37,2	7,8	Areia fina siltosa
2,05-2,20	0,0	0,0	0,5	7,5	72,0	16,0	4,0	Areia fina siltosa
2,20-2,35	0,0	0,5	9,5	37,0	39,0	9,8	4,2	Areia fina a média
2,50-2,75	0,0	0,1	1,7	17,1	62,0	13,0	6,0	Areia fina a média siltosa
3,50-3,65	0,0	0,0	0,3	0,5	12,2	47,0	40,0	Silte argiloso
3,65-3,80	17,3	3,8	10,2	30,7	25,0	8,7	4,3	Areia média a fina com pedregulho grosso
4,10-4,30	0,0	0,1	1,0	6,9	42,0	33,0	17,0	Areia fina a média argilosa
4,65-4,85	0,0	0,0	0,6	0,8	1,1	39,5	58,0	Argila siltosa
5,10-5,30	0,0	0,9	5,9	15,1	21,6	18,4	38,0	Argila areno siltosa
5,45-5,70	0,0	1,9	5,2	7,9	5,0	35,0	45,0	Argila silto arenosa
5,70-5,80	0,0	0,0	3,1	2,9	3,0	18,0	73,0	Argila siltosa
6,70-6,90	0,0	0,0	6,6	8,4	5,0	35,0	45,0	Argila silto arenosa
7,00-7,20	0,0	0,0	0,0	0,2	1,8	22,0	76,0	Argila siltosa
7,20-7,35	0,0	0,0	0,1	0,2	0,7	19,0	80,0	Argila siltosa
7,35-7,50	0,0	1,9	9,7	23,5	39,0	12,0	14,0	Areia fina a média argilosa
7,70-7,80	0,0	0,4	1,0	2,6	9,0	12,0	75,0	Argila silte arenosa
7,80-8,10	0,0	1,6	0,1	0,3	2,0	14,0	82,0	Argila siltosa
8,90-9,05	0,0	0,0	0,4	5,6	35,0	31,0	28,0	Areia fina silto argilosa
9,05-9,20	0,0	5,6	61,7	0,0	26,7	1,0	5,0	Arenosa
9,50-9,65	27,7	18,5	35,2	5,6	1,5	9,2	2,3	Areia grossa com pedregulho grosso a fino
9,90-10,00	0,0	0,2	0,9	25,9	59,0	9,0	5,0	Areia fina a média
10,00-10,20	0,0	0,0	1,0	1,0	6,0	39,0	53,0	Argila siltosa
10,20-10,30	0,0	0,0	0,2	67,1	26,7	1,0	5,0	Areia média a fina
10,50	0,0	0,0	0,1	2,9	38,0	42,0	17,0	Silte com areia fina argiloso

Tabela 22. Resultados das análises granulométricas do ponto SDP-07.

Intervalos amostrais (m)	Pedregulho Grosso (%)	Pedregulho Fino (%)	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação NBR 6502
	$\varnothing > 4,8 \text{ mm}$	$4,8 > \varnothing > 2,0 \text{ mm}$	$2,0 > \varnothing > 0,6 \text{ mm}$	$0,6 > \varnothing > 0,2 \text{ mm}$	$0,2 > \varnothing > 0,06 \text{ mm}$	$0,06 > \varnothing > 0,002 \text{ mm}$	$\varnothing < 0,002 \text{ mm}$	
0,66-0,88	0,0	2,5	6,1	14,4	12,0	29,0	36,0	Argila silto arenosa
0,88-1,20	0,0	0,0	0,5	0,5	4,0	55,0	40,0	Silte argilosa
1,60-1,80	0,0	0,0	17,5	32,5	41,0	5,8	3,2	Arenosa
2,50-2,70	0,0	0,0	0,1	0,9	41,0	28,0	30,0	Areia fina argilo siltosa
3,05-3,25	0,0	0,0	0,2	0,8	15,8	60,2	23,0	Silte argiloso
3,35-3,55	0,0	0,4	1,6	15,0	32,0	26,0	25,0	Areia fina silto argilosa
3,80-3,92	0,0	0,0	0,2	0,8	8,0	49,0	42,0	Silte argilosa
3,95-4,10	0,0	4,8	9,7	30,6	35,0	8,0	12,0	Areia fina a média
4,24-4,45	0,0	0,0	0,3	3,7	42,0	43,0	11,0	Siltosa com areia fina
4,95-5,15	0,0	0,0	0,0	0,2	3,3	41,6	54,9	Argila siltosa
5,66-5,80	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	35,6	64,0	Argila siltosa
6,60-6,80	0,0	0,0	0,1	0,2	6,2	49,5	44,0	Silte argilosa
7,55-7,80	0,0	0,4	23,4	12,7	8,5	29,0	26,0	Silte argilosa com areia grossa
8,00-8,25	0,0	0,0	1,3	1,7	6,0	25,0	66,0	Argila siltosa
8,50-8,65	0,0	0,0	2,5	3,5	14,0	33,0	47,0	Argila silto arenosa
8,85-9,00	0,0	0,0	39,8	43,2	11,6	3,8	1,6	Arenosa
9,50-9,70	0,0	0,0	0,1	0,9	41,0	28,0	30,0	Areia fina argilo siltosa
10,05-10,20	61,8	10,6	10,1	5,5	7,8	2,4	1,8	Pedregulhos grossos a finos com areia grossa
10,55-10,65	0,0	0,5	15,2	18,3	24,0	21,0	21,0	Areia fina silto argilosa

Aproximadamente 60% das descrições tátil visuais concordaram exatamente com a classificação laboratorial e 34% concordaram parcialmente. Apenas 6% apresentaram discordância, provavelmente, devido aos problemas associados à defasagem na recuperação das amostras. Estes erros, no entanto, foram pontuais e foram corrigidos na consolidação do modelo conceitual litoestratigráfico.

Figura 35. Perfis granulométricos das sondagens *direct push*.



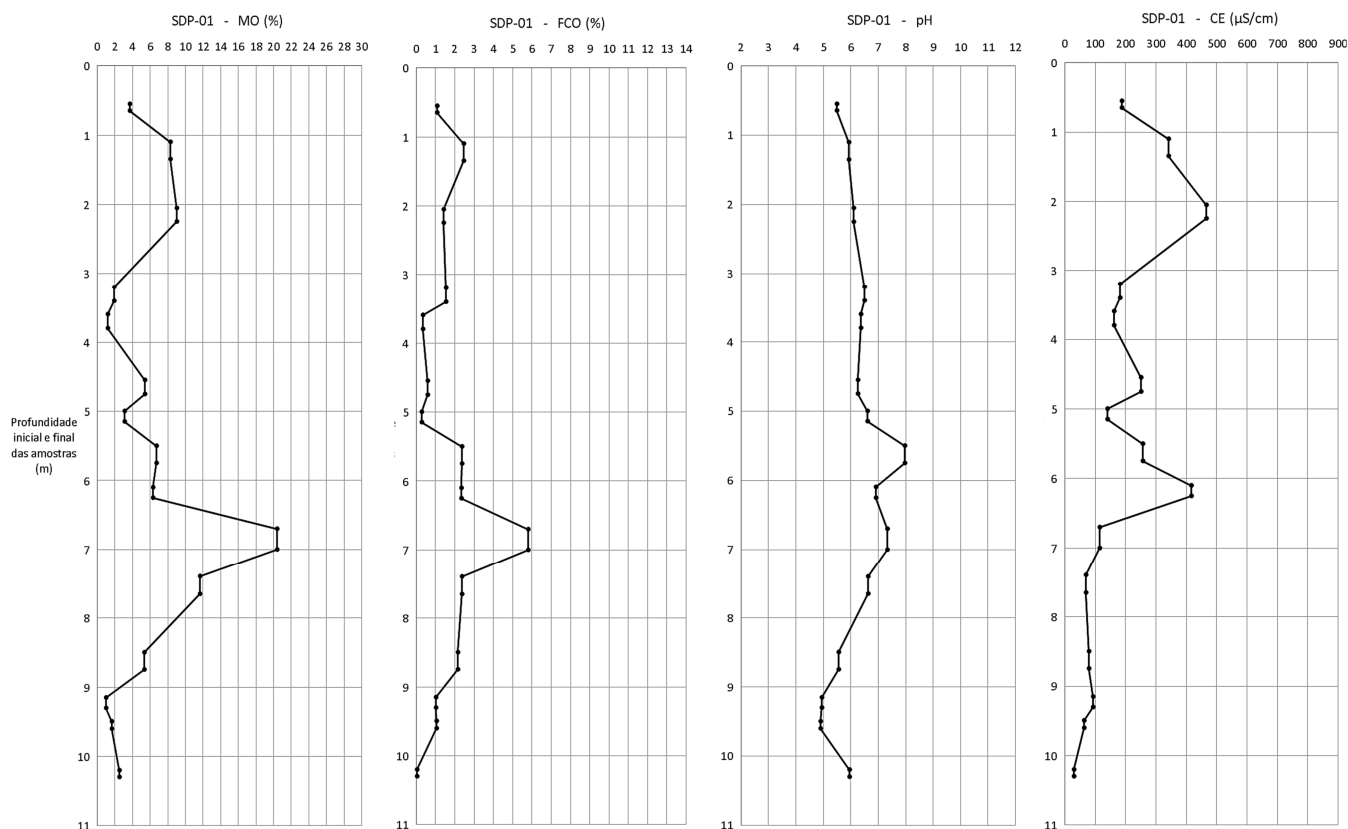
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto aos demais ensaios de caracterização geoquímica, os resultados são apresentados abaixo, na forma de tabelas e perfis. Os resultados do ponto SDP-01 são apresentados na **Tabela 23** e na **Figura 36**.

Tabela 23. Resultados dos ensaios de caracterização geoquímica do ponto SDP-01.

Intervalos amostrais (m)	MO (%)	FCO (%)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)
0,55 - 0,65	3,67	1,08	5,49	187
1,10 - 1,35	8,30	2,45	5,93	342
2,05 - 2,25	8,99	1,41	6,09	466
3,20 - 3,40	1,92	1,52	6,49	182
3,60 - 3,80	1,20	0,33	6,37	162
4,55 - 4,75	5,42	0,58	6,26	252
5,00 - 5,15	3,13	0,27	6,60	140
5,50 - 5,75	6,75	2,37	7,97	257
6,10 - 6,25	6,31	2,34	6,91	416
6,70 - 7,00	20,42	5,81	7,33	115
7,40 - 7,65	11,63	2,38	6,62	69
8,50 - 8,75	5,32	2,15	5,55	80
9,15 - 9,30	1,16	1,03	4,93	93
9,50 - 9,60	1,66	1,05	4,89	64
10,20 - 10,30	2,48	0,03	5,95	29

Figura 36. Perfis dos resultados de caracterização geoquímica do ponto SDP-01.



Fonte: Elaborado pelo autor.

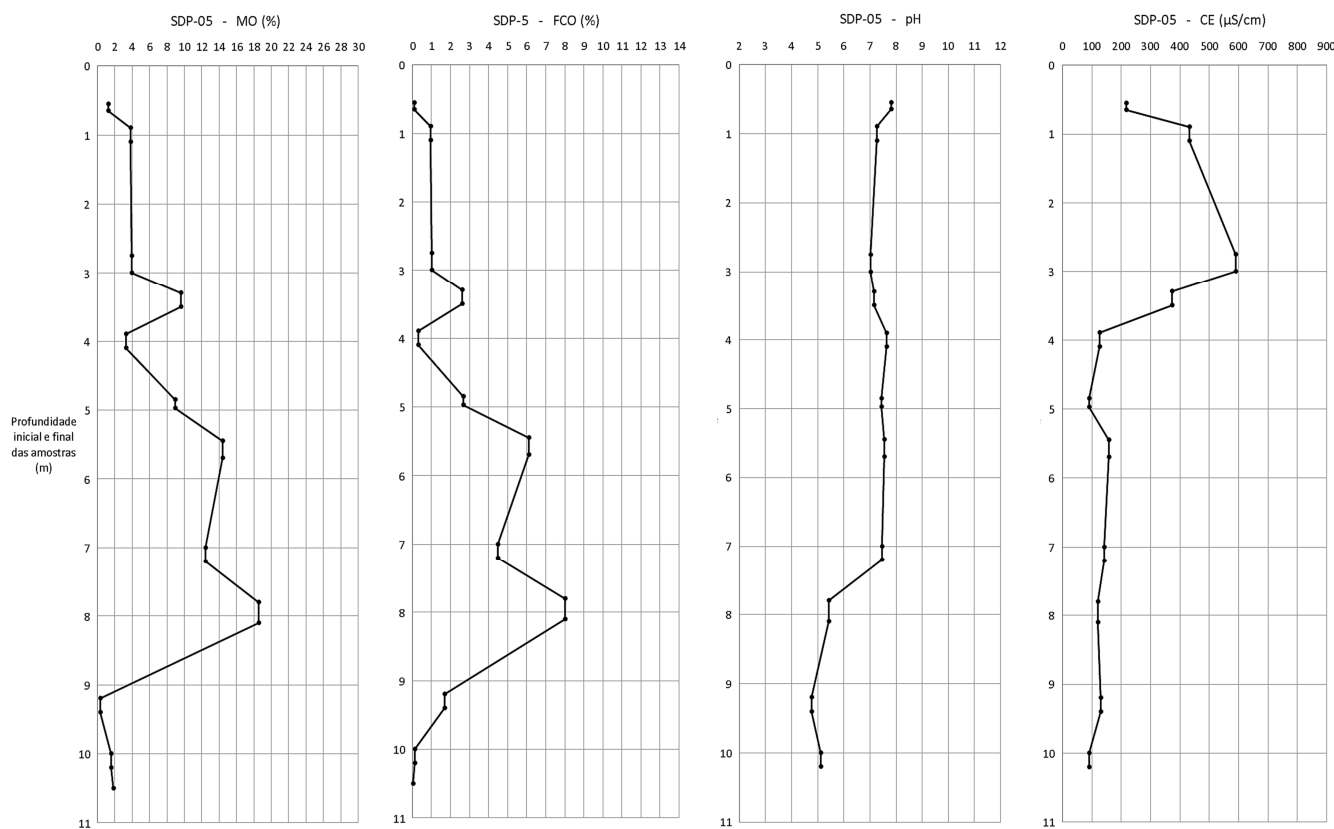
As amostras do ponto SDP-01 apresentaram teores de MO entre 0,98% e 20,42%, e teores de FCO entre 0,03% e 5,81%, com uma forte correlação entre estes parâmetros ($R = 0,89$). Os maiores teores foram detectados na amostra de 6,7 a 7,0 m, que corresponde à camada de silte argiloso orgânico dos Sedimentos Quaternários (Fácies Argilosa). Segundo o Instituto Agronômico do Estado de São Paulo (IAC, 2017), solos finos tendem a apresentar maiores concentrações de MO em comparação com solos arenosos, com teores de até 6% sendo considerados normais para solos argilosos. No entanto, valores acima deste patamar indicam um acúmulo de MO por condições localizadas (e.g. má drenagem). Neste critério ($MO > 6\%$), enquadram-se as amostras coletadas entre 1,1 e 2,25 m e entre 5,5 e 7,65 m, sendo todas associadas às texturas finas (siltos argilosos ou argilas siltosas).

Quanto às análises de pH, os valores variaram entre 4,89 e 7,97, com amostras relativamente ácidas ($pH \leq 5,0$) localizadas na profundidade entre 9,15 e 9,60 m, associadas aos sedimentos arenosos, e amostras de alcalinidade relativamente elevada ($pH > 7,8$) localizadas na profundidade de 5,50 a 5,75, associadas aos sedimentos silte argilosos (segundo o critério apresentado por ALVAREZ V. et al. (1999)). Quanto às análises de condutividade elétrica, os valores variaram entre 29 e 466 $\mu S/cm$, com a presença de anomalias condutivas ($CE > 300 \mu S/cm$) nas amostras entre 1,10 e 2,25 m, e na amostra entre 6,10 e 6,25 m, indicando provável correlação da CE com a porcentagem de finos ($R = 0,73$).

Os resultados do SDP-05 são apresentados na **Tabela 24** e na **Figura 37**.

Tabela 24. Resultados dos ensaios de caracterização geoquímica do ponto SDP-05.

Intervalos amostrais (m)	MO (%)	FCO (%)	pH	CE ($\mu S/cm$)
0,55 - 0,65	1,28	0,11	7,82	218
0,90 - 1,10	3,83	0,95	7,25	433
2,75 - 3,00	3,97	1,00	7,03	591
3,30 - 3,50	9,63	2,62	7,15	373
3,90 - 4,10	3,29	0,31	7,64	126
4,85 - 4,97	8,93	2,66	7,44	91
5,45 - 5,70	14,43	6,10	7,55	157
7,00 - 7,20	12,42	4,47	7,46	142
7,80 - 8,10	18,54	8,02	5,42	120
9,20 - 9,40	0,36	1,69	4,76	131
10,00 - 10,20	1,59	0,12	5,12	90
10,50	1,83	0,04	-	-

Figura 37. Perfis dos resultados de caracterização geoquímica do ponto SDP-05.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras do ponto SDP-05 apresentaram teores de MO entre 0,36% e 18,54%, e teores de FCO entre 0,04% e 8,02%, com uma forte correlação entre estes parâmetros ($R = 0,95$). Elevados teores de MO ($> 6\%$) foram detectados na amostra de 3,3 e 3,5 m e nas amostras entre 4,85 e 8,1 m, sendo todas essas amostras de texturas finas (siltes argilosos ou argilas siltosas). Um coeficiente $R = 0,81$ foi obtido na comparação dos teores de MO com os níveis de argila, indicando uma evidente correlação entre esses parâmetros.

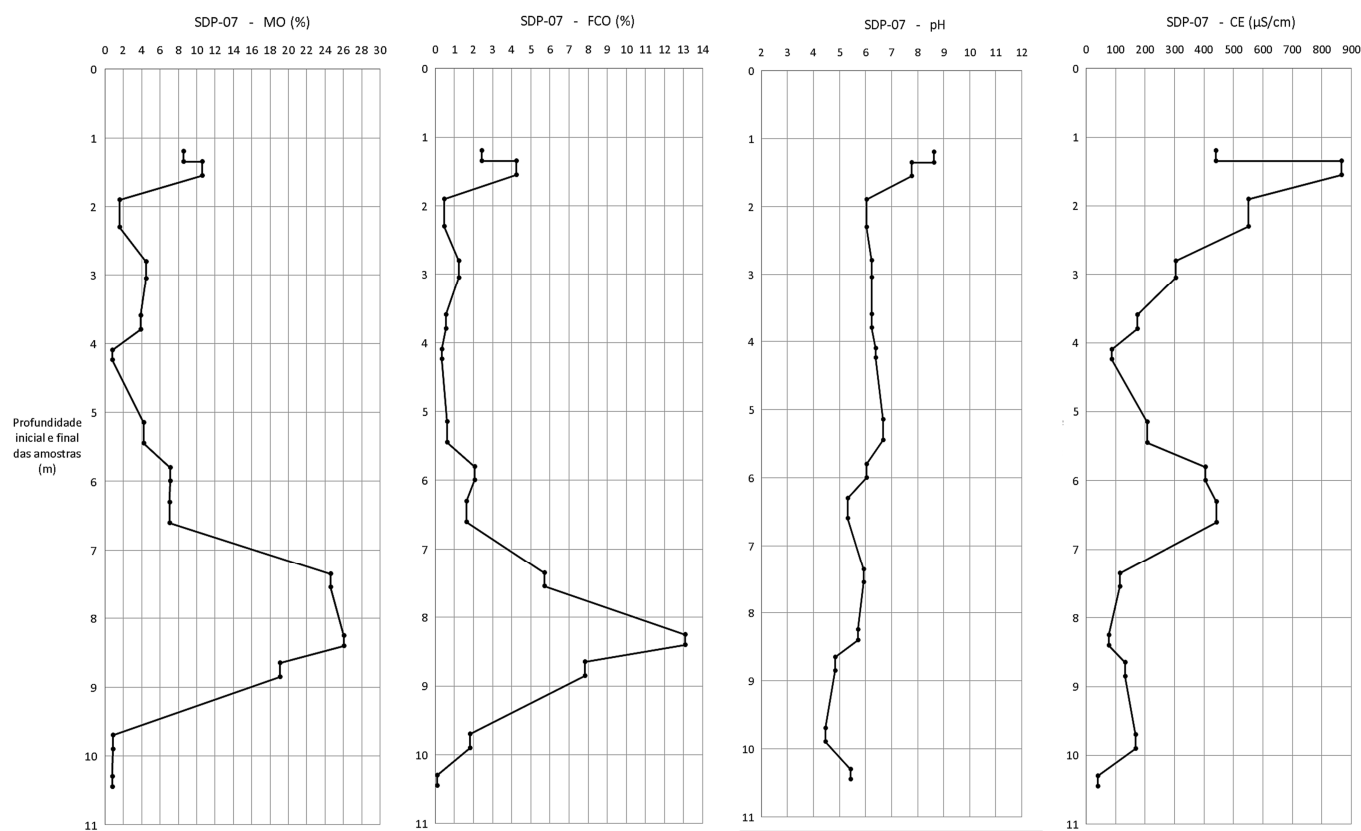
Quanto às análises de pH, os valores variaram entre 4,76 e 7,82, com uma amostra relativamente ácida ($pH \leq 5,0$) localizada na profundidade entre 9,2 e 9,4 m, associada aos sedimentos arenosos, e uma amostras de alcalinidade elevada ($pH > 7,8$) localizada próxima à superfície, entre 0,55 e 0,65 m, também correspondente a materiais arenosos (ALVAREZ V. et al. (1999)). Quanto à condutividade elétrica, os valores variaram entre 90 e 591 $\mu S/cm$, com a presença de anomalias condutivas ($CE > 300 \mu S/cm$) nas amostras entre 0,9 e 3,5 m, localizadas na camada de depósitos tecnogênicos (materiais de dragagem). Não foi constatada correlação entre a CE e a porcentagem de materiais finos ($R = -0,42$).

Os resultados do SDP-07 são apresentados na **Tabela 25** e na **Figura 38**.

Tabela 25. Resultados dos ensaios de caracterização geoquímica do ponto SDP-07.

Intervalos amostrais (m)	MO (%)	FCO (%)	pH	CE (μS/cm)
1,20 - 1,35	8,58	2,43	8,62	441
1,35 - 1,55	10,62	4,23	7,76	867
1,90 - 2,30	1,59	0,48	6,04	550
2,80 - 3,05	4,50	1,25	6,23	305
3,60 - 3,80	3,86	0,54	6,24	174
4,10 - 4,24	0,78	0,33	6,38	88
5,15 - 5,45	4,19	0,62	6,68	208
5,80 - 6,00	7,14	2,05	6,03	404
6,30 - 6,60	7,02	1,64	5,30	443
7,35 - 7,55	24,61	5,71	5,92	115
8,25 - 8,40	26,06	13,08	5,70	77
8,65 - 8,85	19,06	7,82	4,82	133
9,70 - 9,90	0,84	1,82	4,47	167
10,30 - 10,45	0,78	0,09	5,42	40

Figura 38. Perfis dos resultados de caracterização geoquímica do ponto SDP-07.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras do ponto SDP-07 apresentaram teores de MO entre 0,78% e 26,06%, e teores de FCO entre 0,09% e 13,08%, novamente com uma forte correlação entre estes parâmetros ($R = 0,91$). Elevados teores de MO ($> 6\%$) foram detectados nas amostras entre 1,2 e 1,55 m e nas amostras entre 5,8 e 8,85 m, sendo novamente todas associadas com texturas finas (siltes argilosos ou argilas siltosas). Os maiores valores também foram obtidos em amostras da camada de siltes e argilas orgânicas dos SQa-FArg, nas profundidades entre 7,35 e 8,85 m. Um coeficiente $R = 0,54$ foi obtido na comparação dos teores de MO com os níveis de argila, indicando uma correlação significativa desses parâmetros.

Quanto aos resultados de pH, os valores variaram entre 4,47 e 8,62, com amostras relativamente ácidas ($\text{pH} \leq 5,0$) localizadas na profundidade entre 8,65 e 9,9 m, associadas à base dos sedimentos orgânicos (SQa-FArg) e à camada de sedimentos arenosos (SQa-FAre). Uma amostra de alcalinidade elevada ($\text{pH} = 8,62$) também foi obtida, entre 1,2 e 1,35 m, correspondente a materiais silte argilosos. Quanto à condutividade elétrica, os valores variaram entre 40 e 867 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com a presença de anomalias condutivas ($\text{CE} > 300 \mu\text{S}/\text{cm}$) nas amostras entre 1,2 e 3,05 m, novamente localizadas na camada de depósitos tecnogênicos (materiais de dragagem), assim como na camada SQa-FArg, entre 5,8 e 6,6 m. Foi constatada uma fraca correlação entre a CE e a porcentagem de materiais finos ($R^2 = 0,30$).

6.6.1 Considerações sobre as análises laboratoriais dos solos

As análises granulométricas auxiliaram na correção e no refinamento da caracterização litoestratigráfica, inicialmente realizada com base nos resultados de campo das sondas MIP e SCOST, bem como pela descrição tátil visuais das amostras de solo.

A categorização das feições elétricas dos perfis do sensor EC/MIP (apresentada no item 6.3.1), associando-as à textura dos materiais, foi confirmada pelas análises granulométricas. A exceção se deu apenas para a camada denominada como “Transição” nos perfis de EC, localizada nos sedimentos quaternários, aproximadamente entre 7,5 e 8,5 m, pois, apesar da predominância de texturas finas (argila siltosa e silte argiloso), as leituras do EC foram relativamente baixas ($\text{EC}_{\text{médio}} < 40 \text{ mS}/\text{m}$). Uma possível explicação pode estar associada aos elevados teores de MO detectados nessa camada, conferindo um caráter mais

resistivo que o esperado para tais granulometrias. Para as demais camadas litológicas identificadas, o EC apresentou uma forte correlação com a textura dos materiais, confirmando o grande potencial deste sensor para a caracterização litológica em alta resolução de ambientes sedimentares estratificados.

Com relação às análises de MO e FCO, os resultados indicaram forte correlação entre estes parâmetros ($R_{\text{médio}} > 0,9$). Segundo Verlengia; Gargantini (1968), assume-se um teor aproximado de 58% da MO sendo composta por carbono orgânico. No presente estudo, a média geral desta relação foi de 29%.

Comparando os teores de MO com os níveis de argila, obteve-se um coeficiente de correlação $R = 0,49$ para as amostras do ponto SDP-01, $R = 0,81$ para o ponto SDP-05 e $R = 0,54$ para o ponto SDP-07, indicando uma correlação significativa entre estes parâmetros. Segundo Nichols (1984), as taxas de decomposição da MO tendem a ser menores à medida que aumentam as proporções de argila nos solos, favorecendo seu acúmulo. Os resultados obtidos concordam com essa referência, pois teores elevados de MO foram obtidos nas amostras de textura fina, tanto em meio aos depósitos tecnogênicos (entre 1,1 e 3,5 m), mas principalmente nas camadas de siltes e argilas orgânicas dos sedimentos quaternários (entre 4,8 e 8,8 m), onde foram obtidos os maiores valores.

Quanto aos teores de FCO, a média dos coeficientes de correlação ($R_{\text{médio}}$) em relação aos níveis de argila foi de 0,50, indicando uma correlação limitada entre estes parâmetros. No entanto, os maiores teores de FOC também foram obtidos nas camadas de siltes e argilas orgânicas dos sedimentos quaternários, com média de 4,76%. Por outro lado, teores mínimos foram encontrados nos sedimentos terciários, com média de 0,07%.

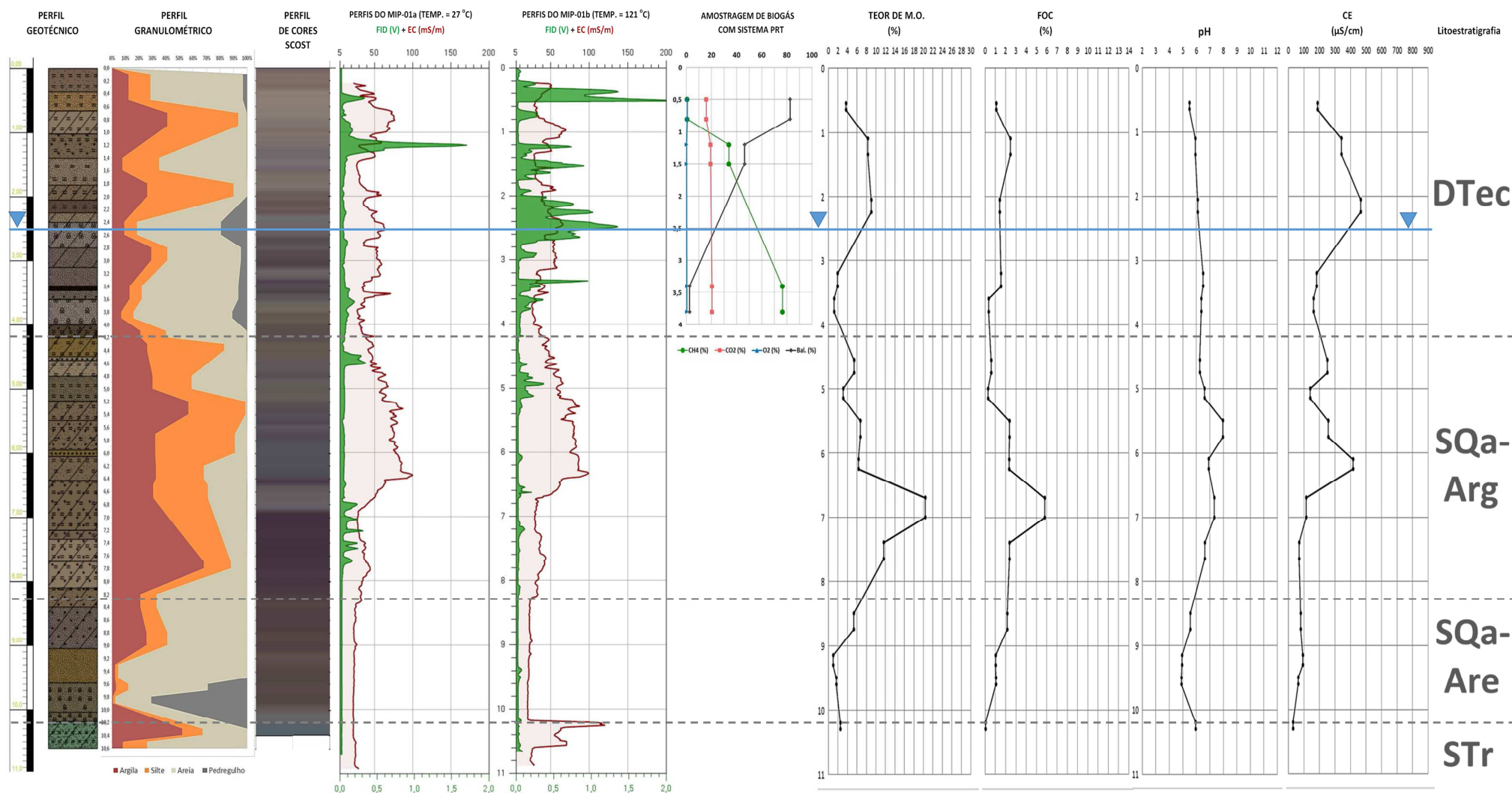
Com base nesses resultados, observa-se que a camada de solos orgânicos em meio ao pacote de sedimentos quaternários possui um elevado potencial metanogênico. Camadas de materiais silte argilosos, localizadas em meio aos depósitos tecnogênicos, também apresentam potencial teórico, devido aos elevados teores de MO e FCO. Neste sentido, a análise destes parâmetros mostra-se útil para a identificação das fontes potenciais de metano no subsolo. Por outro lado, deve-se considerar que esta é apenas uma análise qualitativa, pois outros parâmetros devem ser avaliados para se estimar o potencial metanogênico destas camadas (e.g. parâmetros microbiológicos, composição e grau de degradação da matéria orgânica, parâmetros hidrogeoquímicos do meio, etc).

6.7 Análise integrada dos resultados e definição do modelo conceitual

Os resultados obtidos foram representados em perfis comparativos de alguns *clusters*, de forma a possibilitar uma análise integrada para a definição do modelo conceitual litoestratigráfico e do modelo conceitual da dinâmica do gás metano na área de estudo. Estes resultados possibilitaram ainda uma avaliação do potencial das ferramentas de investigação de alta resolução utilizadas para a caracterização geoambiental de áreas com ocorrência de gás metano.

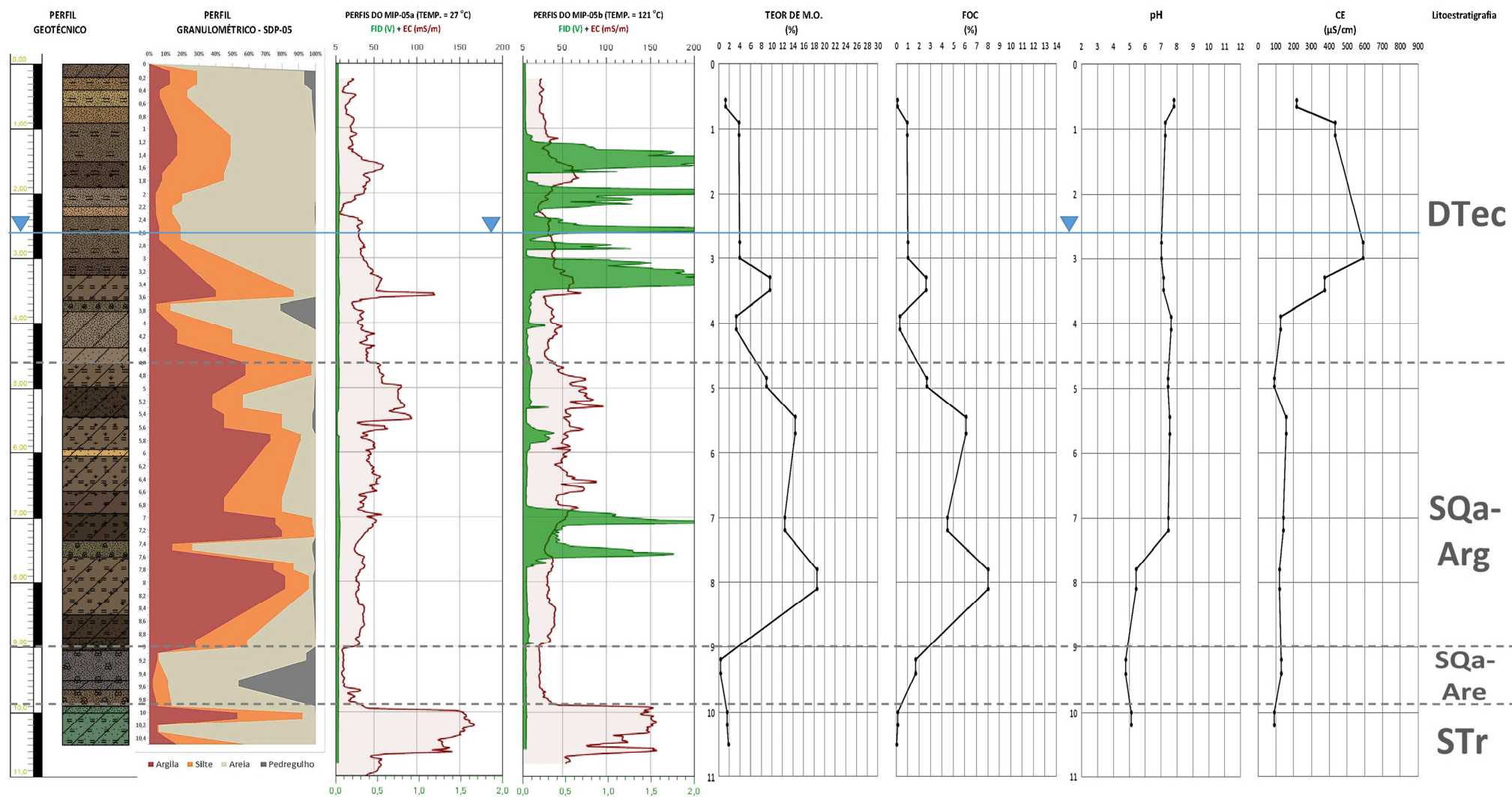
As **Figuras 39, 40 e 41** apresentam a integração dos perfis obtidos, tanto com os ensaios de campo, como em ensaios laboratoriais, realizados nos *clusters* P1, P5 e P7, respectivamente. Essa integração mostra grande correlação entre os resultados obtidos pela sonda MIP com aqueles obtidos pelas demais técnicas de investigação adotadas, fornecendo diversas linhas de evidência em alta resolução, tanto para a caracterização do perfil litoestratigráfico, como para a detecção e mapeamento do gás metano no subsolo.

Figura 39. Integração dos perfis dos ensaios realizados nos *cluster* P1.



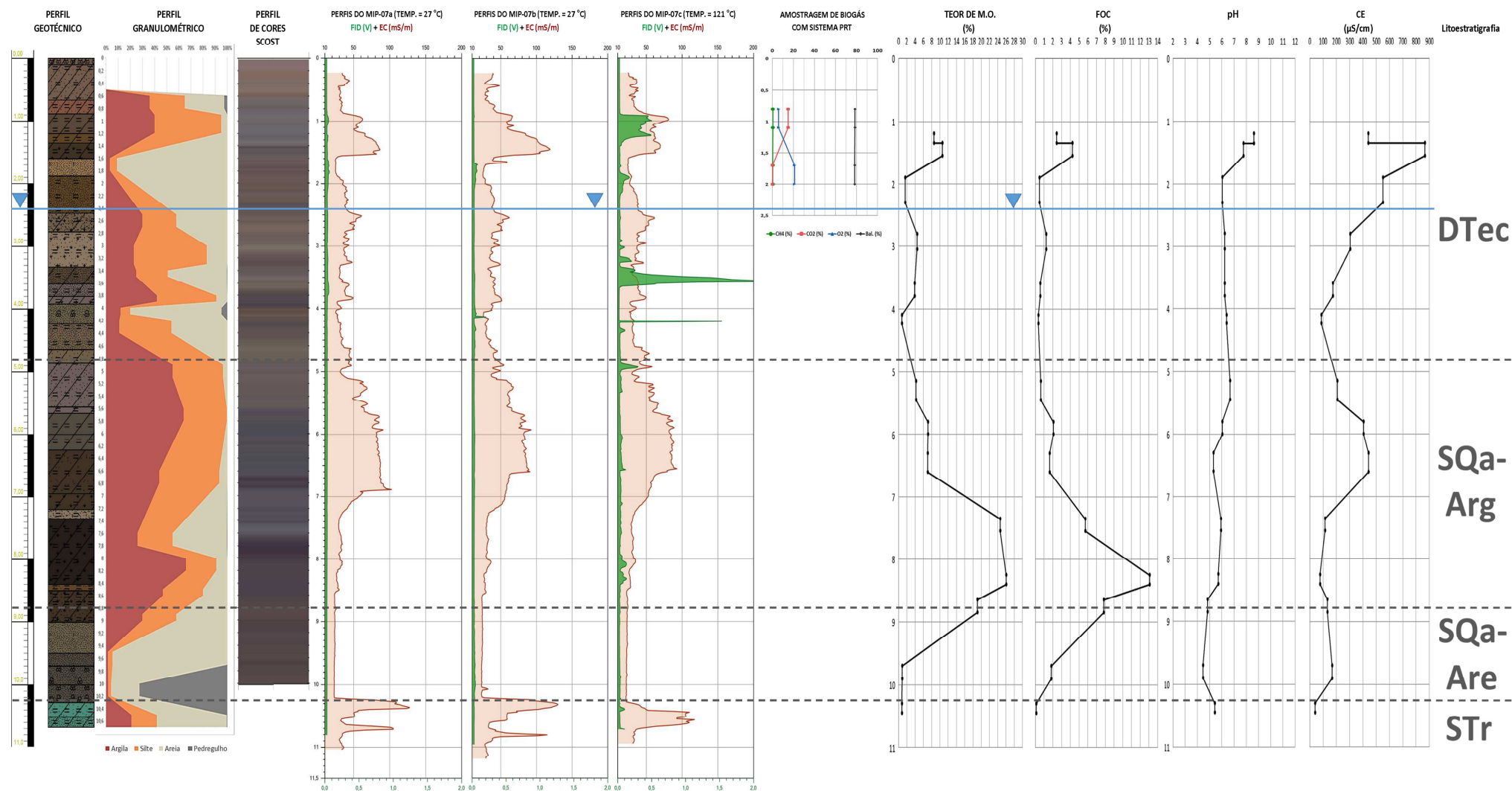
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40. Integração dos perfis dos ensaios realizados nos *cluster* P5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41. Integração dos perfis dos ensaios realizados nos *cluster* P7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.7.1 Modelo conceitual litoestratigráfico

A definição do modelo conceitual litoestratigráfico partiu de um levantamento prévio de informações, tanto de referências bibliográficas, como de estudos previamente realizados na área de estudo, que auxiliaram na interpretação dos resultados. Por outro lado, a metodologia aplicada possibilitou um refinamento, com alta resolução, das informações previamente disponíveis.

Os perfis do EC, obtidos com o MIP e com o SCOST, possibilitaram a definição de feições correlacionáveis à textura do solo, bem como uma estimativa relativamente precisa da litoestratigrafia. Estas informações também foram correlacionáveis às camadas definidas pelos perfis de cores obtidos com o SCOST, apesar da característica dos materiais provenientes dos depósitos de dragagem e dos sedimentos naturais da várzea mostrar-se muito parecida. Essas estimativas foram revisadas e confirmadas pelas análises laboratoriais das amostras de solo coletadas, tanto por meio da descrição tátil visual, como pelas análises granulométricas. Em contrapartida, também auxiliaram na correção das profundidades, minimizando eventuais incertezas associadas à defasagem de recuperação de alguns *liners*.

O modelo conceitual obtido mostra a presença da camada de depósitos tecnogênicos (DTec), composta pelos materiais de dragagem, até uma profundidade média de 4,6 m. Esses depósitos são compostos por uma camada superficial de 0,8 m, de textura silte arenoso ou areia siltosa, localmente argilosa, sobreposta a uma camada silte argilosa de até 1,0 m de espessura, a partir da qual já se observam indícios de um ambiente geoquímico redutor, em função da presença de restos orgânicos e das cores cinzentas (matiz “gley”). Logo abaixo, observa-se uma sequência de camadas intercaladas de areias siltosas com camadas de silte argiloso e silte arenoso, geralmente com presença de cascalhos entre 3,0 e 4,0 m de profundidade, apresentando tonalidades cinzentas e amarronzadas escuras, com frequente presença de resíduos plásticos e restos vegetais.

A transição da camada de aterro para o solo natural (antiga várzea) é marcada pela elevação no teor de materiais finos (argila e silte), acompanhada pela elevação dos valores de condutividade elétrica, assim como pela constatação de camadas de restos vegetais no topo dessa transição. Essa camada de finos foi descrita como a fácies argilosa dos sedimentos quaternários (SQa-Arg), com

espessuras de 2,0 a 4,0 m, localmente com lentes mais arenosas, apresentando colorações cinza escuro a cinza azulado escuro, com intercalações muito escuras, associadas com argilas e siltes orgânicos e um aumento gradual nos teores de MO. Em geral, encontra-se delimitada em profundidade pela diminuição gradual nos valores do EC, onde, por volta de 7,0 a 7,5 m, constata-se uma fina camada de areia fina siltosa, nitidamente identificável no perfil elétrico por seu formato côncavo. Essa feição foi interpretada como um possível depósito sedimentar do tipo *crevasse splay*, comum em ambientes meandrantos.

Logo abaixo, foi verificada a continuidade da camada de argila orgânica, com espessuras de 1 a 2 m, com eventuais lentes de turfa, marcada principalmente pela cor cinzenta muito escura e pela abundância de MO e FCO (teores de até 26% e 13%, respectivamente), mas que apresenta respostas elétricas relativamente baixas ao EC (< 40 mS/m), devido ao caráter resistivo da MO. Essa camada apresenta um aumento dos níveis de areia em profundidade, exibindo uma transição ora gradual, ora abrupta, por volta de 8,8 m, para uma camada de predominância arenosa, associada à fácies arenosa na base dos sedimentos quaternários (SQa-Are). Essa transição, de granocrescência descendente, se inicia com areia fina a média, passando para areia grossa com cascalhos no intervalo aproximado de 1 m, e chegando a uma linha de seixos, por volta 10 m de profundidade. Nessa transição também ocorre uma redução quase total no teor de matéria orgânica, apesar das cores ainda ser predominantemente escuras.

Abaixo da linha de seixos, por volta de 10,2 m, as sondagens adentraram em um estrato altamente resistente à perfuração pelos métodos de cravação direta, onde, subitamente, observa-se um brusco aumento no sinal de condutividade elétrica do sensor EC. Essa transição foi atribuída aos sedimentos paleogênicos da Formação Resende, compostos por lentes de argila siltosa intercaladas com areias siltosas, de cor cinza esverdeado e teores de carbono orgânico próximos de zero.

6.7.2 Modelo conceitual para a dinâmica do gás metano

A definição do modelo conceitual para a dinâmica do gás metano na área de interesse também partiu de um levantamento prévio de informações em estudos anteriormente realizados no local. Dessa forma, pode-se determinar um *site* ideal para testar a metodologia proposta, pois sabia-se, de antemão, que o local

apresentava altas concentrações de gás metano no subsolo e que não haviam outros contaminantes voláteis que poderiam influenciar na resposta dos equipamentos. Adicionalmente, estudos acadêmicos já haviam sido conduzidos na mesma área, possibilitando a comparação dos dados.

Conforme verificado nos ensaios preliminares de bancada, a sonda MIP demonstrou uma excelente capacidade para a detecção do gás metano. Apesar dessa característica ter se confirmado em campo, principalmente com a sonda aquecida, observou-se que diversos fatores podem influenciar o seu desempenho, tais como as condições do meio físico (e.g. textura, porosidade e grau de saturação do solo), as condições do gás metano (concentração, pressão e massa disponível) e as próprias condições de operação (e.g. temperatura da sonda e velocidade de cravação). Mesmo assim, diversas correlações qualitativas foram identificadas entre os perfis do detector FID e a litoestratigrafia da área de estudo.

Conforme as seções das **Figuras 30 e 31**, observa-se que os picos do detector FID são maiores, tanto em quantidade (número de picos), como em espessura e comprimento (intensidade), nas camadas de texturas grossas, intercaladas com camadas de texturas finas, nos depósitos tecnogênicos. Picos expressivos do FID também foram constatados em intercalações com maiores níveis de areia no solo natural, tanto no topo da camada aluvionar, entre 4,5 e 5,5 m, como na fina camada localizada em meio a esse pacote argiloso, em profundidades variáveis de 6,0 e 8,0 m. Estes resultados foram interpretados como acumulações de gás metano, o que foi confirmado pelas medições diretas com o sistema PRT. Concentrações de até 77% de CH_4 foram medidas no ponto PRT-01B, entre 3,4 e 3,8 m de profundidade.

Nas medições com o sistema PRT foram identificados ainda gradientes de concentração de CH_4 , nos pontos P1 e P2, das amostras mais fundas (tomadas entre 3,3 e 3,8 m) para as amostras mais rasas (entre 0,5 e 0,8 m), indicando uma atenuação das concentrações em direção à superfície. A composição das amostras PRT-01C (0,5-0,8 m) e PRT-07B (0,8-1,1 m), que se encontram praticamente anóxicas, com baixos níveis de CH_4 (< 1%) e abundância de CO_2 (16%), indicam uma provável atividade metanotrófica, consumindo o CH_4 , nas camadas mais rasas do subsolo.

Por meio das análises do teor de MO e FCO, foram identificadas camadas com altas concentrações de matéria orgânica e elevado potencial metanogênico.

Estas camadas estão associadas, principalmente, a materiais de textura fina, localizados tanto em meio aos depósitos de dragagem (entre 1,1 e 3,5 m), mas principalmente nas camadas de siltes e argilas orgânicas dos sedimentos quaternários (entre 4,8 e 8,8 m), onde foram obtidos valores de até 26% de MO e 13% de FOC. Provavelmente, estas camadas atuam como as maiores fontes de CH_4 , apesar de todo o perfil do subsolo local, abaixo do primeiro metro, apresentar características propícias aos processos metanogênicos. No entanto, para uma caracterização mais precisa e quantitativa das fontes de metano, um estudo hidrogeoquímico mais abrangente deve ser realizado.

Neste contexto, pode-se inferir que grande parte do metano gerado na área de estudo provem dos sedimentos naturais da antiga várzea de inundação do rio Tietê. Localmente, estes sedimentos apresentam lentes arenosas que propiciam o acúmulo de biogás, mesmo estando na zona saturada, pois com o aumento da concentração dissolvida pelo processo metanogênico, a formação de bolhas tende a se amplificar, desenvolvendo pressão suficiente para expulsar a água intersticial e formar bolsões de biogás pressurizados, os quais tendem a fornecer elevadas respostas ao sensor FID do MIP (e.g. MIP-02b). O metano produzido nos sedimentos quaternários tende a migrar verticalmente em direção à superfície, tanto por difusão molecular (processo lento), como por processos advectivos (rápidos), conhecidos como fenômenos de ebulição (FECHNER-LEVY, HEMOND, 1996).

O padrão litoestratigráfico existente na área de estudo, principalmente nos materiais de dragagem, tende a criar condições propícias para o acúmulo do biogás no subsolo. A presença de camadas intercaladas de alta e baixa permeabilidade tende a criar restrições ao transporte vertical dos gases rumo à superfície, promovendo o aumento de concentração, e, conseqüentemente, da pressão e do volume acumulado, sob camadas menos permeáveis, ao mesmo tempo que reduz a penetração de oxigênio atmosférico no subsolo, limitando a atuação das bactérias metanotróficas no consumo do CH_4 . Dessa forma, pode-se afirmar que os Depósitos Tecnogênicos estão atuando como “reservatórios” de CH_4 , tanto daquele produzido nos próprios materiais de dragagem, como do biogás proveniente dos sedimentos naturais de várzea ricos em matéria orgânica.

Este modelo conceitual concorda em grande parte com o estudo apresentado por Mendonça et al. (2015b), tanto na definição da litoestratigrafia local, como na identificação das fontes e dos processos de transporte do metano em subsuperfície.

No entanto, estes autores mapearam bolsões de biogás em três níveis diferentes do subsolo: um em meio aos materiais de dragagem, um em lentes arenosas e fraturas dos SQA-Arg e um nos sedimentos grosseiros da base dos SQA-Are. No presente estudo, as acumulações de CH_4 não se mostram tão homogêneas, ocorrendo de forma descontínua e distribuída em diferentes profundidades, devido à elevada heterogeneidade do subsolo, principalmente das camadas de materiais de dragagem. Além disso, não foram obtidas respostas significativas do detector FID nas camadas arenosas dos SQA-Are, mesmo com a sonda aquecida, o que discorda da existência de bolsões de biogás nessa camada.

Os resultados obtidos permitiram assim um refinamento do modelo conceitual da dinâmica do gás metano no subsolo da área de estudo, comprovando a potencialidade da sonda MIP, com o auxílio de técnicas de campo e de laboratório, para a caracterização geoambiental de alta resolução de áreas de várzea com tais características, que são muito comuns na RMSP.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Aspectos gerais

A presença de gases e vapores no subsolo de áreas contaminadas vem se mostrando um aspecto ambiental altamente relevante para a tomada de decisão em relação aos usos futuros e à necessidade de intervenções para o gerenciamento dos potenciais riscos associados. No contexto da RMSP, a presença de gás metano no subsolo tem despertado muita preocupação e dúvidas nos gestores, principalmente em terrenos localizados em áreas de várzea, onde as condições do meio são naturalmente propícias à sua geração. É notória a necessidade de se ampliar o debate e aprofundar o conhecimento para o estabelecimento de diretrizes para esses casos.

Nesse contexto, a aplicação de técnicas de investigação de alta resolução (HRSC) para o diagnóstico geoambiental dessas áreas, com enfoque no entendimento da dinâmica do metano no subsolo, se mostra uma metodologia promissora. Para avaliar o potencial dessa abordagem, o presente estudo empregou diferentes técnicas de campo e de laboratório, com enfoque na sonda MIP, visando a geração de um modelo conceitual para uma área com ocorrência de gás metano.

Além do MIP, foram realizados ensaios de campo com a sonda *Soil Color Optical Screening Tool* (SCOST), amostragem de gases do solo com o sistema *Post Run Tubing* (PRT) e a amostragem de solo com equipamento *direct push*. Em laboratório, foram realizados ensaios de bancada para avaliar o desempenho da sonda MIP para a análise de CH₄, além da descrição tátil visual e análises das amostras de solo coletadas. Os parâmetros analisados foram o teor de matéria orgânica (MO), a fração de carbono orgânico (FCO), o pH e a condutividade elétrica (CE) dos solos. Dessa forma, buscou-se avaliar diversos aspectos relacionados à aplicação, individual e conjugada, dessas técnicas para os objetivos propostos.

7.2 Resultados

Primeiramente foram realizados os ensaios de bancada para avaliar o desempenho da sonda MIP para a detecção e quantificação de gás metano, por meio do seu detector FID. Os resultados demonstraram que o método aplicado

apresentou linearidade na faixa de 0% a 75% de CH₄, tanto com a sonda em modo aquecido, como sem o aquecimento. Uma sensibilidade maior foi obtida para amostras de volumes maiores, com as mesmas concentrações, devido à maior massa de CH₄ disponível. Apesar da linha de base do FID ter ficado bem acima das condições normais de operação durante os ensaios, os limites de detecção obtidos variaram entre 0,86% e 5,6% de CH₄, com o melhor desempenho obtido com a sonda na temperatura ambiente e o gás CO₂ como diluente. Com base nas curvas de regressão linear dos ensaios, foi estabelecido um critério para a interpretação dos resultados de campo, com um valor de 300 mV de sinal do FID como referência para leituras consideradas significativas. Este valor foi calculado para uma concentração de 5%, que corresponde ao limite inferior de explosividade do metano.

Em campo, os ensaios com a sonda MIP possibilitaram a obtenção de um grande volume de dados, com resolução vertical de centímetros, tanto para a caracterização litoestratigráfica, por meio do sensor de condutividade elétrica (EC), como para a detecção e mapeamento do CH₄, por meio do detector FID. Perfis e seções foram gerados para a interpretação e representação desses resultados. A caracterização litológica foi complementada pela realização de ensaios com o sistema SCOST e pela amostragem de solo, com o método *direct push*. Os ensaios com o SCOST forneceram perfis de cores e perfis elétricos de alta resolução, auxiliando na delimitação das camadas e fornecendo indícios sobre as condições geoquímicas do subsolo. Quanto às amostras de solo, foram feitas descrições tátil visuais com alto nível de detalhe e foram encaminhadas amostras de cada camada litológica para a realização de análises granulométricas, o que possibilitou o refinamento dessa caracterização.

A comparação dos perfis do MIP, obtidos com a sonda nas temperaturas ambiente e aquecida, mostrou que a capacidade de detecção de CH₄ foi amplamente maior com o aquecimento, pois além de aumentar a taxa de difusão e captação do analito, também auxiliou na purga do sistema, evitando a colmatação e o acúmulo de água na membrana. Adicionalmente, o aquecimento pode promover a evaporação da fração dissolvida do CH₄ na água subterrânea e a liberação da fração residual, eventualmente trapeada, na forma de microbolhas, em camadas menos permeáveis, aumentando a massa de CH₄ amostrada pela sonda.

O mapeamento de CH₄ com o MIP foi realizado por meio da correlação dos picos de resposta do FID com as camadas litológicas identificadas pelas demais

técnicas. Conforme observado nas seções e nos *clusters* de perfis analíticos, constatou-se que os picos do FID são maiores e mais frequentes nas camadas de texturas grossas, intercaladas com camadas de texturas finas, nos depósitos tecnogênicos. Picos expressivos também foram constatados em intercalações com maiores níveis de areia no solo natural, tanto no topo da camada aluvionar, entre 4,5 e 5,5 m, como na fina camada localizada em meio ao pacote argiloso, em profundidades variáveis de 6,0 a 8,0 m. Esses resultados corroboram com os dados da literatura, de que o padrão litológico altamente estratificado encontrado na área de estudo, cria condições propícias para a acumulação de biogás no subsolo.

A caracterização da dinâmica do CH_4 foi refinada ainda por meio da amostragem de gases com o sistema PRT e pelas análises laboratoriais de MO e FCO nas amostras de solo coletadas. A amostragem de gases confirmou a capacidade de detecção da sonda, com concentrações de até 77% de CH_4 , encontradas entre 3,4 e 3,8 m, em meio aos materiais de dragagem. A medição da composição dos gases possibilitou ainda a identificação de gradientes de concentração entre os diferentes extratos avaliados, fornecendo informações para a análise dos processos de acumulação e degradação do biogás. No entanto, a comparação das concentrações de CH_4 com os resultados do MIP mostrou uma fraca correlação entre os dados, evidenciando algumas limitações metodológicas.

As análises do teor de MO e FCO permitiram o mapeamento de camadas com altas concentrações de matéria orgânica e elevado potencial metanogênico. Estas camadas foram associadas, principalmente, a materiais de textura fina, localizados tanto em meio aos depósitos de dragagem (entre 1,1 e 3,5 m), mas principalmente nas camadas de siltes e argilas orgânicas dos sedimentos quaternários (entre 4,8 e 8,8 m), onde foram obtidos valores de até 26% de MO e 13% de FCO. Provavelmente, estas camadas atuam como as maiores fontes de CH_4 , apesar de todo o perfil do subsolo local, abaixo do primeiro metro, apresentar características propícias aos processos metanogênicos. No entanto, para uma caracterização mais precisa e quantitativa das fontes de metano, um estudo hidrogeoquímico mais abrangente deve ser realizado.

7.3 Conclusões

Com base nos resultados obtidos podem ser elencadas as seguintes conclusões:

- 1) A metodologia adotada forneceu diversas linhas de evidência para a formulação de um modelo conceitual com alto grau de detalhamento, confirmando o potencial das técnicas de investigação de alta resolução para a redução das incertezas no diagnóstico de áreas com ocorrência de gás metano no subsolo;
- 2) A sonda MIP demonstrou um grande potencial como ferramenta de *screening* para o diagnóstico dessas áreas, tanto por sua capacidade de fornecer dados de alta resolução para a caracterização litoestratigráfica, por meio do sensor EC, como pela grande sensibilidade apresentada pelo detector FID para o mapeamento de gás metano. No entanto, conforme já previsto na literatura, e confirmado no presente estudo, técnicas auxiliares, envolvendo amostragens diretas, são indispensáveis para a calibração, confirmação e correção dos dados obtidos;
- 3) Os ensaios de bancada forneceram resultados satisfatórios para avaliar o desempenho da sonda MIP para a detecção e quantificação de gás metano, sob diferentes condições de operação. Essa etapa se mostrou importante para a validação do arranjo experimental pretendido e para a definição de critérios para a interpretação dos ensaios de campo;
- 4) Apesar do bom desempenho obtido na bancada, observou-se que, em campo, diversos fatores podem influenciar a capacidade do MIP de quantificar, ou prever, as concentrações de CH₄ no subsolo, comprometendo sua aplicação de modo semiquantitativo. Por outro lado, a sonda demonstrou uma ótima capacidade de detecção e mapeamento de acumulações de CH₄, com resolução centimétrica, principalmente com a ponteira aquecida, o que reforça sua importância como ferramenta de *screening* de alta resolução;
- 5) A aplicação da sonda MIP sem aquecimento pode provocar a colmatação e/ou a saturação da membrana, prejudicando a sua capacidade de detecção. Essa constatação só foi possível devido à realização de testes de resposta antes e depois dos ensaios;

6) Para os resultados do sensor EC, correlações semiquantitativas puderam ser estabelecidas entre a resposta do sensor e a litologia do subsolo. Estas correlações foram confirmadas pelas descrições tátil-visuais e pelas análises granulométricas das amostras de solo coletadas nos mesmos locais. No entanto, essas correlações podem ser muito particulares para cada contexto litológico, não devendo ser extrapolada como regra geral;

7) O sistema SCOST forneceu perfis de cores e de condutividade elétrica com alta resolução, sendo essas informações importantes para a definição do modelo conceitual litoestratigráfico. Conforme previsto na literatura, essa ferramenta apresenta um grande potencial de aplicação em diversas áreas técnicas, tais como na pedologia, geologia, agricultura e até mesmo na arqueologia;

8) A amostragem de gases do solo pelo sistema PRT mostrou grande importância para a avaliação e validação dos resultados obtidos pela sonda MIP, principalmente para correlação entre as respostas obtidas pelo detector FID e a concentração de CH₄ nos locais amostrados. A determinação da concentração de biogás no subsolo pode fornecer importantes informações para o entendimento da dinâmica do CH₄;

9) A amostragem de solo pelo método *direct push* se mostrou fundamental para o diagnóstico de áreas com ocorrência de gás metano, principalmente para a caracterização litológica e para a obtenção de amostras para análises laboratoriais. Apesar das limitações associadas à defasagem na recuperação de amostras, a aplicação do método de revestimento duplo (*Dual Tube*) pode minimizar tais perdas e contribuir para uma amostragem mais representativa;

10) A análise dos teores de MO e FCO em todo o perfil investigado pode fornecer importantes informações para o mapeamento das fontes potenciais de metano no subsolo. Camadas com materiais de textura fina tendem a apresentar maiores acumulações de MO;

11) Os resultados do presente estudo concordam em grande parte com os estudos anteriormente realizados no local, mostrando que a metodologia aqui proposta pode contribuir com uma série de dados para o refinamento dos modelos conceituais preestabelecidos.

Como contribuição para o gerenciamento ambiental de áreas com ocorrência de gás metano no subsolo, a metodologia proposta pode auxiliar na definição das camadas preferenciais de geração, acúmulo e fluxo do gás, possibilitando o estabelecimento de redes de monitoramento (e.g. por meio de poços de monitoramento) que forneçam dados mais precisos e representativos, subsidiando a definição das melhores estratégias de intervenção para os casos com eventuais cenários de risco.

7.4 Limitações e Recomendações

A seguir são listadas as principais limitações do estudo e algumas recomendações para o aprimoramento da metodologia proposta:

1) Para um aprimoramento dos ensaios de bancada realizados sugere-se: realizar ajustes prévios no equipamento para que os ensaios sejam executados com a linha de base do detector FID nas condições normais de operação; realizar os testes de resposta com concentrações de CH₄ próximas ao LD e ao LQ; e variar as velocidades de fluxo do gás de arraste. Como sugestão para ampliar o escopo avaliado, pode-se utilizar um dispositivo para o controle da pressão de injeção, de forma a analisar a influência deste parâmetro; e, testar a influência de outros compostos misturados ao CH₄ sobre a resposta do FID (e.g. BTEX);

2) Para aprimorar os ensaios com a sonda MIP realizados em campo, sugere-se: manter a velocidade de cravação da sonda sempre constante, na medida do possível; e, realizar as cravações com a sonda sempre aquecida (acima de 100 °C), para otimizar o seu desempenho;

3) Para que a amostragem de gases do solo seja realmente comparável com os resultados da sonda MIP, os ensaios com o sistema PRT devem ser executados imediatamente na sequência dos ensaios com o MIP, de modo que sejam avaliadas as mesmas condições de acumulação de gases no subsolo. Tendo-se em vista que os resultados do MIP podem ser avaliados em tempo real, a determinação das profundidades de amostragem dos gases pode ser definida concomitantemente à realização da cravação;

4) Para que a amostragem de gases do solo com o PRT tenha maior representatividade, recomenda-se a utilização dos anéis de vedação nas ponteiros

(*O-ring*), assim como a amostragem de mais pontos ao longo dos perfis investigados;

5) Para a determinação do potencial metanogênico das camadas fonte, identificadas com os perfis de FCO, recomenda-se: a análise de parâmetros geotécnicos adicionais (teor de umidade, porosidade e densidade das amostras); a análise da composição e grau de degradação da matéria orgânica; e, a realização de um estudo hidrogeoquímico mais abrangentes na área, envolvendo a análises de solo e água subterrânea;

6) A eventual diferenciação do biogás gerado nas camadas de depósitos tecnogênicos, daquele gerado nos sedimentos naturais da várzea, pode ser realizada, caso necessário, por meio da análise de isótopos de carbono;

Por fim, deve-se ressaltar que o estudo foi realizado em um contexto geológico bastante específico, e, em uma área sem a presença de outros contaminantes orgânicos voláteis. Dessa forma, recomenda-se a realização de estudos semelhantes em outras áreas, com diferentes contextos geológicos e de contaminação, de forma que as metodologias propostas possam ser testadas, adaptadas e melhoradas para a ampliação do conhecimento acerca dos métodos de diagnóstico para áreas com ocorrência de gás metano no subsolo.

8. BIBLIOGRAFIA

ABREU, E.L. **Imageamento de resistividade elétrica de áreas contaminadas utilizando arranjos poço-superfície**. 2012. 55 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

ADAMSON, D. T. et al. Membrane Interface Probe Protocol for Contaminants in Low-Permeability Zones. **Groundwater**, v.52, n.4, p. 550–565. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb – Sistema de Informações Hidrológicas. Arquivos digitais (formato shapefile)**. ANA, 2010. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=4100>>. Acesso: 10 dez. 2016.

ALTNÖDER, A.; HUTTER, E. Methane in ground waters and the related problems at water works in Hungary. In: **Quality of Groundwater** (Eds W van Duijvenbooden, P Glasbergen, H van Lelyveld), Proc. Symp. Noordwijkerhout, Netherlands, Elsevier, p.1045–1047, 1981.

ALVAREZ V. V.H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API. **Assessing the Significance of Subsurface Contaminant Vapor Migration to Enclosed Spaces, Site-Specific Alternatives to Generic Estimates**. Washington D.C: Health and Environmental Sciences Department, Dec. 1998. 60 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **ASTM D7352-07 (2012)**. Standard Practice for Direct Push Technology for volatile Contaminant Logging with the Membrane Interface Probe (MIP). West Conshohocken, PA, 2012. 11 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **ASTM D6282/D6282M – 14**. Standard Guide for Direct Push Soil Sampling for Environmental Site. West Conshohocken, PA, 2014. 20 p.

ARGENTON, A. **Curso de Cromatografia a Gás**. Conselho Regional de Química IV Região (SP). Minicursos CRQ-IV, 2010. Disponível em: <http://www.crq4.org.br/sms/files/file/cromatografia_site_mini2010.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13441**: Rochas e solos - Simbologia. Rio de Janeiro, 1995. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13600**: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14787**: Espaço confinado - Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15492**: Sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007. 31p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16210**: Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas: Procedimento. Rio de Janeiro, 2013. 4p.

BARTLETT, K. B.; HARRISS, R. C. Review and assessment of methane emissions from wetlands. **Chemosphere**, v. 26, p. 261–320, 1993.

BAZHIN, N. Theory of methane emission from wetlands. **Energy & Environmental Science**, v. 3, n. 8, p. 1057, 2010.

BECK, F. P.; CLARK, P. J.; PULS, R. W. Location and Characterization of Subsurface Anomalies Using a Soil Conductivity Probe. **Ground Water Monitoring & Remediation**, v. 20, n. 2, p. 55–59. 2000.

BLOUNT, C. W.; PRICE, L. C. **Solubility of methane in water under natural conditions: a laboratory study**. Final Report. Department of Geology - Idaho State University. Pocatello, ID. 1982. Disponível em: <<https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5281520>>. Acesso: 12 jul. 2016.

BOTELHO, M. R. et al. Medida da cor em solos do Rio Grande do Sul com a carta de Munsell e por colorimetria. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1179–1185, ago., 2006.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 2 set. 1981.

BRITO, N. M. et al. VALIDAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS: ESTRATÉGIA E DISCUSSÃO. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 13, p. 129–146, jan./dez. 2003.

BRONDERS, J. et al. Application of the membrane interphase probe (MIP): An evaluation. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 1, p. 74–82, 2008.

BUMBERGER, J. et al. Carry-Over Effects of the Membrane Interface Probe. **Groundwater**, v. 50, n. 4, p. 578–584, 2012.

BUTLER, J. J. et al. **Hydrostratigraphic Characterization of Unconsolidated Alluvial Deposits with Direct-Push Sensor Technology**. Kansas. 1999. Disponível em: <http://www.kgs.ku.edu/Hydro/Publications/OFR99_40/index.html>. Acesso em: 10 set 2015.

CALDWELL, S. L. et al. Anaerobic Oxidation of Methane: Mechanisms, Bioenergetics, and the Ecology of Associated Microorganisms. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 18, p. 6791–6799, set. 2008.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - CA-EPA. 2012.

Evaluation of Biogenic Methane. A Guidance Prepared for the Evaluation of Biogenic Methane in Constructed Fills and Dairy Sites. Disponível em:

<https://www.dtsc.ca.gov/PublicationsForms/upload/BF_Schools_Eval_of_Biogenic_Methane_March_2012.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2016.

CHRISTENSEN, T. R. Wetlands. In: REAY, D.; SMITH, P.; VAN AMSTEL, A. (Eds.). **Methane and climate change**. London: Earthscan, Ltd. 2010. 261 p.

CHRISTOPHERSEN, M.; KJELDSEN, P. Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing gas migration. **Waste Management & Research**, v. 19, n. 6, p. 579–594, dez. 2001.

CHRISTY, C. D.; CHRISTY, T. M.; WITTIG, V. **A Percussion Probing Tool for the Direct Sensing of Soil Conductivity**, 1994.

CHRISTY, T. M. **A Permeable Membrane Sensor for The Detection of Volatile Compounds in Soil**. Geoprobe Systems. Salina, Kansas, 1996a.

CHRISTY, T.M. A driveable permeable membrane sensor for the detection of volatile compounds in soil. In: NATIONAL OUTDOOR ACTION CONFERENCE. 1996, Las Vegas, Nevada. **Proceedings for the detection of the Tenth National Outdoor Action Conference**, 1996b, p. 169–177.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT – GTZ. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo: CETESB, 2001. 389p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Procedimento para Identificação de Passivos Ambientais em Estabelecimentos com Sistema de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC)**. São Paulo: Cetesb, 2007. Disponível em: <<http://s.ambiente.sp.gov.br/licenciamento/arquivos/S705.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Áreas Contaminadas Críticas**. Disponível em: <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas-criticas/>>. Acesso em: 03 maio 2014.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/11/ordem-alfab%C3%A9tica.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2015a.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Manual de Produtos Químicos**. Metano. 2015b. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=METANO&cod=METANO>. Acesso em: 03 jun. 2015b.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Parecer Técnico N° 010/16/CAAA**. Processo N° 13579/2004 e PA 00142/13. São Paulo. 2016. Disponível: <<http://www.sef.usp.br/wp-content/uploads/sites/52/2016/02/Carta-Cetesb-no-060-16-CLE-e-PT-Cetesb-no-010-2016-CAAA-18.02.2016.pdf>>. Acesso: 03 dez. 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução 420/09, de 28 de dezembro 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. 2009. **DOU**. nº 249, de 30/12/2009, p. 81-84.

CONSULTORIA E ESTUDOS AMBIENTAIS – CEMA. **Análise do Cruzamento de dados de fotointerpretação com estudos analíticos ambientais**. São Paulo: 2008.

COSTA, W.M (Coord. Geral). **Relatório Ambiental Preliminar-RAP- Campus USP Leste**. São Paulo: USP, Prefeitura do Campus da Capital, 2004. 176 p. e anexos.

COSTANZA, J.; PENNELL, K. D.. **Effect of Temperature and Pressure on the MIP Sample Collection Process**. Georgia Tech University, 2000.

COSTANZA, J. **Effect of temperature and pressure on Membrane Interface Probe sample collection**. [s.l.] Georgia Institute of Technology, 2002.

COSTANZA, J. et al. Effect of temperature and pressure on the MIP sample collection process. In: Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds - 2002, Monterey. **Proceedings of the Third International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds**. Paper 1F-08. 2002. Disponível em: <<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

COUWENBERG, J. Methane emissions from peat soils. **International Wetlands**, 2009. 16p

CRUMBLING, D.M.; et al. **Applying the Concept of Effective Data to Environmental Analyses for Contaminated Sites**. EPA542-R-01-013. U.S.EPA, U.S. Government Printing Office:Washington, DC, 2001.

CRUMBLING, D.M. **Summary of Triad Approach**. U.S. Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation: Superfund Triad Support Team. 2004. Disponível em:<<http://www.triadcentral.org/ref/doc/triadsummary.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2015.

DAKOTA TECHNOLOGIES INC. **OST Software**. 2015. Disponível em: <<http://www.dakotatechnologies.com/products/ost-software/overview>>. Acesso em 15 set. 2015.

DALAN, R. A. et al. The Measurement and Analysis of Depth in Archaeological Geophysics: Tests at the Biesterfeldt Site, USA. **Archaeological Prospection**, v. 18, n. 4, p. 245–265, out. 2011.

DE MIO, G. **Condicionantes geológicos na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental**. 2005. 348 p.Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DE PAULA, M. N. et al. Funcionamento e Vantagens da Sonda MIP para Caracterização de Áreas Contaminadas por Compostos Orgânicos Voláteis Baseados na Abordagem Tríade. In: VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

DYMENT, S. **Using High Resolution Site Characterization to Improve Remedy Design and Implementation.** Making the Case for Targeted High Resolution Characterization. In: Federal Remediation Technologies Roundtable Meeting. Arlington, VA, 2011. Disponível em: <<https://frtr.gov/pdf/meetings/may11/presentations/dyment-presentation.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

ELBERLING, B. et al. Linking Soil O₂, CO₂, and CH₄ concentrations in a Wetland Soil: Implications for CO₂ and CH₄ Fluxes. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 8, p. 3393–3399, abr. 2011.

ESCOLA DE ARTES CIÊNCIAS E HUMANIDADES DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (EACH). **Concepção Geral.** 2015. Disponível em: <<http://www5.each.usp.br/concepcao-geral/>>. Acesso em: 18 nov. 2015.

FECHNER-LEVY, E. J.; HEMOND, H. F. Trapped methane volume and potential effects on methane ebullition in a northern peatland. **Limnology and Oceanography**, v. 41, n. 7, p. 1375–1383, nov. 1996.

FIACCO, R. J. et al. Application of the Triad Approach to Enhance Data Representativeness. In: Fifth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. **Proceedings.** Monterey, CA. 2006. Disponível em: <<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

FIACCO, R. J. et al. Interpretation of More Than 1,000 MIP Logs : Lessons Learned. In: Seventh International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. **Proceedings.** Monterey, CA: 2010. Disponível em:<<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>.Acesso: 20 fev.2016.

FREITAS, L. G. et al. Integração de métodos geofísicos com a sonda MIP para caracterização estratigráfica de uma área contaminada. In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. **Anais.** Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul: ABGE, 2015.

FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – FUSP. **Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (arquivos digitais – formato shapefile).** São Paulo: FUSP, 2009.

GEOPROBE SYSTEMS. 2006. **Direct Push Installation of Devices for Active Soil Gas Sampling & Monitoring.** Salina, KS: [s.n.]. Disponível em:<http://files.geoprobe.com/pdfs/soil_gas_sampling_and_monitoring_mk3098_0.pdf>. Acesso: 15 out 2015.

GEOPROBE SYSTEMS, 2009. **MIP Training Manual.** Salina, KS, 2009.

GEOPROBE SYSTEMS, 2012. **Membrane Interface Probe (MIP) - Standard Operating Procedure**. Technical Bulletin No. MK3010. Salina, KS, 2012.

GEOPROBE. 2013. **Soil Gas Sampling – PRT System Operation**. Disponível em: <http://files.geoprobe.com/pdfs/soil_gas_prt_oper_0.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2015.

GEOPROBE, 2013b. **Direct Image® User Tutorial**. Disponível em <http://geoprobe.com/literature/di-viewer-user-tutorial>. Acesso em: 15 maio 2015.

GERSTNER, D., SCHEYTT, T. FAELKER, C. 2006. Investigation of subsurface contamination — Chances and limitations of direct push technologies. **Altlasten Spektrum**, no. 6, p. 316–330, 2006.

GIACHETI, H., ALBUQUERQUE, P. **Ensaio de Penetração do Cone e do Piezocone - CPT e CPTU - Breve Histórico**. Apostila do curso “Execução e Interpretação de Ensaios de Cone (CPT) e Piezocone (CPTu)”. ABMS, 2014.

GILMORE, A.M. **High resolution investigation in a heterogeneous aquifer and evaluation of the membrane interface probe to assess back diffusion potential**. 2010. 463 p. M.A.Sc. Thesis, University of Guelph. Canada. 2010.

GRIFFIN, T. W.; WATSON, K. W. A Comparison of Field Techniques for Confirming Dense Nonaqueous Phase Liquids. **Ground Water Monitoring & Remediation**, p. 48–59, 2002.

HARRINGTON, G. A.; HENDRY, M. J. Using direct-push EC logging to delineate heterogeneity in a clay-rich aquitard. **Ground Water Monitoring and Remediation**, v. 26, n. 1, p. 92–100, 2006.

HAUSMANN, J. et al. Technique, analysis routines, and application of direct push-driven in situ color logging. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 11, p. 957, jun. 2016.

HEINZE, K. L.; DIGUISEPPI, W. H. Defining TCE Plume Source Areas Using the Membrane Interface Probe (MIP). **Soil and Sediment Contamination**, v. 12, n. 6, p. 799–813, 2003.

HOOKE, P J; BANNON, M P. Methane: its occurrence and hazards in the construction industry. **Construction Industries Research and Information Association (CIRIA)**. Report No 130. London. 1993.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – IAC. **Informação Sobre Interpretação de Análise de Solo**. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais. Campinas: IAC, 2017. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/interpretacaoanalise.php>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Malha municipal digital do Brasil: Censo 2010 (arquivos digitais – formato shapefile)**.

Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/malhas_digitais/>. Acesso 15 set. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Relatório Final – Investigação do Subsolo da Gleba I do Campus da EACH/USP para Avaliação de Risco da Saúde Humana e Complementação da Investigação das Áreas de Implantação do Ginásio de Esportes.** RT 123.582-205/11. 2011.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Relatório Técnico 130991-205-Final - **Detalhamento do sistema de ventilação do subsolo de edifícios do campus da EACH/USP.** São Paulo, SP. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Panorama do setor de gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil. In: **Seminário: Mercado Ambiental Brasileiro 2015.** São Paulo, 2015. Disponível em: http://www.ipt.br/noticia/1026-mercado_ambiental.htm. Acesso em: 20 dez. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Gráficos Climatológicos.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php>. Acesso em: 15 dez. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. **DOQ-CGCRE-008** - Orientação sobre a validação de métodos de ensaios químicos. Revisão 05 – ago.2016. Rio de Janeiro, 2011. 31p.

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL – ITRC. Sampling, Characterization and Monitoring Team. **Technical and Regulatory Guidance for the Triad Approach: A New Paradigm for Environmental Project Management.** 2003. Disponível em: <<http://www.itrcweb.org>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 pp.

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico De Biogás.** 1a Ed. Lajeado, RS. 2014. 69 p.

KELLY, W. R.; MATISOFF, G.; FISHER, J. B. The effects of a gas well blow out on groundwater chemistry. **Environmental Geology and Water Sciences**, v. 7, n. 4, p. 205–213, dez. 1985.

KJELDSEN, P.; FISCHER, E. V. Landfill gas migration - Field investigations at Skellingsted landfill, Denmark. **Waste Management and Research**, v. 13, n. 5, p. 467–484, 1995.

KRAM, M.L., A.A. KELLER, J. ROSSABI, AND L.G. EVERETT. DNAPL Characterization Methods and Approaches, Part 2: Cost Comparisons. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 22, n. 1, p. 46-61, 2002.

KUCKARTZ, S. F. R. V. **Estudo de métodos de coleta e análise de metano em gás de mina de carvão subterrânea**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e tecnologia de materiais) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

KULKAMP, M.S.; CORSEUIL, H.X.; AMORIM Jr, C.J. Influência do etanol na biodegradação de hidrocarbonetos de petróleo em um aquífero contaminado com uma mistura de diesel etanol. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Livro de resumos**. Florianópolis: Associação Brasileira Águas Subterrâneas, 2002.

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. **European Journal of Soil Biology**, v. 37, n. 1, p. 25–50, 2001.

LI, H.; CARLSON, K. H. Distribution and Origin of Groundwater Methane in the Wattenberg Oil and Gas Field of Northern Colorado. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 3, p. 1484–1491, fev. 2014.

LIDE, D.R. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 73rd Edition. Boca Raton, FL. Taylor & Francis (Ed.), 1992. 2472 p.

MA, J. et al. Methane Bioattenuation and Implications for Explosion Risk Reduction along the Groundwater to Soil Surface Pathway above a Plume of Dissolved Ethanol. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 11, p. 6013–6019, jun. 2012.

MA, J. et al. Numerical Model Investigation for Potential Methane Explosion and Benzene Vapor Intrusion Associated with High-Ethanol Blend Releases. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 1, p. 474–481, jan. 2014.

MABROUK, A.; ROWE, R. K. Effect of gassy sand lenses on a deep excavation in a clayey soil. **Engineering Geology**, v. 122, n. 3–4, p. 292–302, 2011.

MAHLER, N. T. et al. Use of Membrane Interface Probe (MIP) and Other High-Resolution Methods for Low-Permeability Zone Characterization. In: Eighth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. **Proceedings**. Monterey, CA. 2012. Disponível em: <<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

MCCALL, W. Electrical Conductivity Logging to Determine Control Of Hydrocarbon Flow Paths in Alluvial Sediments. In: 10th National Outdoor Action Conference. **Anais**. Las Vegas, Nevada, 1996. Disponível em: <http://files.geoprobe.com/pdfs/condpaperwes_0.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2016.

MENDONÇA, C. A. et al. Resistivity and induced polarization monitoring of biogas combined with microbial ecology at a brownfield site. **Interpretation**, Vol. 3, No. 4 (November, 2015); p. SAB43–SAB56, 2015a.

MENDONÇA, C. A. et al. Integrated earth resistivity tomography (ERT) and multilevel sampling gas: a tool to map geogenic and anthropogenic methane accumulation on brownfield sites. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 2, p. 1217–1226, 2015b.

MISSOURI DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES - MDNR. **Gas Migration Pathways and Extent**. 1999. Disponível em: <<http://geoprobe.com/literature/gas-migration-pathways-and-extent>>. Acesso em: 08 maio 2014.

MONDELLI, G. **Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2008. 362 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 2008.

MORINAGA, C. M. **Áreas contaminadas e a construção da paisagem pós-industrial na cidade de São Paulo**. 2013. 201 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. **Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Part 2**. Madison, Soil Science Society of America, 1982. p.539-579.

NICHOLS, J.D. **Relation of organic carbon to soil properties and climate in the southern Great Plains**. Soil Science Society of America. J. 48, p.1382-1384, 1984

NILSSON et al. New halogen-specific detector applied to the analysis of chlorinated fatty acids. **Journal of Chromatography**, A, 912, p. 99–106, 2001.

NEW SOUTH WALES (Estado). Department of Environment, Climate Change and Water – NSW DECCW. **Vapour Intrusion : Technical Practice Note**. Sydney: 2010. Disponível em: <<http://www.epa.nsw.gov.au/resources/clm/10774vapourintr.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

NEW SOUTH WALES (Estado). Environment Protection Authority – NSW EPA. **Guidelines for the Assessment and Management of Sites Impacted by Hazardous Ground Gases**. Sydney: 2012. Disponível em: < <http://www.epa.nsw.gov.au/resources/clm/120932GroundGas.pdf> >. Acesso em: 10 abr. 2016.

PRADO, M. A. C.; CAMPOS, C. M. M.; SILVA, J. F. Estudo da variação da concentração de metano no biogás produzido a partir das águas residuárias do café. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.475-484, 2010.

POLESE, L. **Cromatografia Gasosa(GC)**. Aula ministrada no IGCE - UNESP- Campus de Rio Claro –SP. Tópicos Especiais: Análise de compostos orgânicos em água e solo por cromatografia gasosa.UNESP, 2014.

PUBCHEM. National Center for Biotechnology Information. **PubChem Compound Database: Compound Summary for CID 297. Methane.** Disponível em: <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/297>>. Acesso em: 21 dez. 2016.

QUINNAN, J. **Real-Time High Resolution LNAPL and DNAPL Characterization – Part 1: Philosophy and Background.** In: North American Environmental Field Conference. Tampa, FL. Mar. 2012.

RAVELLA, M. et al. Environmental Engineer: Applied Research and Practice. Application of the Membrane Interface Probe (MIP) to Delineate subsurface DNAPL Contamination. In: **American Academy of Environmental Engineers. Annapolis, Vol.1, winter 2007.** Disponível em: <<http://www.aaee.net/Downloads/EEJournalV1P1.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2015.

RAVELLA, M. et al. Adaptive Remediation: Using an MIP to Enhance Efficacy of Permanganate Application in Real Time. In: Sixth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. **Proceedings.** Monterey, CA. 2008. Disponível em: <<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>. Acesso: 30 jun. 2015.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B. (eds.) **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** São Paulo: Beca, 2004. p.383-405.

RIYIS, M.T. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução.** 2012. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, 2012.

RIYIS, M. T. et al. Investigação de áreas contaminadas com elaboração do modelo conceitual em campo utilizando ferramentas de alta resolução (HRSC). **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA)**, p. 125–137, 2013.

RHOADES, J.D.; SCHILFGAARDE, J. VAN. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. **Soil Sci. Soc. of America Journal** v.40, p. 647-651, 1976.

ROSSI, M.; PITKIN, S. Optimizing Benefits and Managing Expectations for Membrane Interface Probe Surveys. In: Eighth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. **Proceedings.** Monterey, CA. 2012. Disponível em: <<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

SÃO PAULO (Estado). Lei Estadual 13.577, de 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. **Diário Oficial do Estado.** São Paulo. 2009.

SARA, M. N. **Site Assessment and Remediation Handbook**. 2nd Edition., Boca Raton, FL. CRC Press, 2003. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=M0vLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 21 jan. 2016.

SANTOS; R. D et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5^a ed. revisada e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SCHULMEISTER, M. K. et al. Direct-push electrical conductivity logging for high-resolution hydrostratigraphic characterization. **Ground Water Monitoring and Remediation**, v. 23, n. 3, p. 52–62, 2003.

SCHUMACHER, B. A. et al. Macro- and Micro-Purge Soil-Gas Sampling Methods for the Collection of Contaminant Vapors. **Ground Water Monitoring & Remediation**, v. 29, n. 1, p. 138–143, jan. 2009.

SEGRS, R. Methane production and methane consumption--a review of processes underlying wetland methane fluxes [Review]. **Biogeochem.**, v. 41, p. 23–51, 1998.

SEPICH, J. Hazard Assessment by Methane CVP (Concentration/Volum/Pressure): (Everything You Knew about Methane Action Levels Was Wrong). In: Sixth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. **Proceedings**. Monterey, CA. 2008. Disponível em: <<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>. Acesso: 20 fev. 2016.

SERVMAR SERVIÇOS TÉCNICOS AMBIENTAIS (SERVMAR). Relatório MA/3134/05/SNH - **Diagnostico Ambiental na área da USP Campus Zona Leste, São Paulo, SP**. 2005.

SERVMAR SERVIÇOS TÉCNICOS AMBIENTAIS (SERVMAR). Relatório MA/11988/12/BLS - **Investigação Ambiental do solo no campus da EACH/USP, São Paulo, SP**. 2012.

SERVMAR SERVIÇOS TÉCNICOS AMBIENTAIS (SERVMAR). Relatório MA/12936/14/BLS. **Relatório de Investigação Detalhada, Avaliação de Risco à Saúde Humana e Plano de Intervenção na AI-01 e Investigação Detalhada de Gases**. São Paulo, SP. 2014.

SILVA, F. C. da. (Org). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 170-174p. Disponível em: <http://livraria.sct.embrapa.br/liv_resumos/pdf/00083136.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2016.

SILVA, R.; PIRES, M. J. R.; AZEVEDO, C. M. N.; FAGUNDES, L.; GARAVAGLIA, L.; GOMES C. J. B. Monitoring light hydrocarbons in Brazilian coal mines and in confined coal samples. **Int. J. Coal Geol.** 84, p. 269–275, 2010.

SILVA, T.S.; FREITAS, F.S.N.; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Eng. Sanit. Ambiental**. v.18 n.2, p. 95-104, abr./jun.2013.

SRI INSTRUMENTS. **Detectores: Electron Capture Detector – ECD.** 2015a. Disponível em: < http://www.srigc.com/pages/document_downloads/>. Acesso em: 08 set. 2015.

SRI INSTRUMENTS. **Detectores: Flame Ionization Detector – FID.** 2015b. Disponível em: < http://www.srigc.com/pages/document_downloads/>. Acesso em: 08 set. 2015.

STRONG, P. J.; XIE, S.; CLARKE, W. P. Methane as a Resource: Can the Methanotrophs Add Value? **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 7, p. 4001–4018, abr. 2015.

SYMONS, B. et al. In Situ Chemical Oxidation Pilot Test Utilizing a High Resolution Site Characterization-Driven Approach to Optimize Injection Locations and Target Intervals While Evaluating Mass Removal. In: Eighth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. **Proceedings**. Monterey, CA, 2012. Disponível em: <<https://www.battelle.org/newsroom/conferences/chlorinated-conference/publications>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, v. 32, n. 7, p. 1243–1257, 2007.

TILLMAN, N.; SOHL, J. **White Paper on Triad**. Baltimore, Maryland, 2010. Disponível em: <www.columbiadata.com>. Acesso em: 15 dez. 2015.

TOXNET system. **Toxicology Bibliographic Information: a database of the National Library of Medicine's. Methane.** Disponível em: <<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+167>>. Acesso em: 10 dez. 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Comparison of Geoprobe PRT and AMS GVP Soil-gas Sampling Systems with Dedicated Vapor Probes in Sandy Soil at the Raymark Superfund Site.** Cincinnati, Ohio: 2006. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1001HNK.txt>>. Acesso em: 25 maio 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Clean Up Information (CLU-IN). **High-Resolution Site Characterization (HRSC).** Disponível em <<http://www.clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/>>. USEPA, 2008. Acesso em: 13 maio 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Oswer Technical Guide for Assessing and Mitigating the Vapor Intrusion Pathway From Subsurface Vapor Sources To Indoor Air:** OSWER Publication. Washington, DC: 2012. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/oswer-vapor-intrusion-technical-guide-final.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **High Resolution Site Characterization for Groundwater Short Course.** 23rd Annual NARPM Training Program. 2014. Disponível em: < <http://clu-in.org/characterization/>>

technologies/hrsc/pdfs/HRSC-Participant-Manual-NARPM-2014.pdf>. Acesso em: 06 out. 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Clean Up Information (CLU-IN). **Membrane Interface Probe (MIP)**. 2015. Disponível em: <<http://clu-in.org/characterization/technologies/mip.cfm>>. Acesso em: 13 mar. 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Chapter V: Direct Push Technologies. In: **Expedited Site Assessment Tools for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Regulators**. [s.l: s.n.]. 2016. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/esa-ch5.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2016.

VARNIER, C.; HIRATA, R. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, p. 77-80, 2002.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE - VDI. **VDI 3865-2**. Measurement of organic soil pollutants - Techniques of active sampling of soil gas. Düsseldorf, 1998. 57 p.

VERLENGIA, F.; GARGANTINI, H. Determinação de matéria orgânica em solos: estudo comparativo de métodos. **Bragantia**, v. 27, n. 2, p. 257-265, 1968.

WATT, M. D. et al. Expediting Sustainable Brownfields Redevelopment by Applying Triad Using the Membrane Interface Probe. **Remediation Journal**, Vol.20, Issue 4, p.17-37, Autumn, 2010.

WEBER AMBIENTAL. **Relatório Técnico: Evolução do Monitoramento de Intrusão de Gases e da Operação do Sistema de Ventilação. 2º Trimestre/ 2016 (Abril a Junho)**. USP LESTE. São Paulo/SP. Projeto 311.1264.14/E9VMGS-VS.01. São Paulo. 2016. Disponível em: < <http://www5.each.usp.br/gas-metano/>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

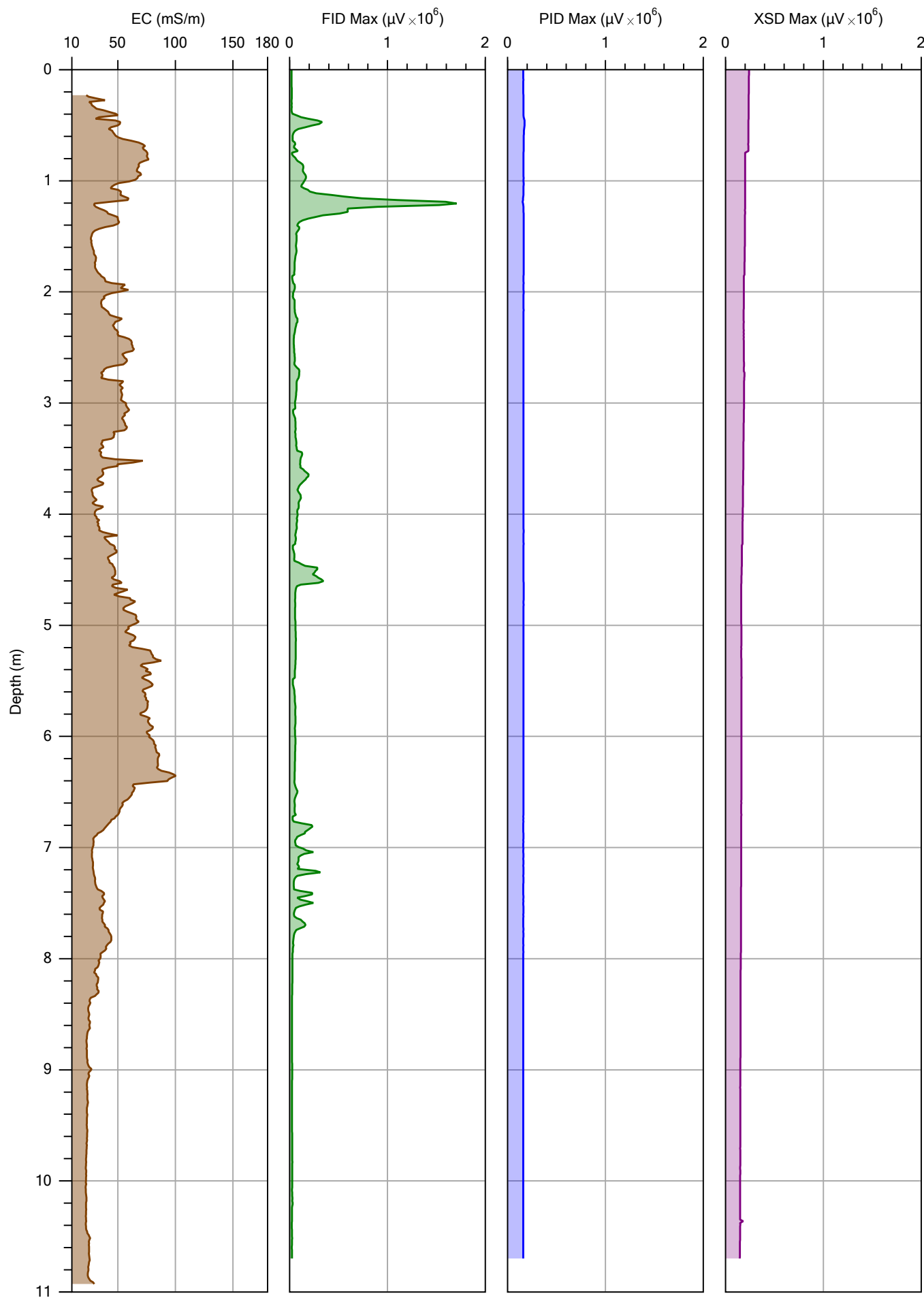
WILLIAMS, G. M.; AITKENHEAD, N. Lessons from Loscoe - the uncontrolled migration of landfill gas. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. V. 24, n. 2, 191–207. 1991.

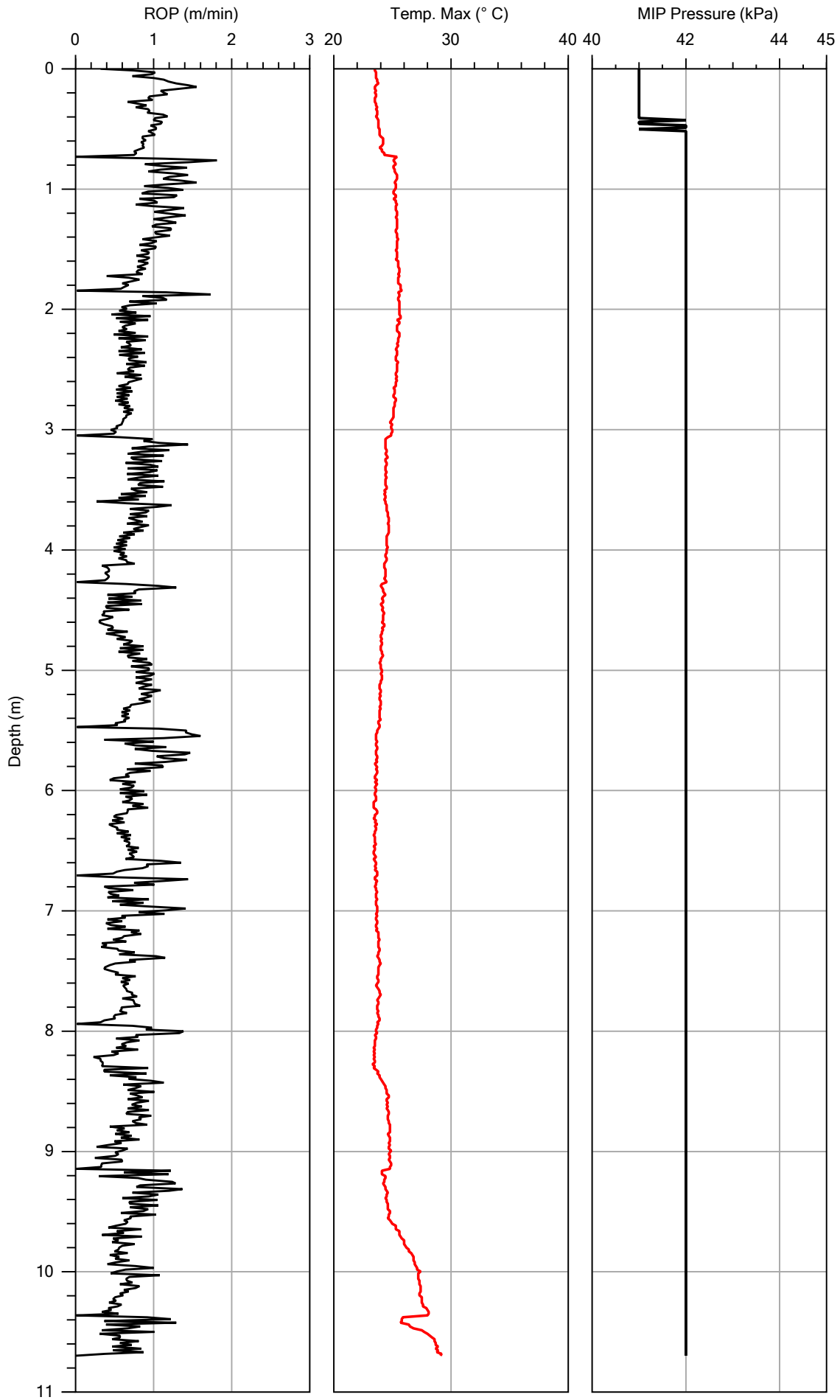
WILSON, J. T.; ROSS, R. R.; ACREE, S. Using direct-push tools to map hydrostratigraphy and predict MTBE plume diving. **Ground Water Monitoring & Remediation**, v. 25, n. 3, p. 93–102, 2005.

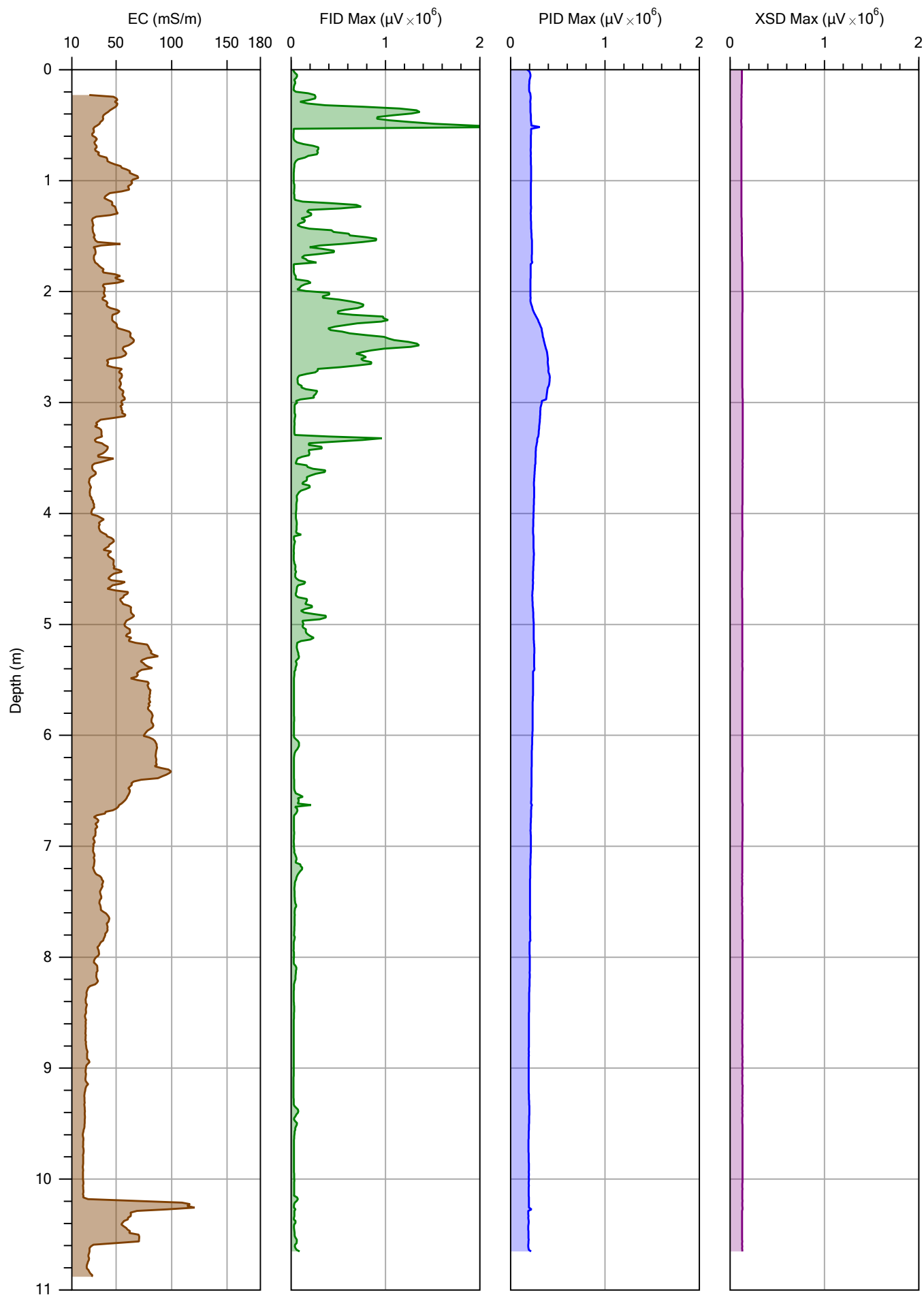
YAO, Y. et al. A Petroleum Vapor Intrusion Model Involving Upward Advective Soil Gas Flow Due to Methane Generation. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 19, p. 11577–11585, out. 2015.

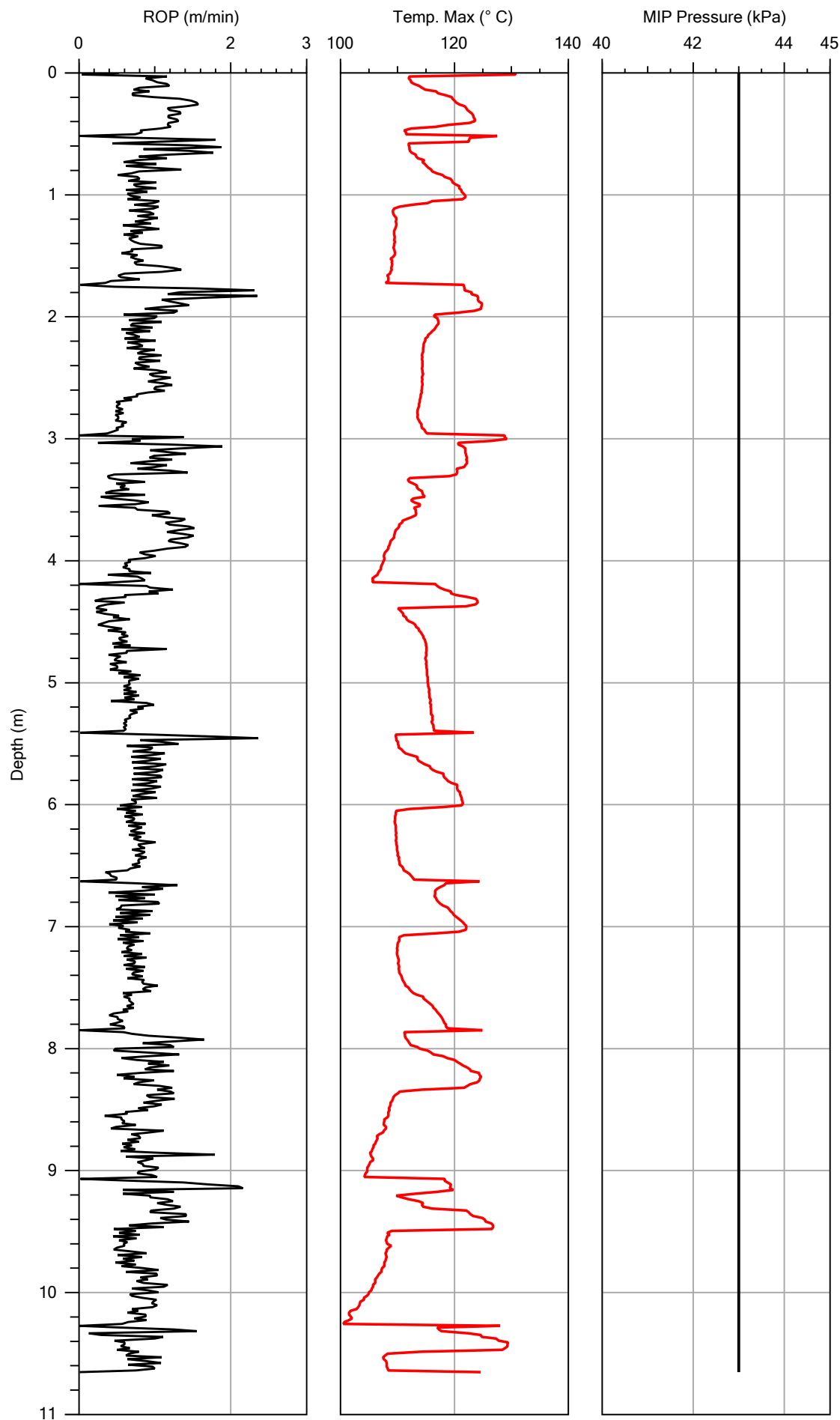
ZUME, J. T.; TARHULE, A.; CHRISTENSON, S. Subsurface imaging of an abandoned solid waste landfill site in Norman, Oklahoma. **Ground Water Monitoring & Remediation**, v. 26, n. 2, p. 62–69, 2006.

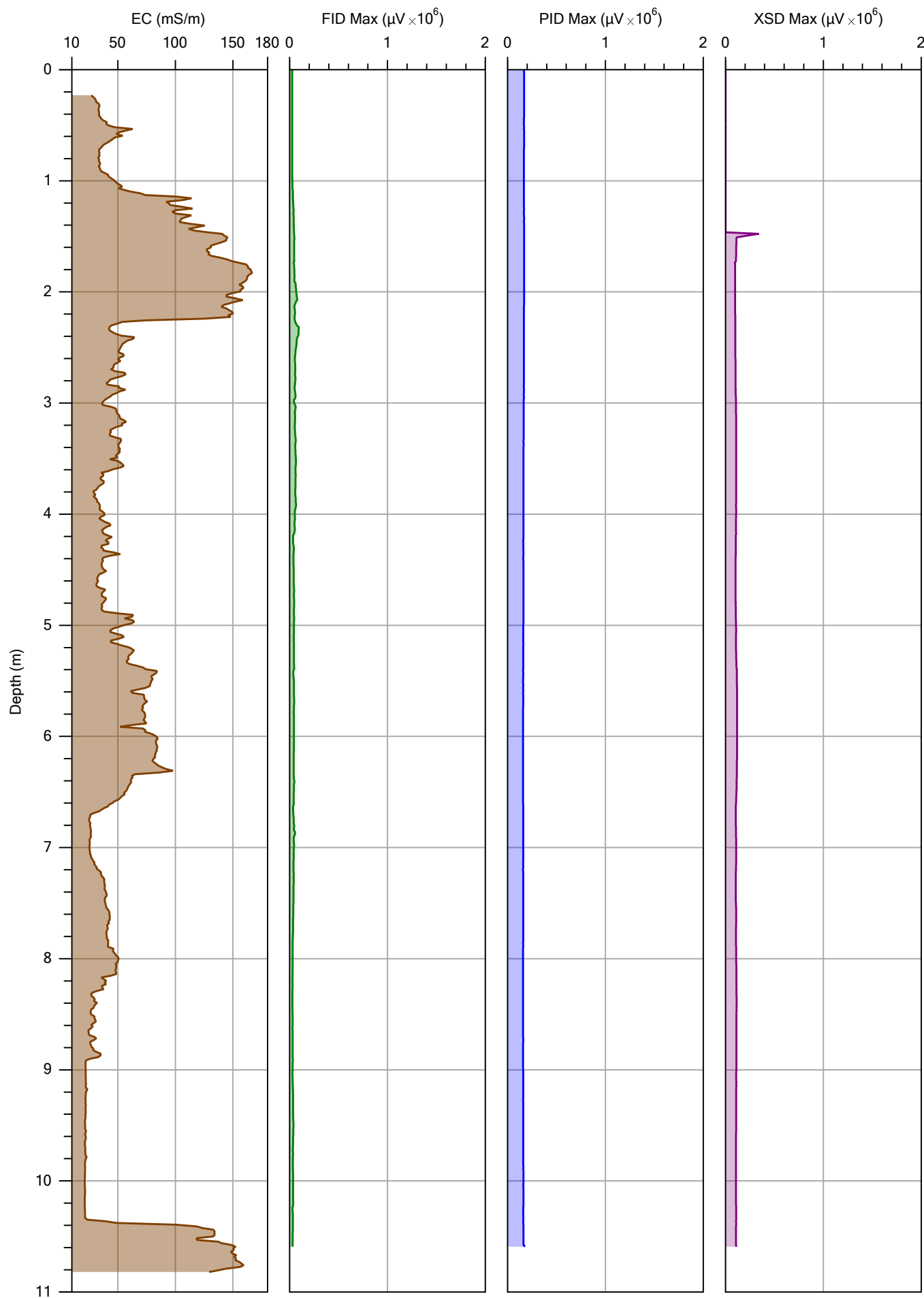
Apêndice A – Resultados do MIP

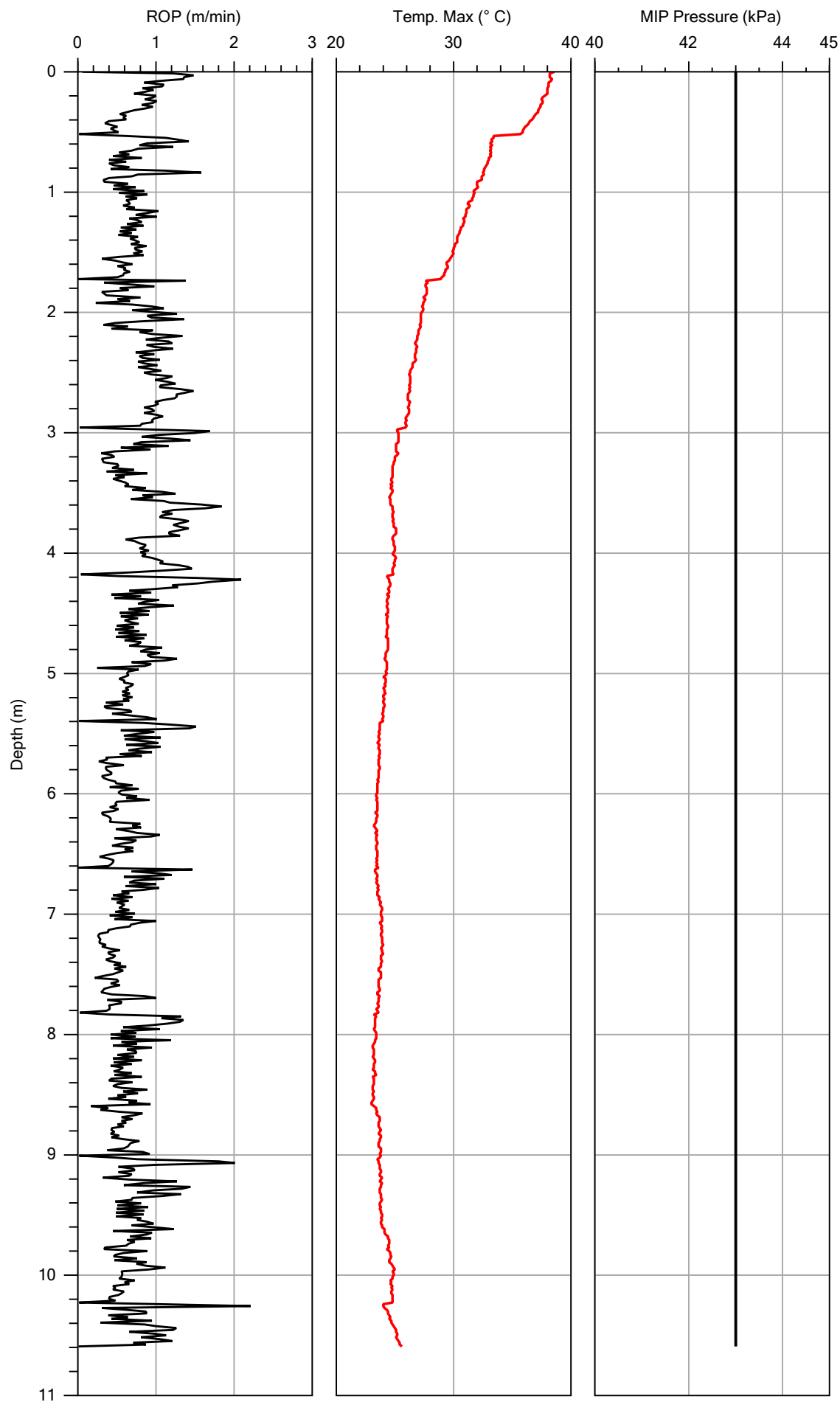


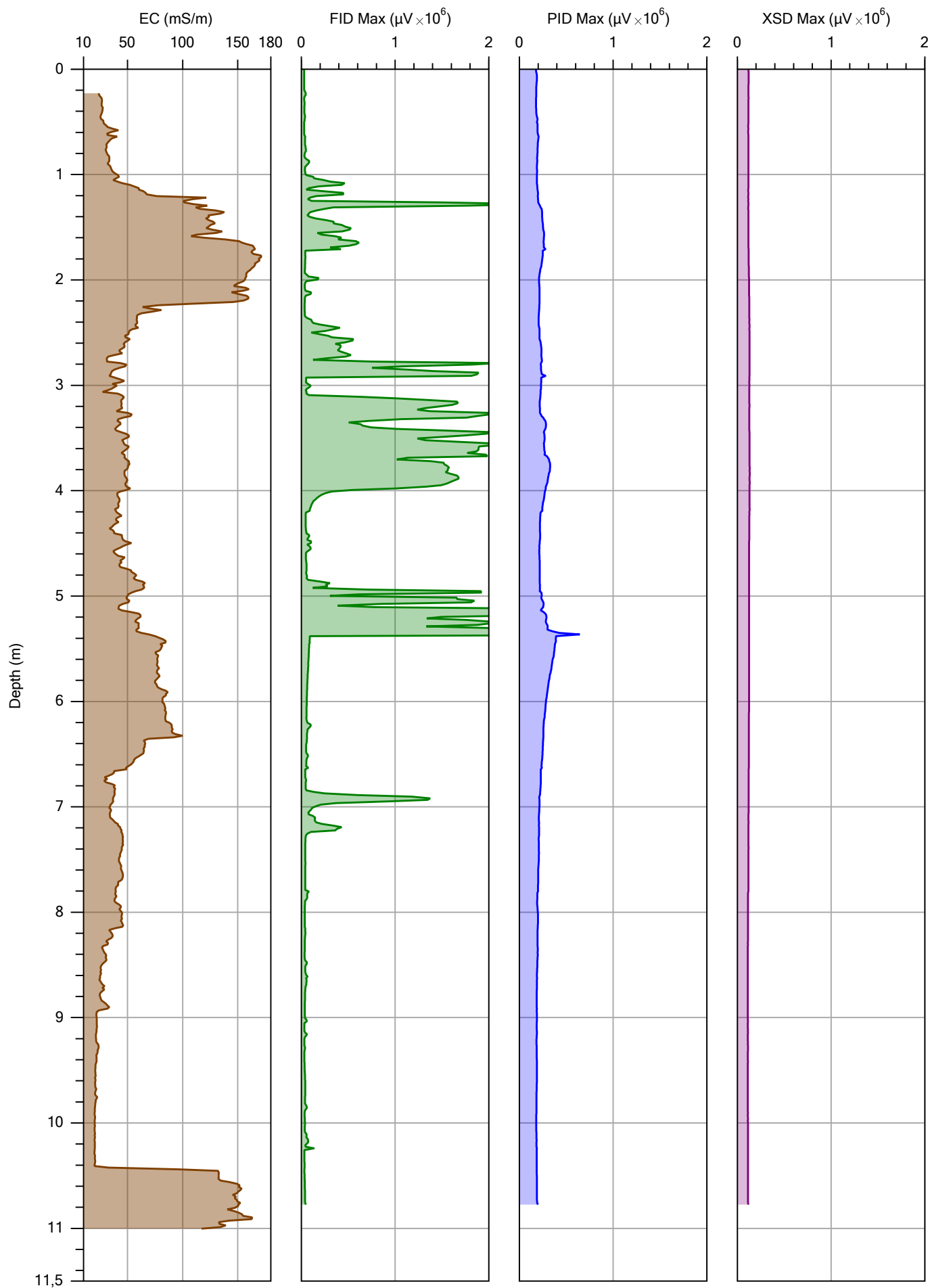


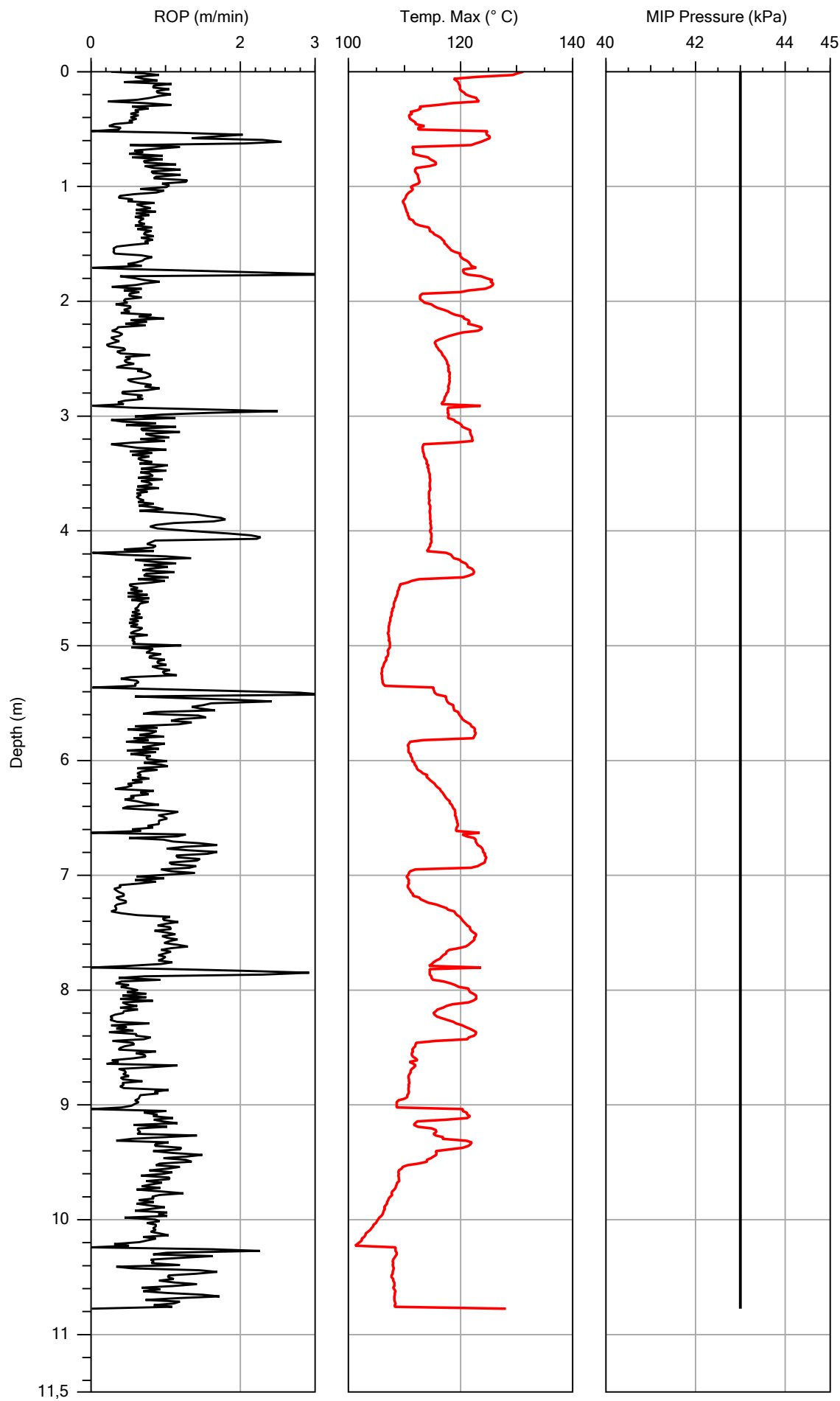


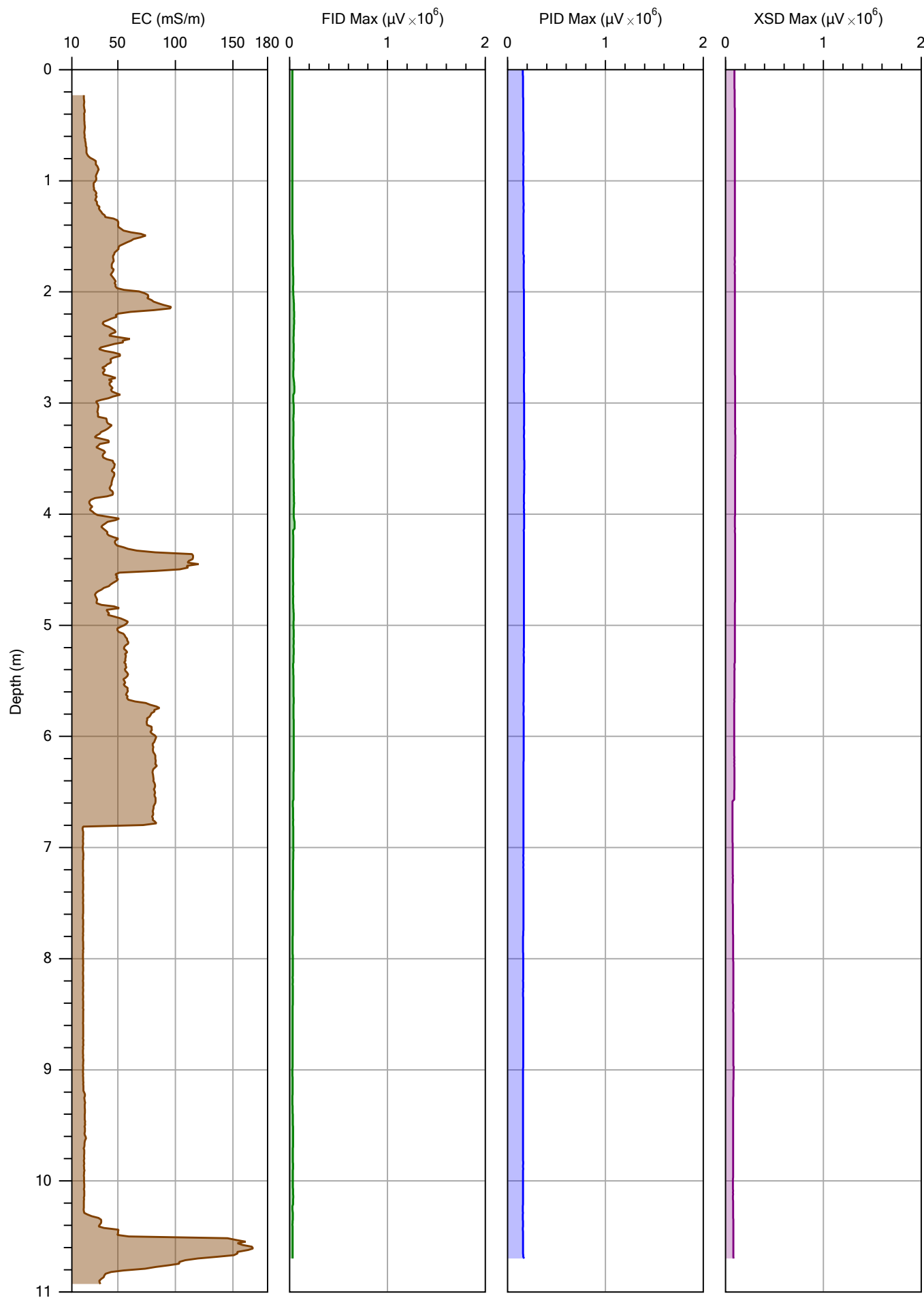


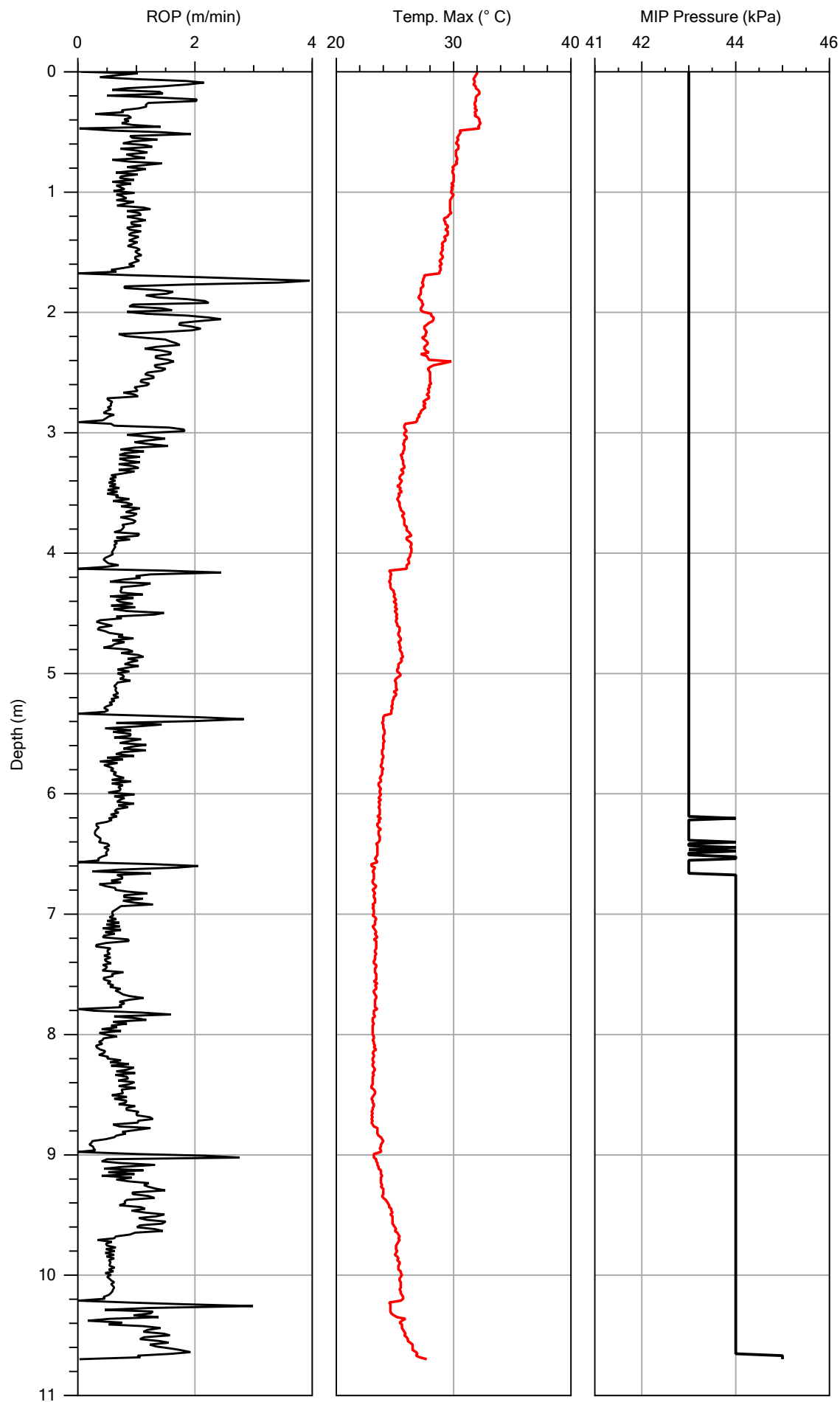


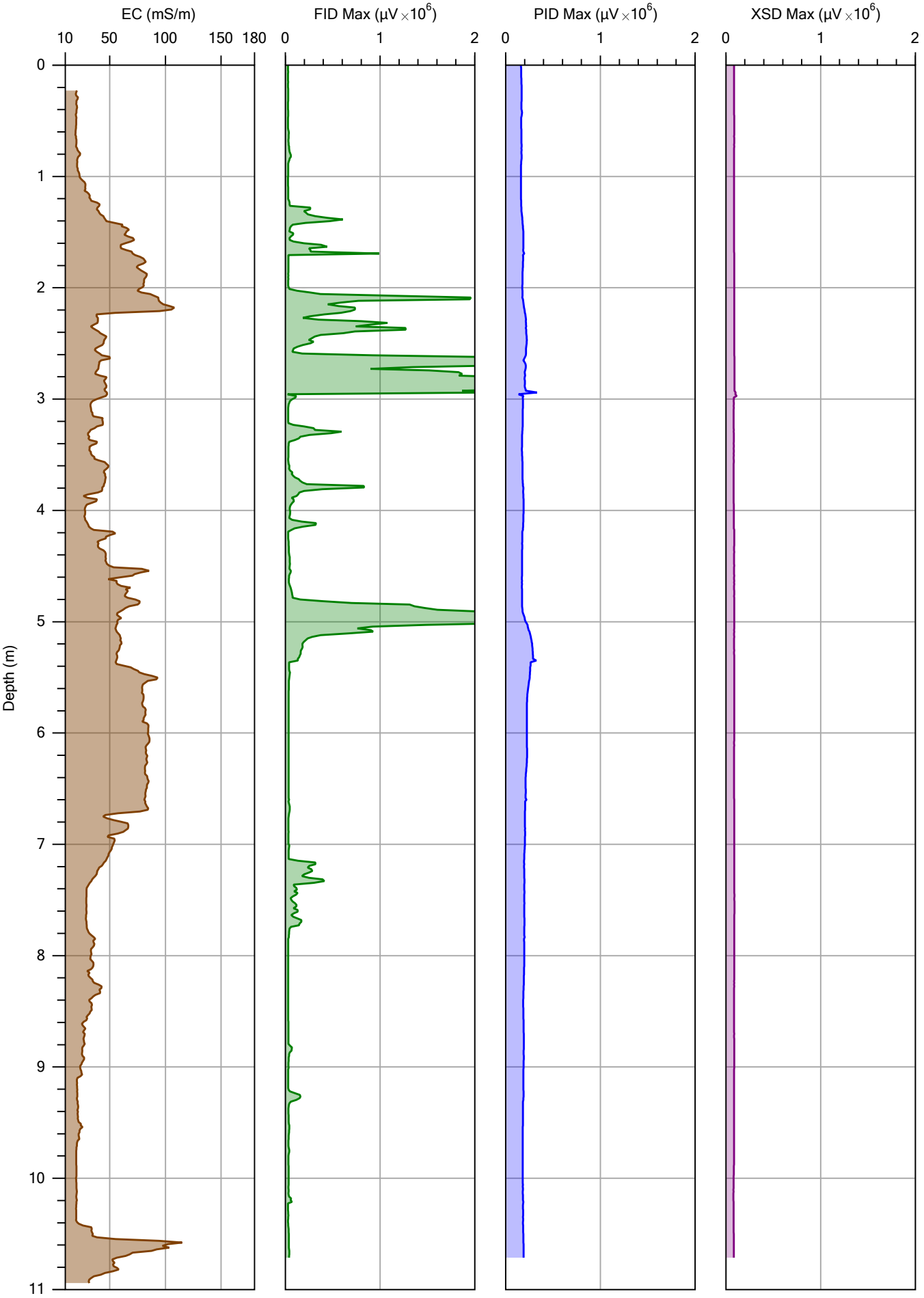


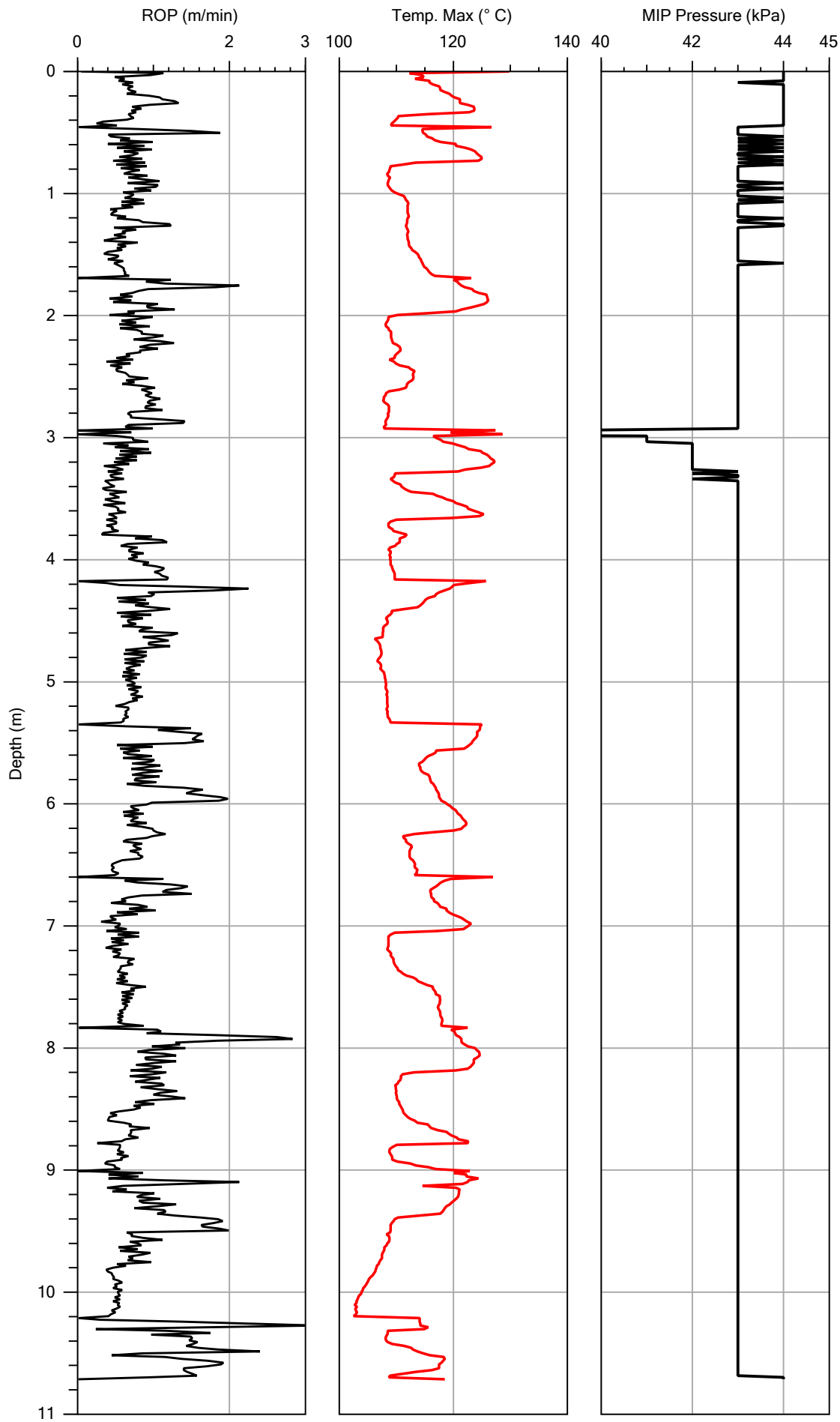


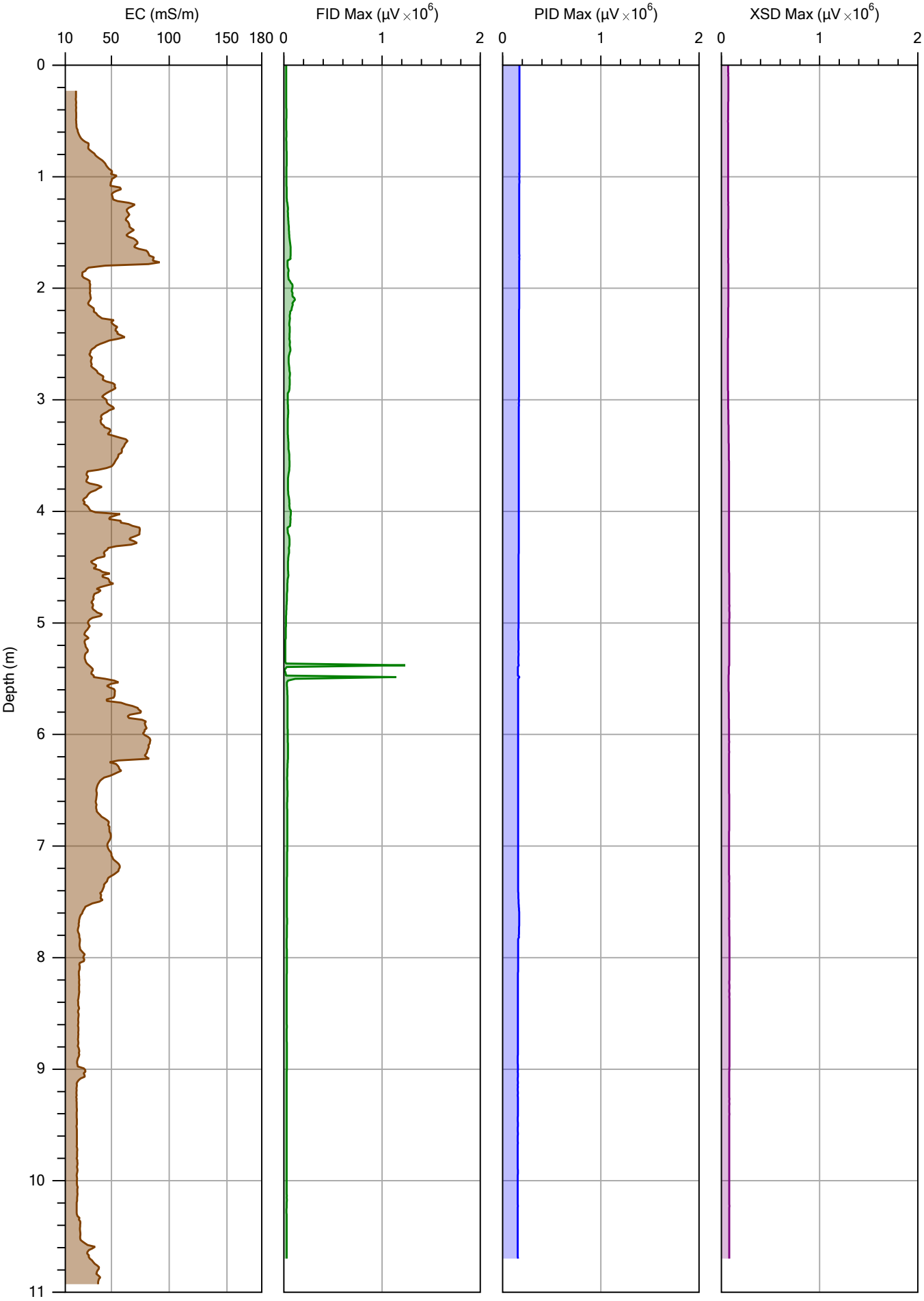


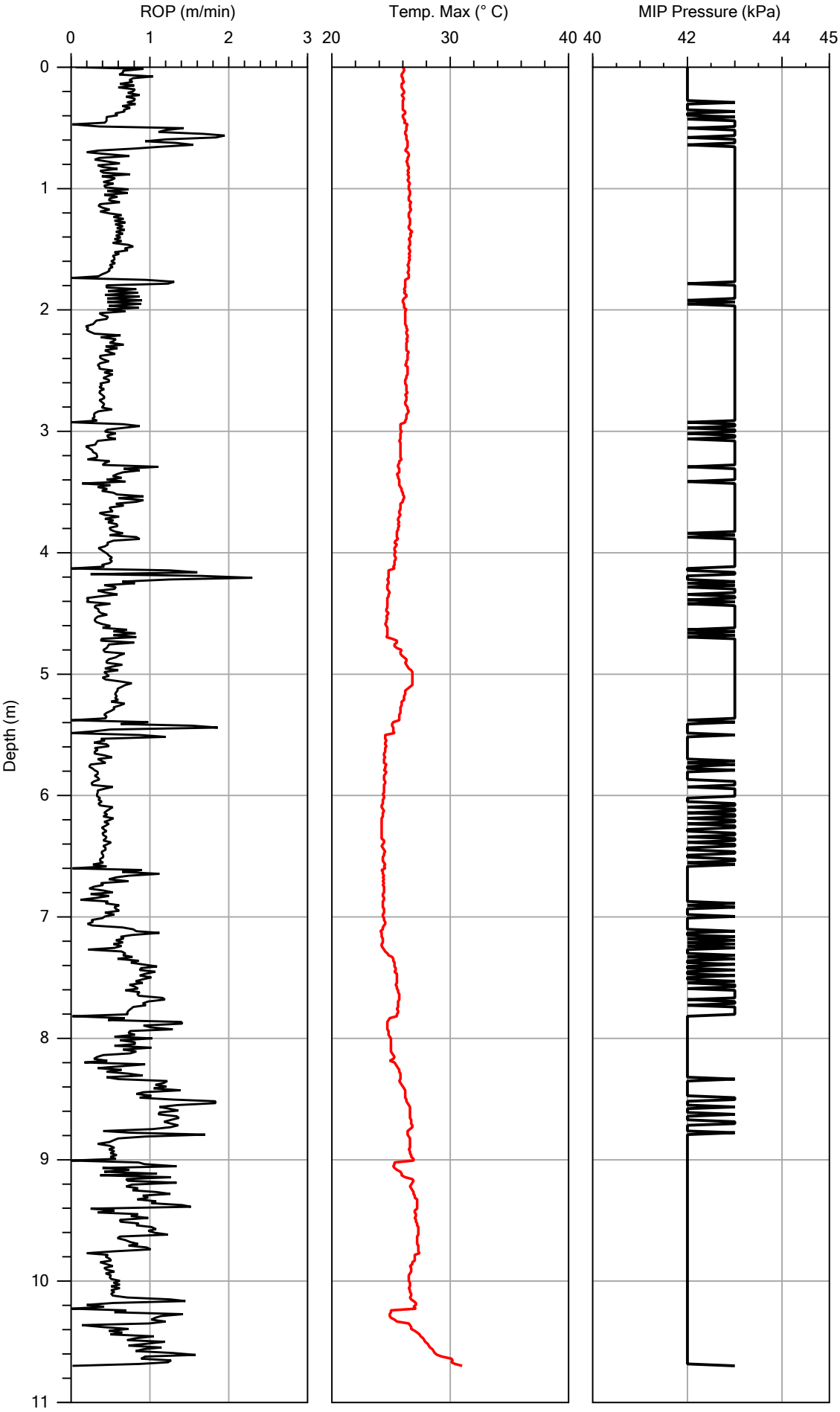


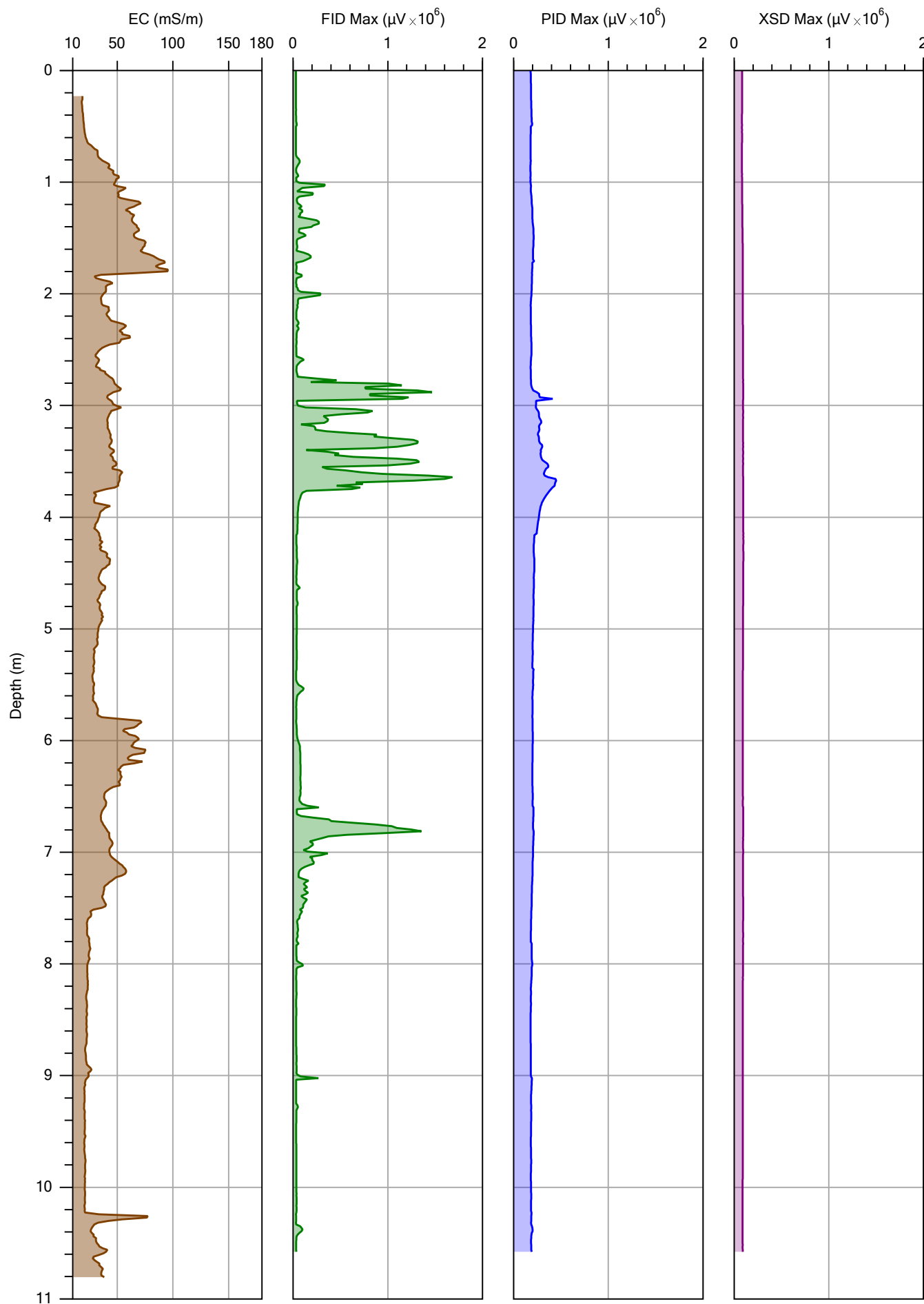


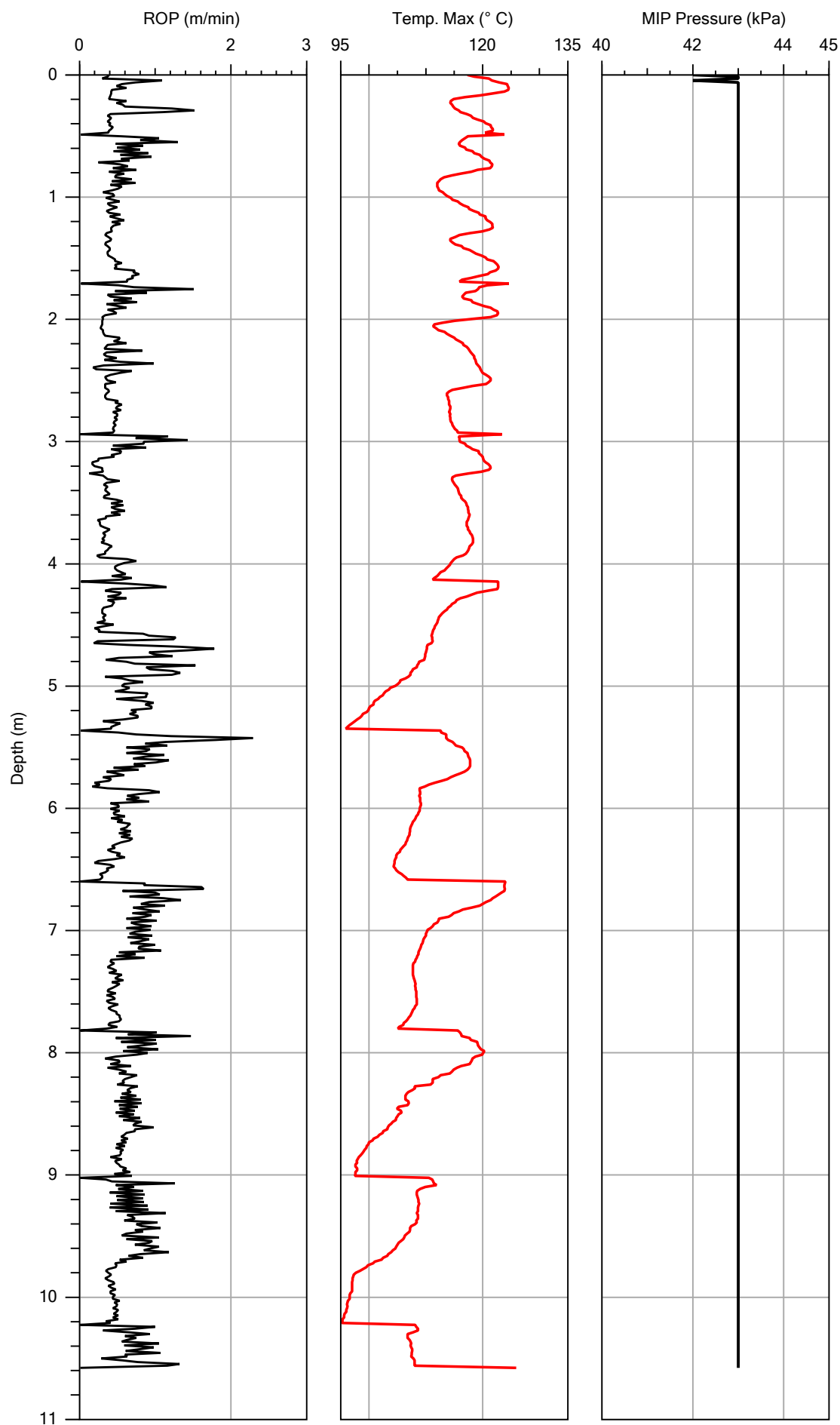


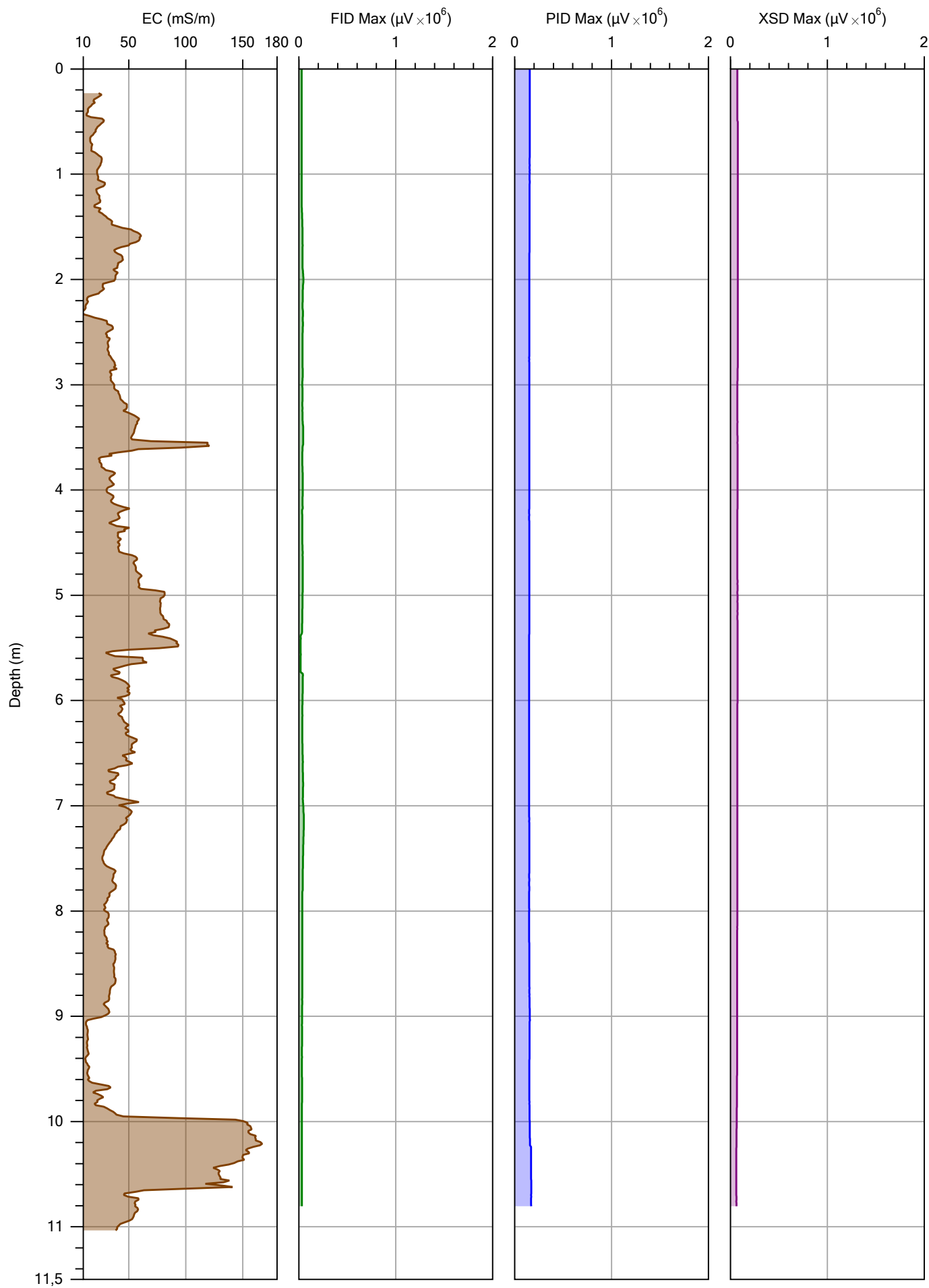


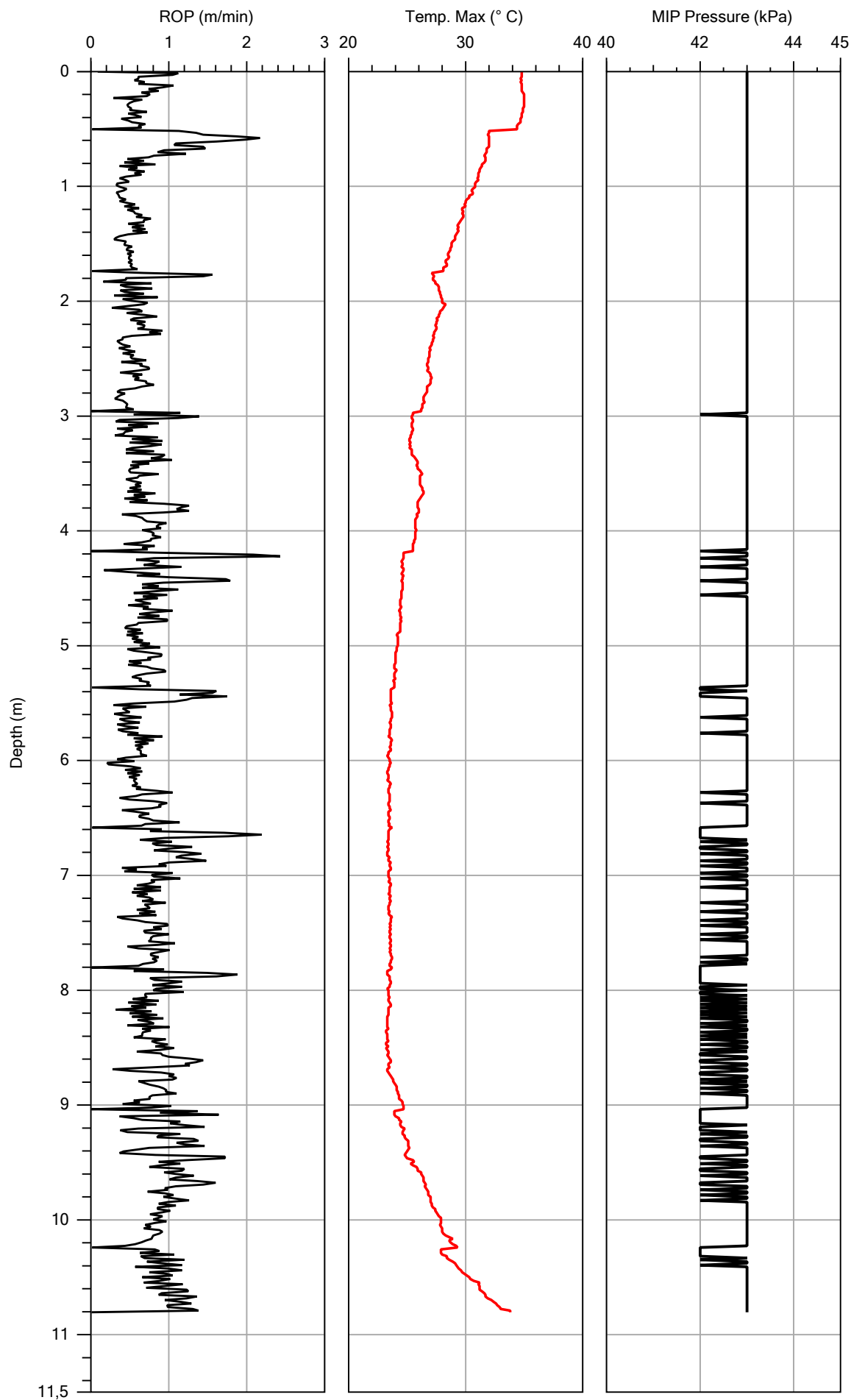


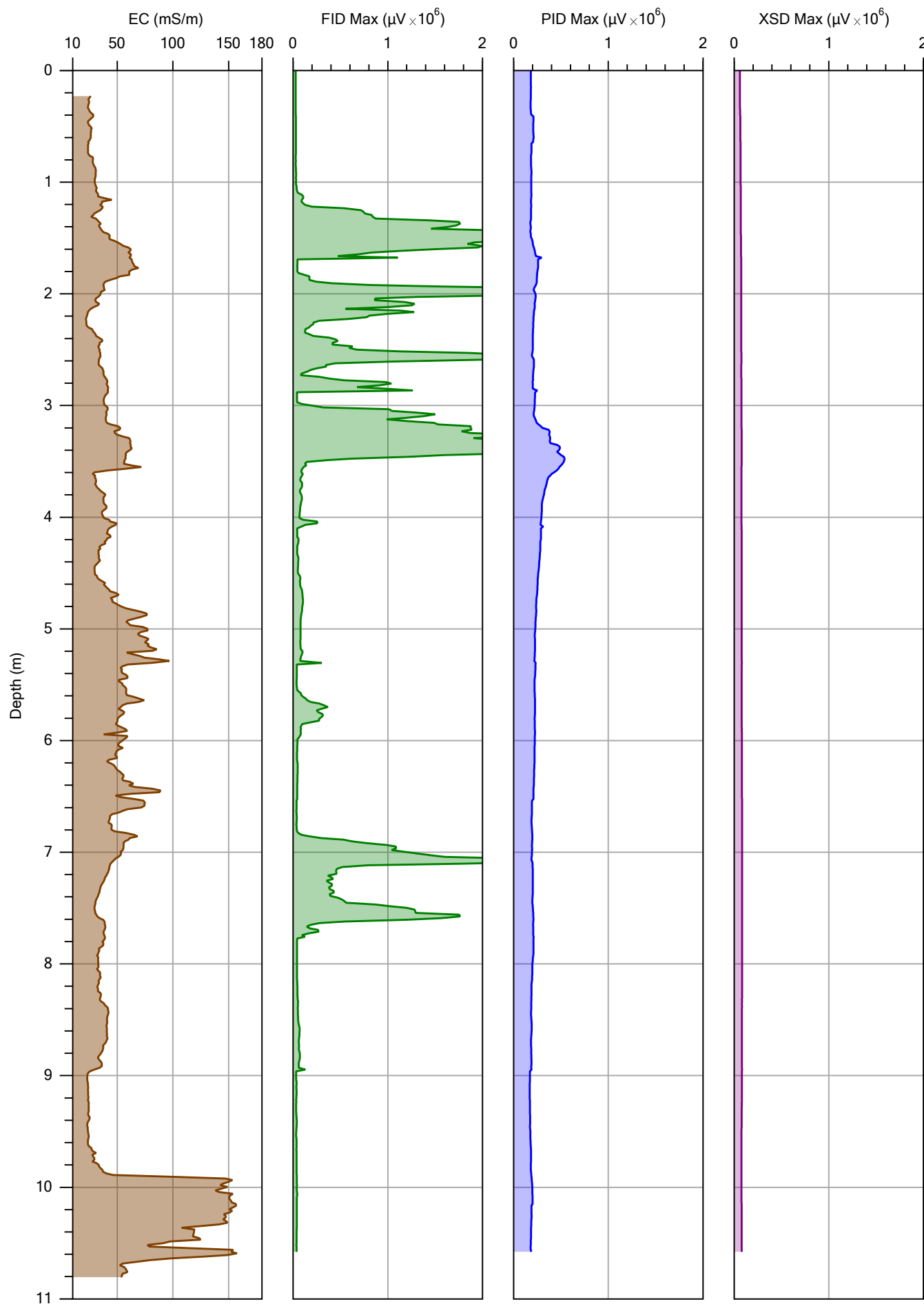


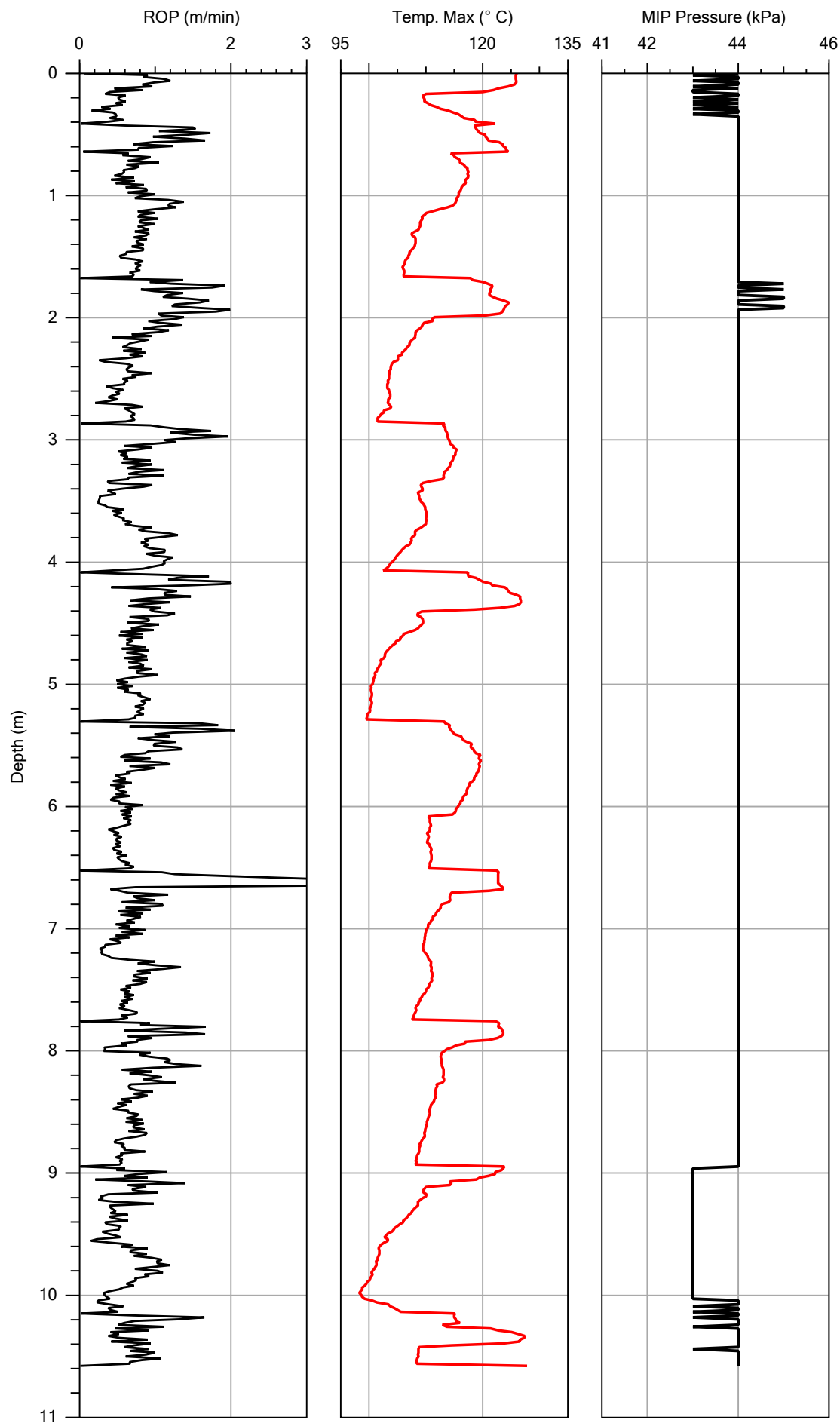


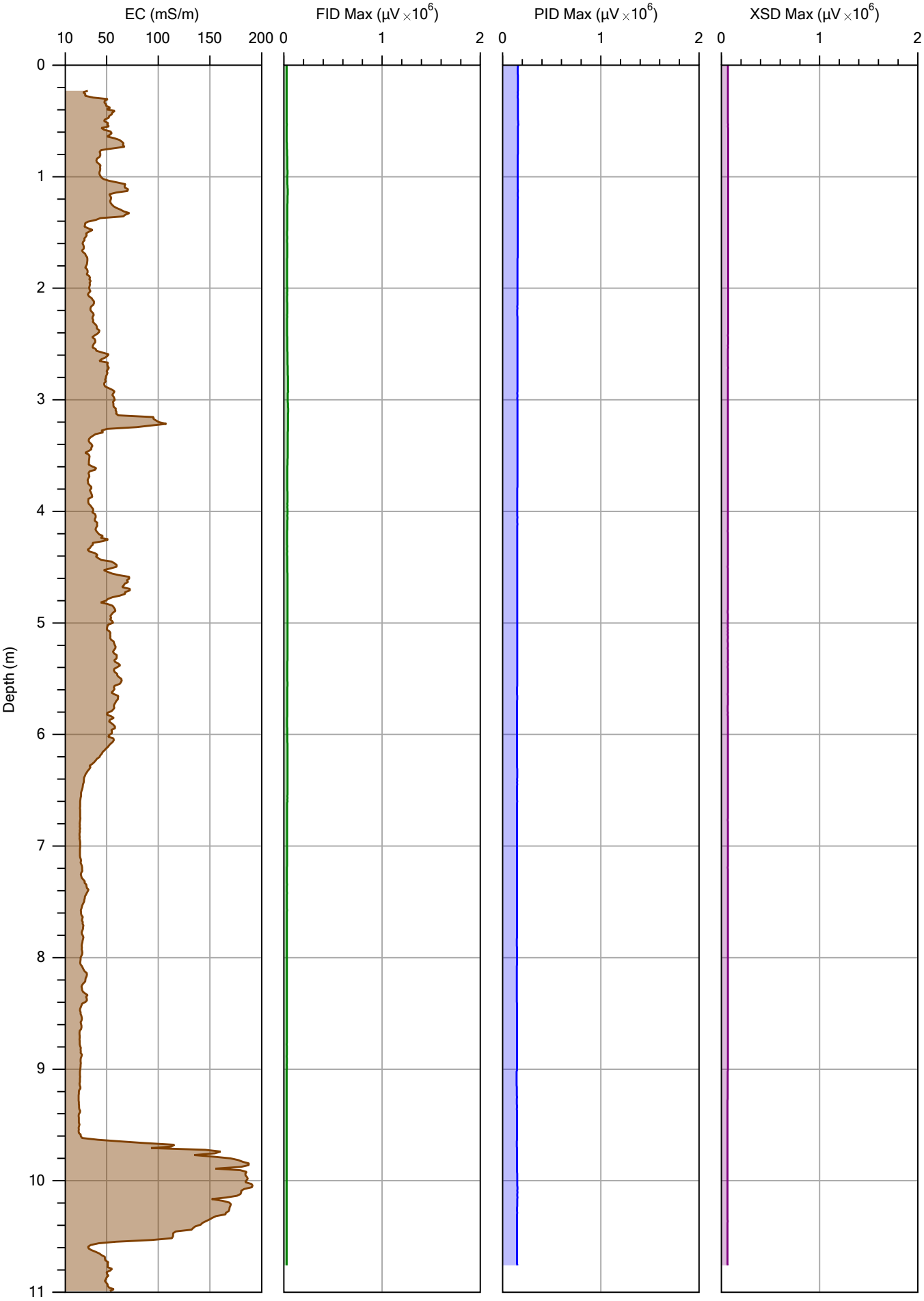


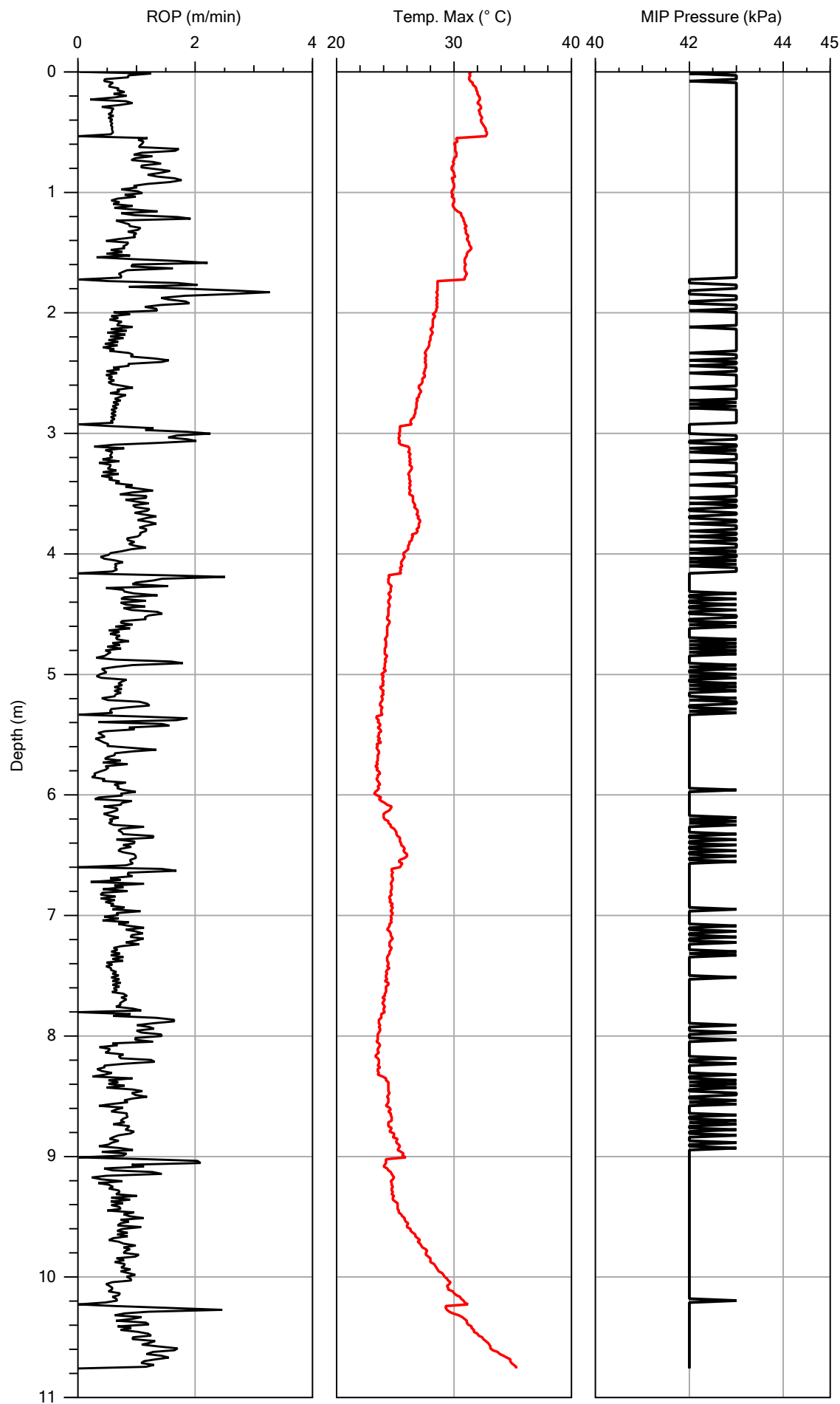


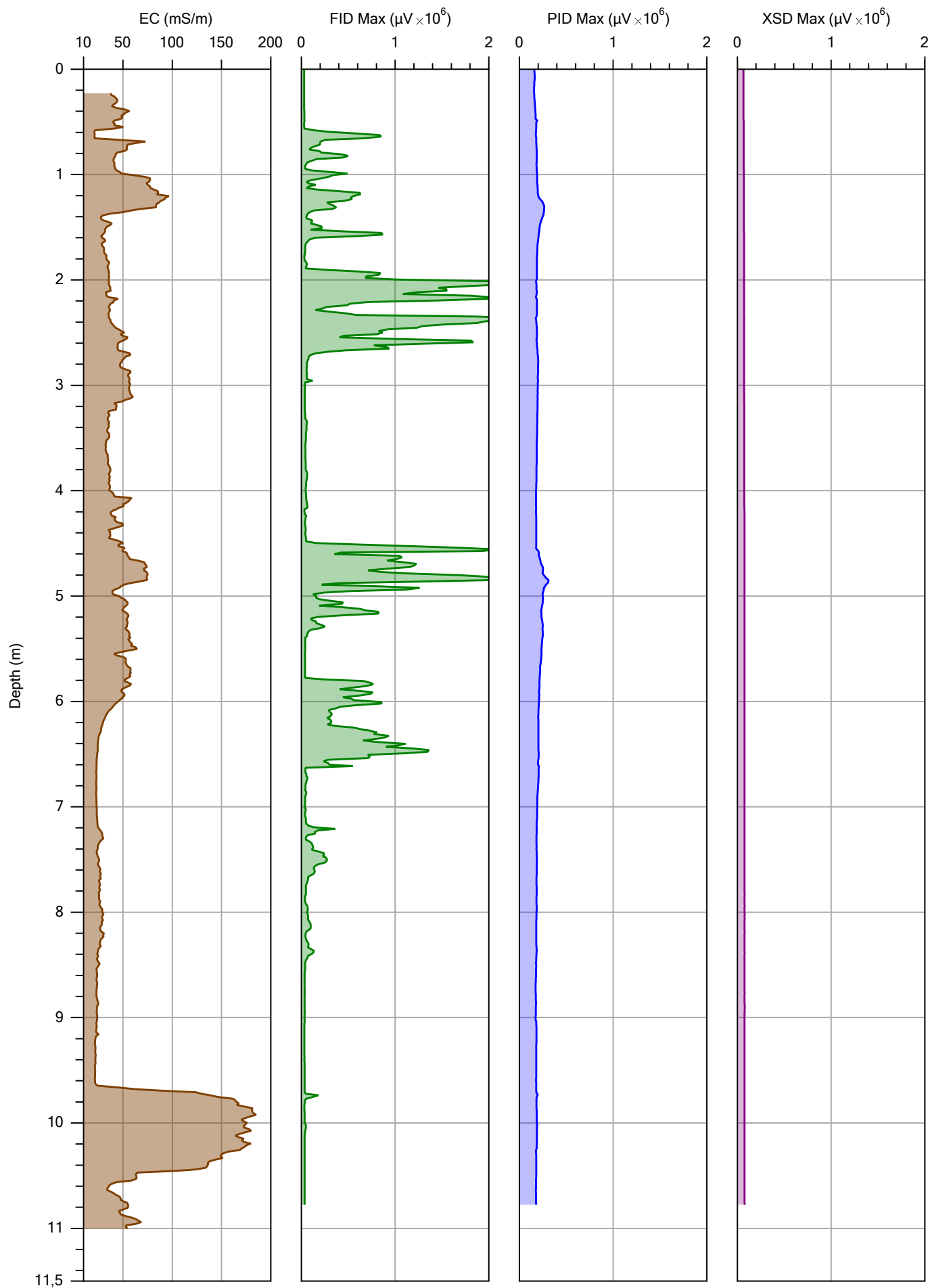


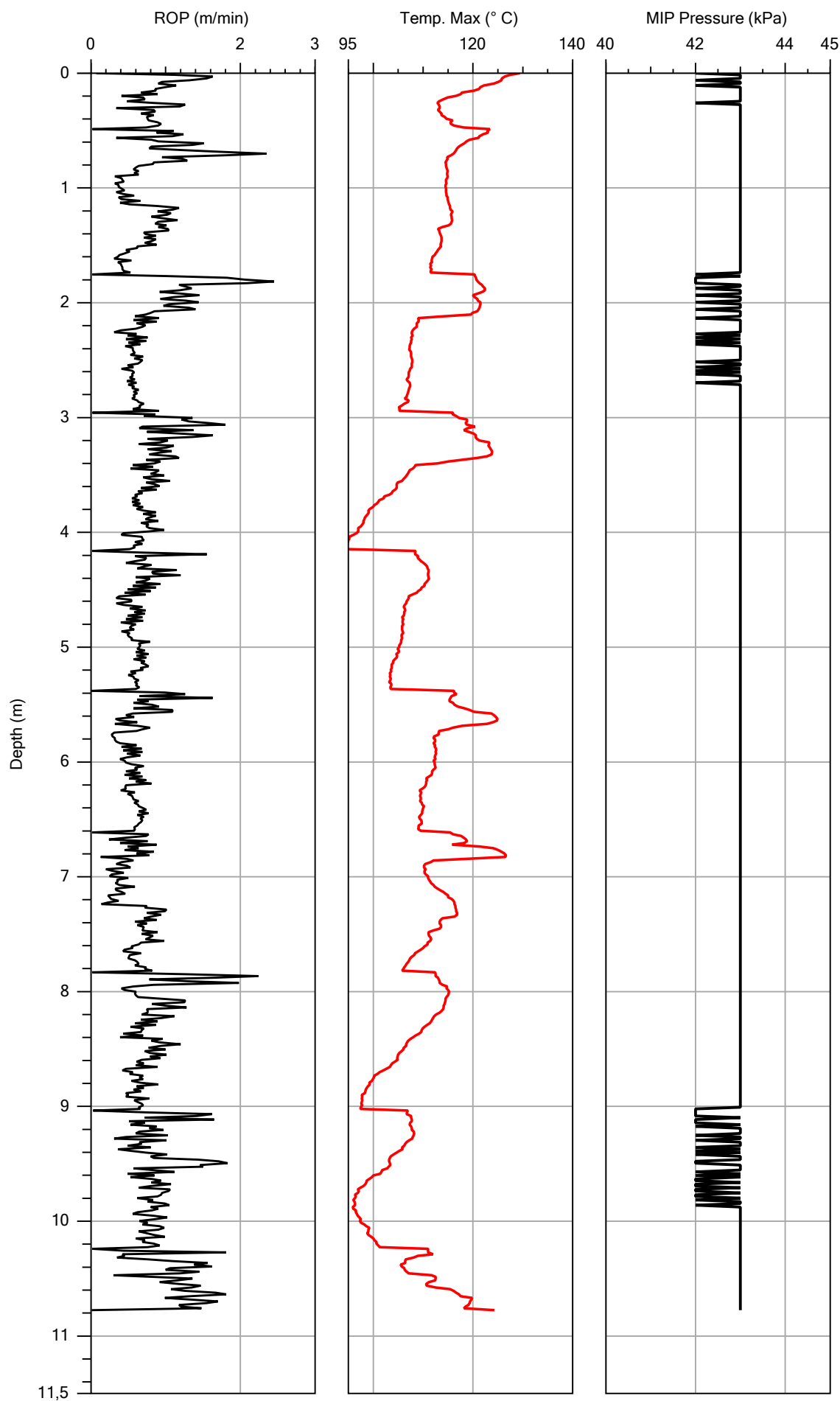


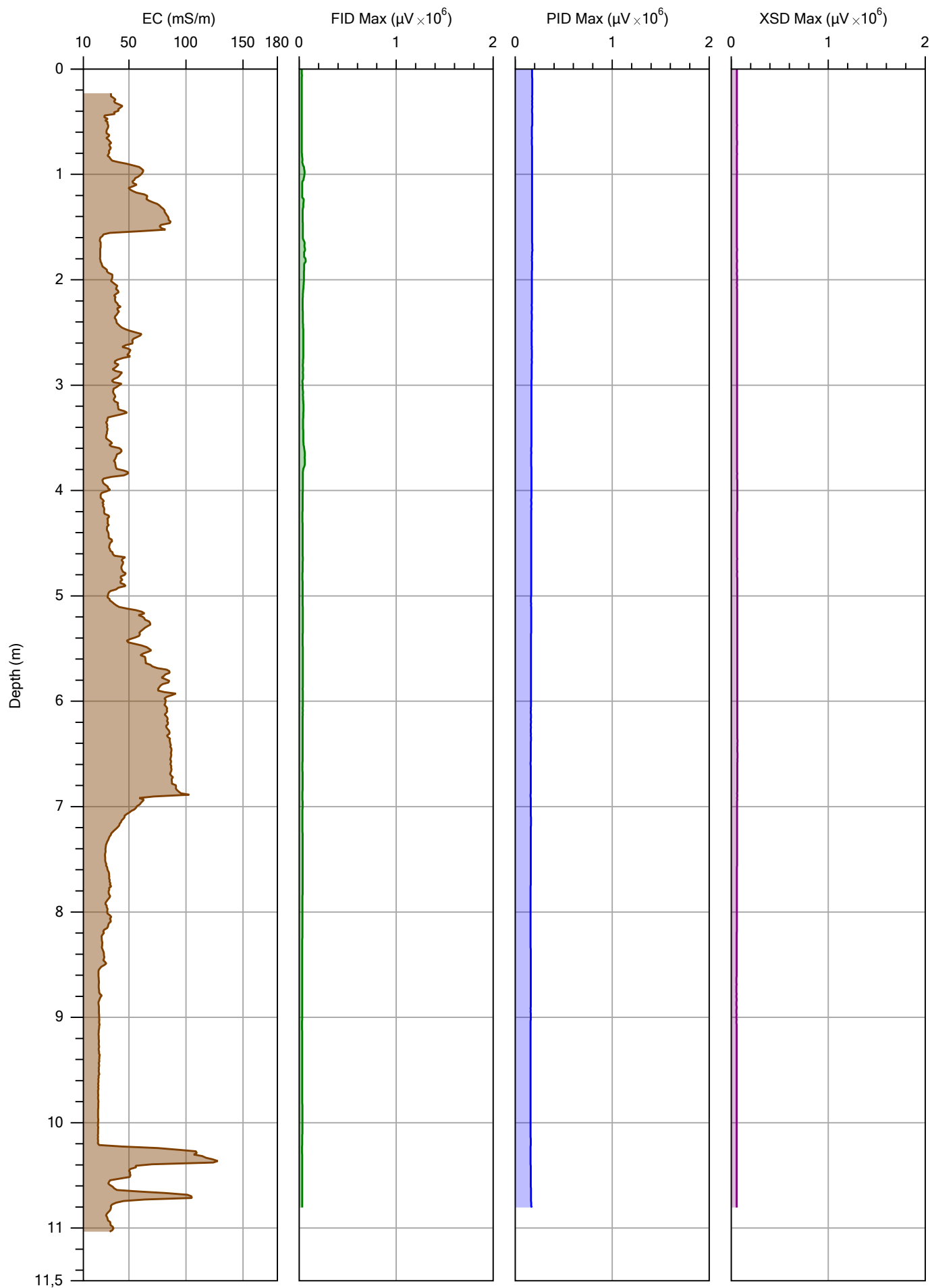


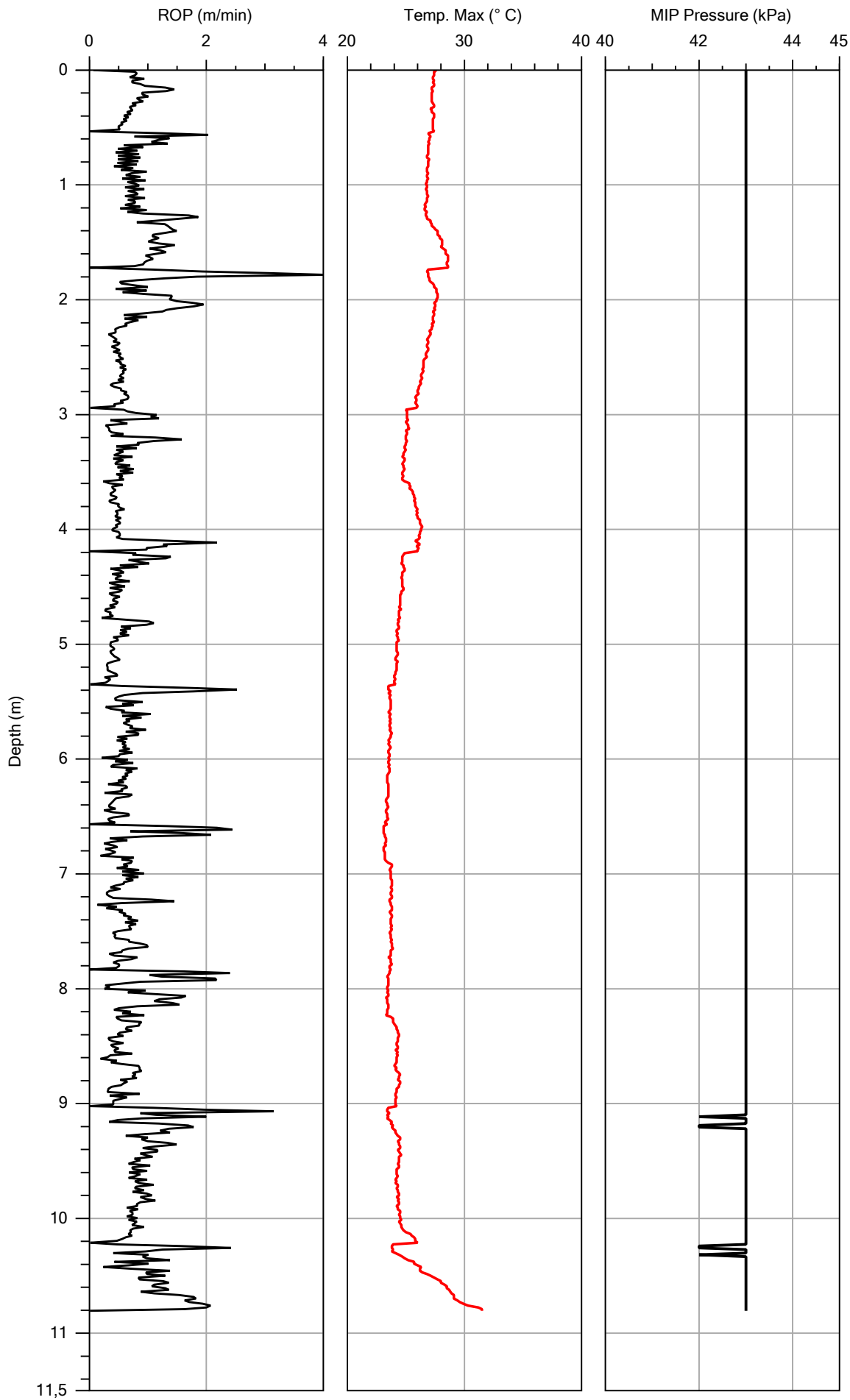


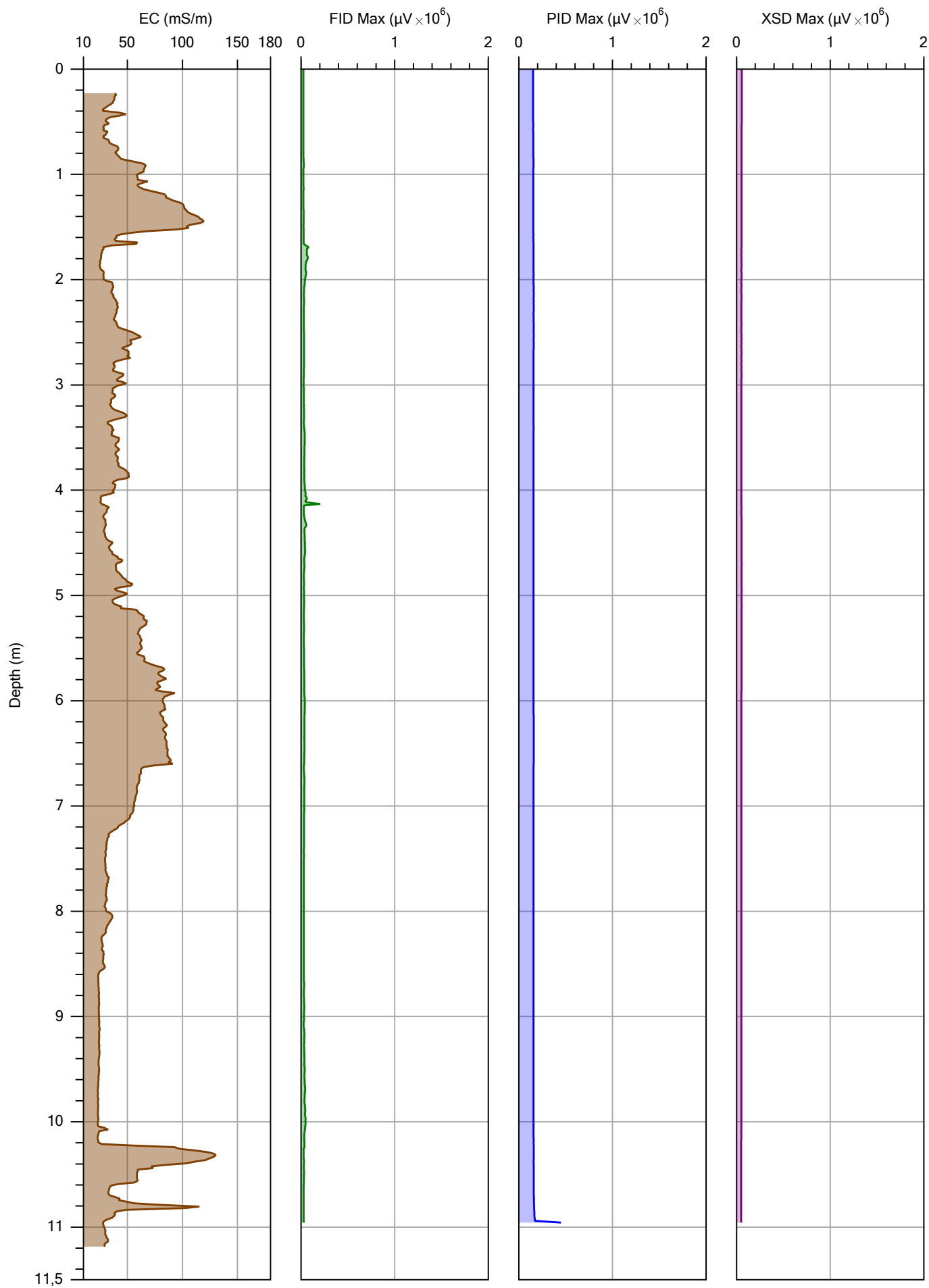


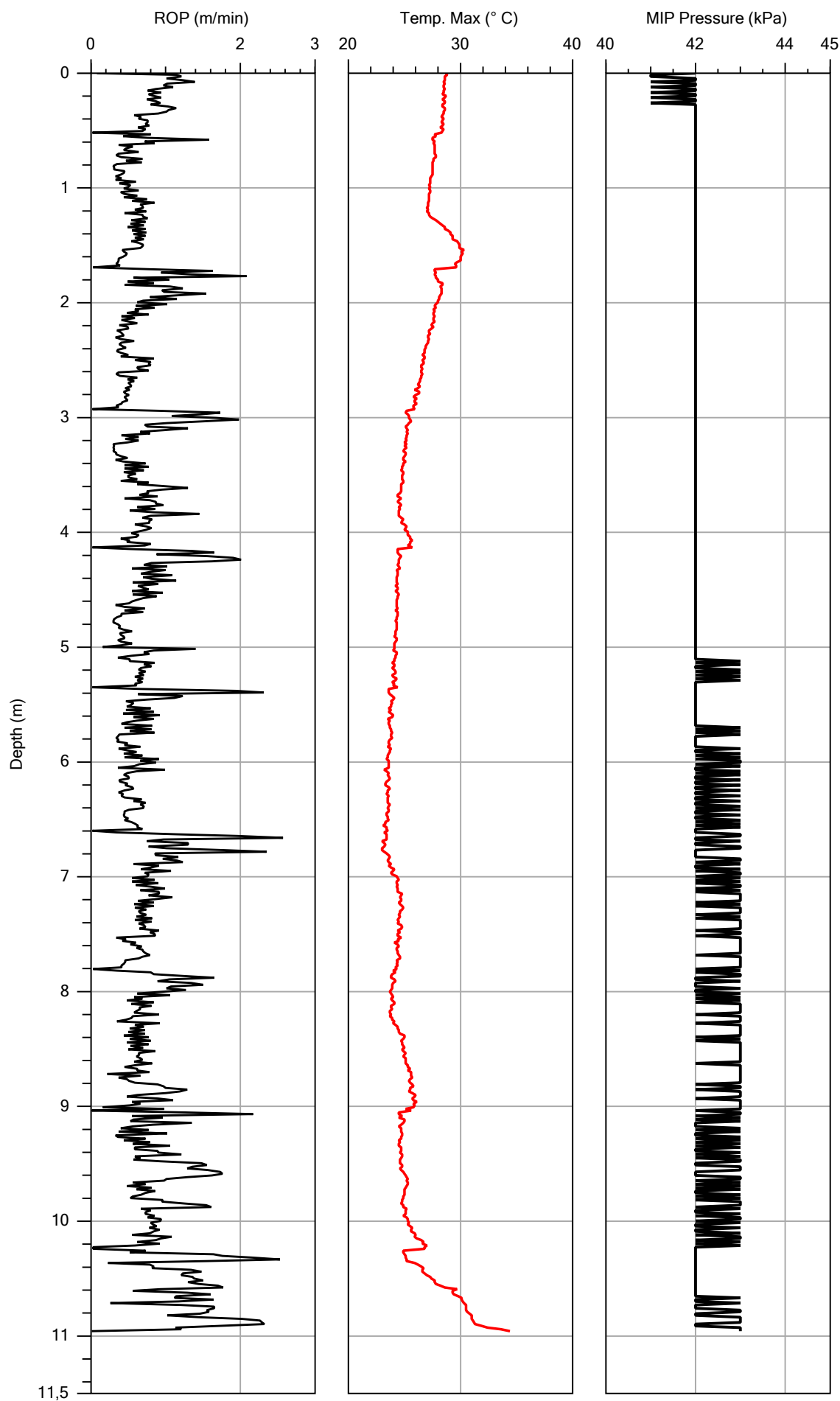


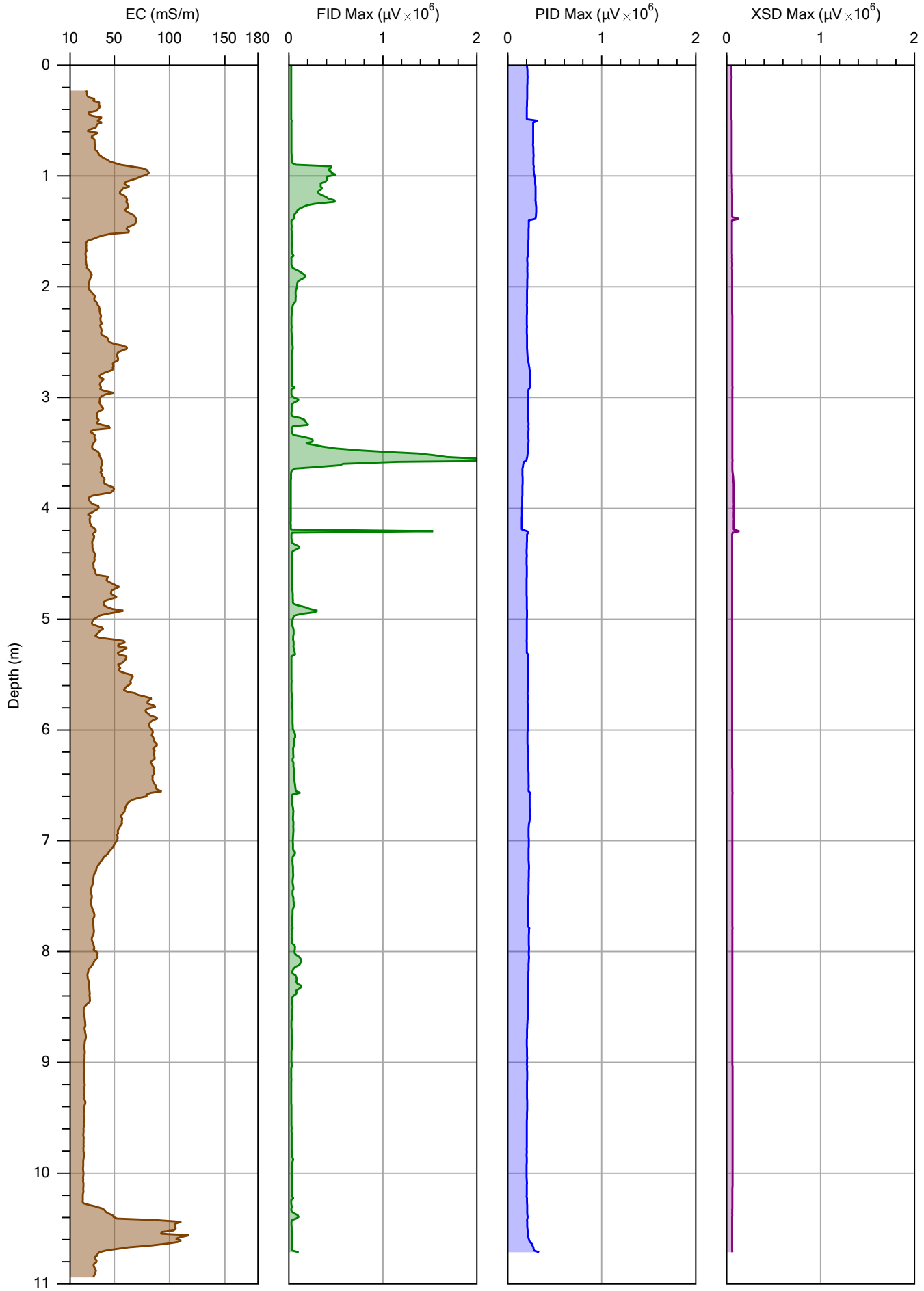


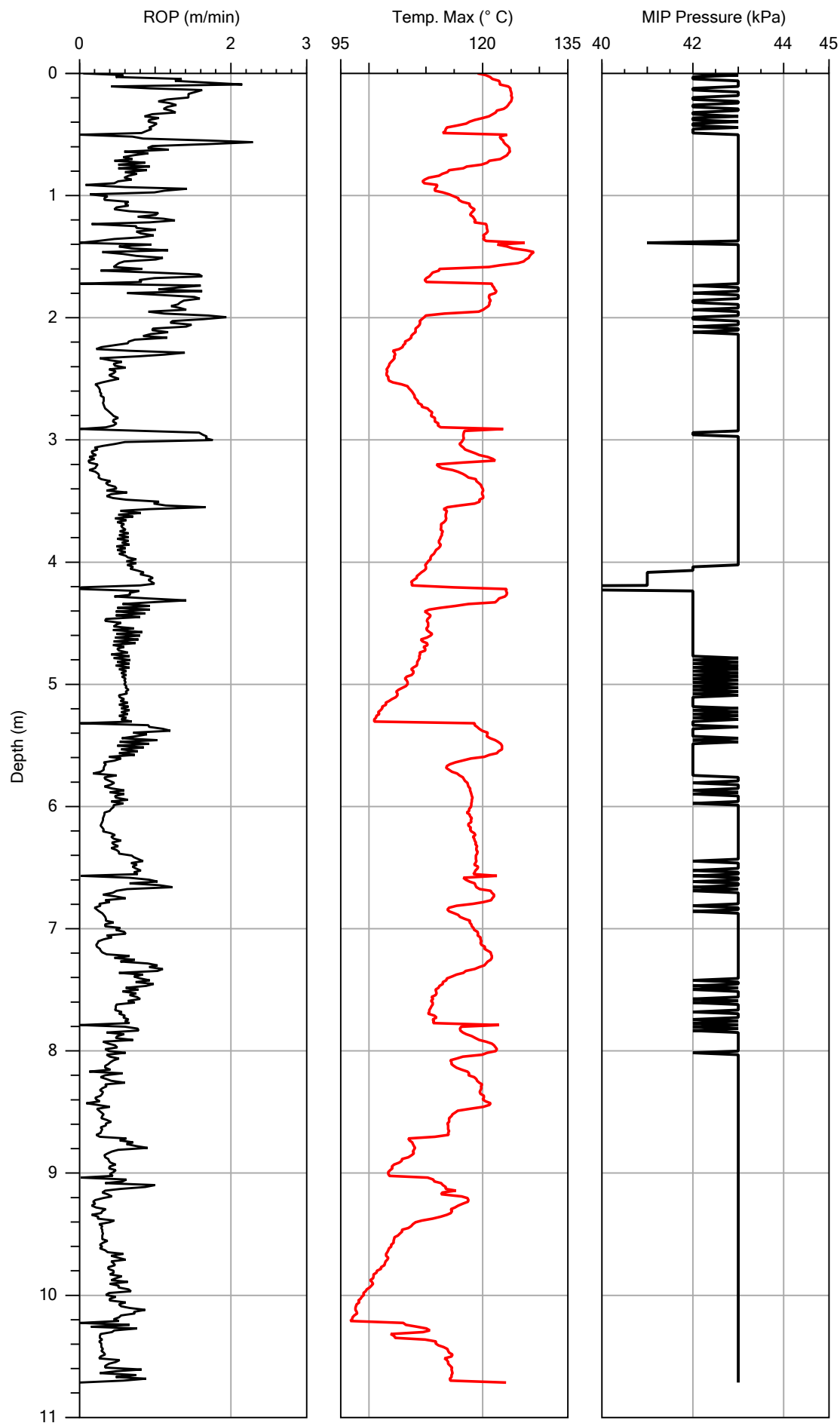




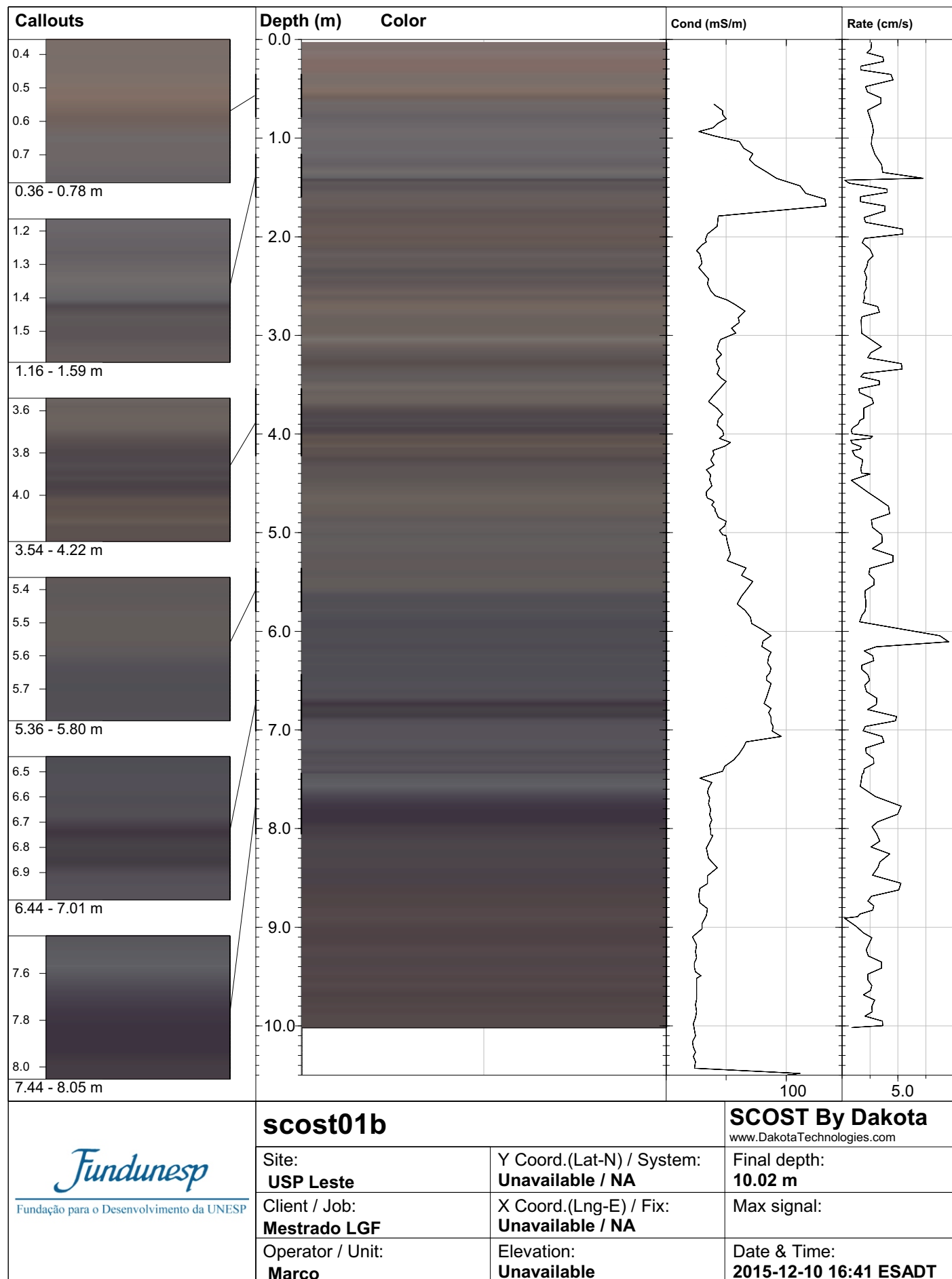


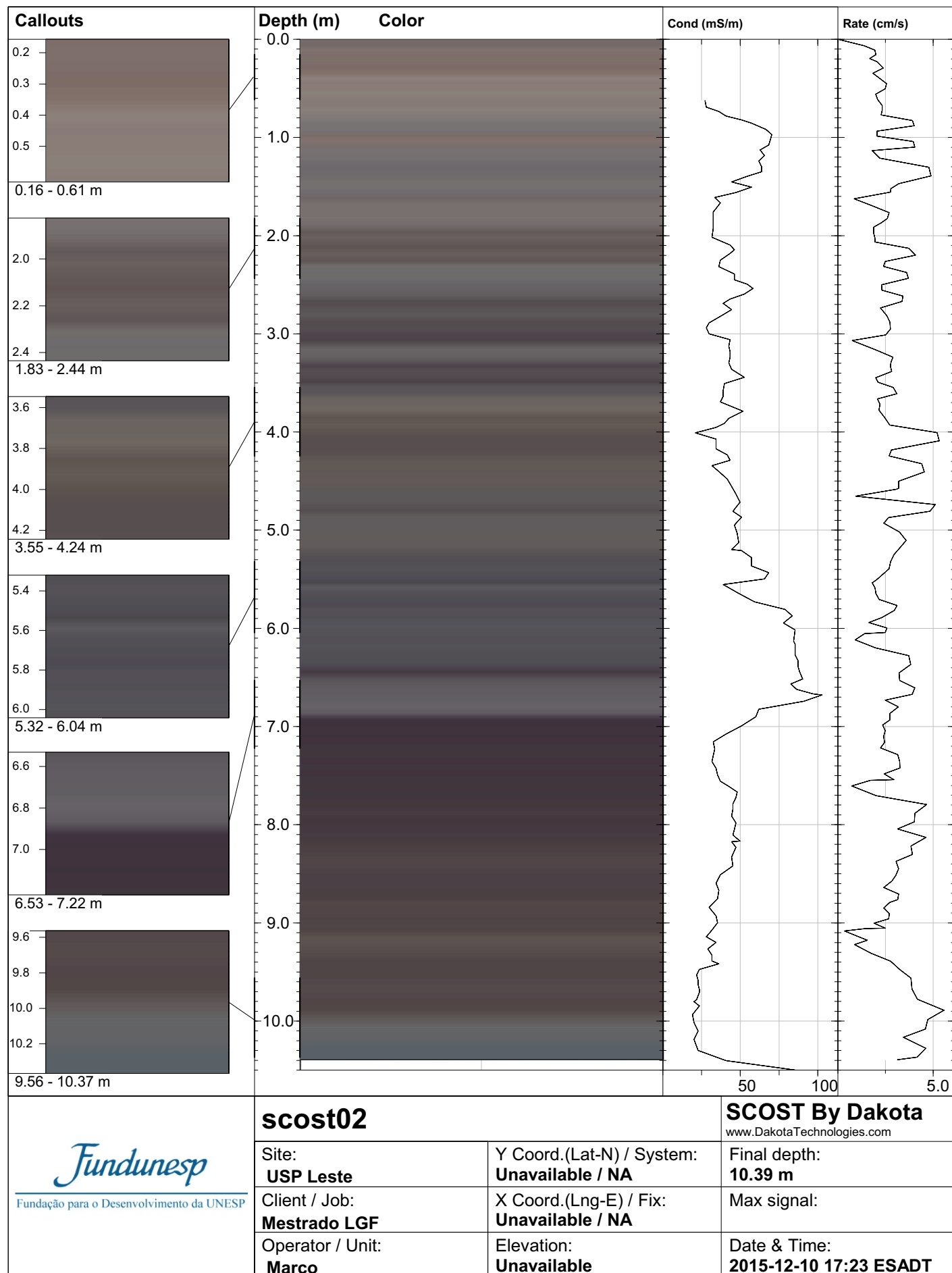






Apêndice B – Resultados do SCOST





Apêndice C – Boletins de sondagens *direct push*

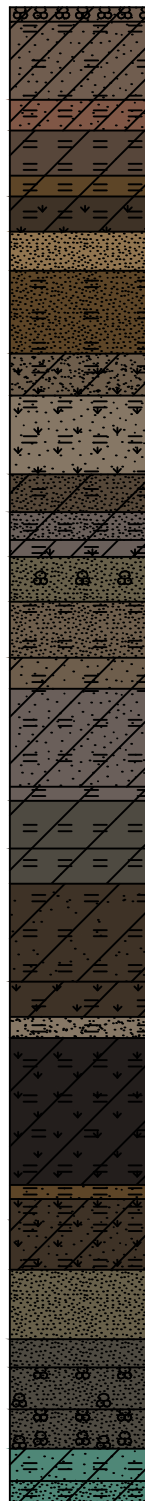
BOLETIM DE SONDAGEM

BOLETIM DE SONDAGEM						
PROJETO						
USP LESTE - MESTRADO LGF						
ATIVIDADE			LOCAL DE SONDAGEM			
Sondagens para amostragem de solo pelo método direct push			USP LESTE - PONTO P1			
COORDENADAS		DATUM / FUSO	ELEVAÇÃO (m)	DATA ELABORAÇÃO:		
346711 mE / 7402395 mN		WGS-84	-	07/08/2016		
EQUIPAMENTO		LOCAL DESCRIÇÃO	INÍCIO (DATA-HORA)	DESENHO Nº		
Geoprobe 6620DT - Direct Push		LEBAC-UNESP	14/12/15 - 8:30h	01		
PROF. PERFURAÇÃO (m)	DIÂM. PERFURAÇÃO (pol.)	FOTOGRAFIA	TÉRMINO (DATA-HORA)	APÊNDICE		
10,6	2,25"	SIM	14/12/15 - 12:00h	D		
EQUIPE DE CAMPO		RESPONSÁVEL	ESCALA	ID		
Leandro, Josué e Sebastião (IPT)		Leandro Gomes de Freitas	GRÁFICA	SDP-01		
PROFUNDIDADE (METROS)	PERFIL GEOTÉCNICO	DESCRIÇÃO TÁCTIL VISUAL			INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA	
0,00		Silte arenoso, pouco úmido, muito friável, cor marrom. Presença de grama e raízes e pedaços de plástico na base			DEPÓSITOS TECNOCÊNICOS (MATERIAL DE DRAGAGEM)	
		Areia fina a média siltsosa, pouco úmida, muito friável, cor marrom amarelado, com mica e presença de fragmentos de entulho centimétricos esparsos, pedaços de plástico e restos vegetais				
1,00		Silte argiloso, úmido, não plástico, não pegajoso, cor marrom a marrom acimentado e marrom escuro, micáceo, com presença de raízes				
		Silte areno argiloso, úmido, ligeiramente plástico, não pegajoso, cor marrom escuro acimentado, com pouca mica e presença de matéria orgânica. Odor característico de várzea				
		Silte areno argiloso, variando a areia siltsosa, úmido, ligeiramente plástico a não plástico, não pegajoso, cor marrom escuro acimentado, com porções pretas, com mica, com muitas raízes e matéria orgânica. Forte odor de várzea				
2,00		Areia fina siltsosa, úmida, friável, cor marrom amarelado a acimentado, cinza escuro, micácea, com presença de fragmentos orgânicos esparsos				
		Silte argilo arenoso, úmido, ligeiramente plástico, pegajoso, marrom a marrom escuro acimentado, com mica, com presença de fragmentos orgânicos esparsos				
		Silte areno argiloso, úmido, não plástico, ligeiramente pegajoso, cor marrom claro a marrom escuro e marrom escuro acimentado, micáceo, com presença de fragmentos orgânicos e raízes				
		Areia média a grossa, argilosa, úmida, friável, ligeiramente pegajosa, cor marrom escuro amarelada a acimentada, com fragmentos orgânicos				
		Areia média a grossa, com lentes mais argilosas, muito úmida, não plástica a ligeiramente plástica, não pegajosa a ligeiramente pegajosa, cor cinza escuro, ocre ou ocre amarelado, presença de cascalhos e seixos esparsos, com muita matéria orgânica				
3,00		Areia média a grossa, argilosa, muito úmida, ligeiramente plástica, cinza escuro, com intraclastos argilosos, vermelho e amarelados, com muita matéria orgânica			DEPÓSITOS TECNOCÊNICOS (MATERIAL DE DRAGAGEM)	
		Areia média a grossa, pouco argilosa, muito úmida, não plástica, não pegajosa, cor cinza escuro, ocre escuro, com presença de mica				
		Camada de restos vegetais preta				
		Areia média a grossa, pouco argilosa, muito úmida, não plástica, não pegajosa, cor cinza escuro, ocre escuro e ocre amarelado, com presença de mica, raízes e restos vegetais.				
4,00		Areia fina a média, com lentes de areia grossa e porções mais argilosas, muito úmida, friável, cor cinza escuro, ocre escuro e ocre amarelado, com presença de cascalhos e seixos milimétricos. Presença matéria orgânica e restos vegetais. Presença de lentes argilosas na base				
		Areia fina argilo siltsosa, saturada, friável, ocre a ocre escuro, com mica e restos vegetais esparsos				
		Silte argilo arenoso, saturado, não plástica, pegajosa, cor ocre amarelado a cinza, com mica				
		Silte argilosa, saturado, ligeiramente plástica, muito pegajosa, cor marrom acimentada				
		Silte argilo arenosa, saturado, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, cor marrom acimentado, ocre, com mica				
5,00			Areia fina, silte-argilosa, saturada, muito friável, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, cor ocre acimentado, com mica			SQa - FÁCIES ARGILOSA
	Silte argilo arenosa a argila silte arenosa (areia fina), pegajosa, ligeiramente plástica, cor marrom acimentado a marrom escuro acimentado, com mica					
	Silte argilosa arenosa, ligeiramente pegajosa, ligeiramente plástica, cor marrom acimentado a marrom escuro acimentado a cinza escuro, com mica. Porções com muito material orgânico.					
6,00	Defasagem na recuperação. Areia fina silte argilosa, saturada, não plástica, não pegajosa, cor ocre amarelada					
	Argila silte arenosa, muito úmida, ligeiramente plástica, pegajosa (mais mole no topo), cor cinza escuro a marrom acimentado, micáceo, forte odor de várzea					
	Argila siltsosa, orgânica, pouco úmida, não plástica, não pegajosa, cor marrom escura acimentada, com muita matéria orgânica e restos vegetais, forte odor de várzea. Presença de turfa no topo (1cm)					
7,00	Argila siltsosa orgânica, úmida, plástica, pegajosa, cor marrom escura acimentada, com poucos restos vegetais, odor de várzea					
	Argila siltsosa com teor crescente de areia, úmida, plástica, ligeiramente pegajosa, cor marrom clara acimentada, micácea, com restos vegetais, odor de várzea					
	Argila siltsosa com teor crescente de areia, úmida, plástica, ligeiramente pegajosa, cor marrom clara acimentada, micácea, com restos vegetais, odor de várzea					
8,00			Argila areno siltsosa, gradando para areia silto argilosa, úmida, não plástica a friável, geralmente pegajosa, cor marrom acimentada a marrom escura acimentada e ocre, micácea. Presença de restos vegetais			
		Areia fina silte argilosa, muito úmida, ligeiramente plástica a não plástica, ligeiramente a não pegajosa, cor marrom escuro acimentada, a cinza escuro. Presença de muita mica e camadas com matéria orgânica				
9,00		Areia média a grossa, muito úmida, friável, ocre, com mica e grânulos brancos. Porções ligeiramente argilosas próximo à base				
		Areia grossa, com cascalhos milimétricos de quartzo e feldspato branco, muito úmido, friável, cor ocre a cinza. Presença de camada mais argilosa entre 9,50 e 9,53 (argila marrom acimentada)				
10,0		Areia grossa, cascalhos e seixos centimétricos (até 3 cm), angulosos a subangulosos, muito úmido, friável, cor ocre a cinza, com cascalhos mais grossos na base				
		Silte arenoso, areia fina, pouco úmido, firme, não plástico, ligeiramente pegajoso, muito consistente, cor cinza azulado a esverdeado (ao ficar exposto começa a ficar amarelado), com micas				
		Silte arenoso a areia siltsosa, pouco úmido, firme, não plástico, não pegajoso, muito consistente, cor cinza azulado a esverdeado, com mica				
11,0					STR - BSP	

BOLETIM DE SONDAGEM

PROJETO			USP LESTE - MESTRADO LGF		
ATIVIDADE			LOCAL DE SONDAGEM		
Sondagens para amostragem de solo pelo método direct push			USP LESTE - PONTO P5		
COORDENADAS		DATUM / FUSO	ELEVAÇÃO (m)	DATA ELABORAÇÃO:	
346777 mE / 7402491 mN		WGS-84	-	07/08/2016	
EQUIPAMENTO		LOCAL DESCRIÇÃO	INÍCIO (DATA-HORA)	DESENHO Nº	
Geoprobe 6620DT - Direct Push		LEBAC-UNESP	14/12/15 - 13:30h	02	
PROF. PERFURAÇÃO (m)	DIÂM. PERFURAÇÃO (pol.)	FOTOGRAFIA	TÉRMINO (DATA-HORA)	APÊNDICE	
10,6	2,25"	SIM	14/12/15 - 16:30h	D	
EQUIPE DE CAMPO		RESPONSÁVEL	ESCALA	ID	
Leandro, Josué e Sebastião (IPT)		Leandro Gomes de Freitas	GRÁFICA	SDP-05	
PROFUNDIDADE (METROS)	PERFIL GEOTÉCNICO	DESCRIÇÃO TÁCTIL VISUAL			INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA
0,00		Areia argilosa, úmida, muito friável, marrom, com raízes			DEPÓSITOS TÉCNOGÊNICOS (MATERIAL DE DRAGAGEM)
		Areia fina a média siltosa, úmida, muito friável, marrom amarelada com micas, presença de raízes, camada de brita e entulho próximo à base			
		Areia média, pouco siltosa, úmida e muito frável, marrom claro amarelado com muita mica			
		Areia fina média, umida, friável, marrom amarelado com presença de seixos esparsos. Presença de mica e materiais orgânicos			
1,00		Areia fina a média, siltosa, variando a areia fina argilo-siltosa, marrom escura acimentada a amarelado, úmida, friável. Presença de raízes, material orgânico e pedaços de plástico na base			
		Areia fina sitosa, úmida, friável, marrom escuro, com fragmentos orgânicos, com camada de argila orgânica (10 cm) na base com muita matéria orgânica.			
2,00		Areia fina, úmida, friável, marrom clara acimentada, micácea			
		Areia média grossa, friável, marrom clara variando a areia fina siltosa, marrom clara, com pedaços de plástico			
		Areia fina siltosa, muito úmida a saturada, muito friável, marrom escuro acimentada, muito micácea, com fragmentos de material orgânico			
3,00		Areia média siltosa, marrom escura, saturada, friável, com presença de materiais antropogênicos (espumas, papelão e plástico). Odor de hidrocarboneto			
		Silte argiloso, saturado, plástico, pegajoso, marrom escuro acimentado variando a marrom, com matéria orgânica e pedaços de plástico			DEPÓSITOS TÉCNOGÊNICOS (MATERIAL DE DRAGAGEM)
		Areia média a grossa, saturada, friável, ocre a ocre acimentada, com cascalhos milimétricos a seixos centimétricos, com mica e fragmentos de material estranho (areia esverdeada)			
		Areia fina pouco argilosa a argilo arenosa, saturada, ligeiramente plástica, pouco pegajosa, marrom acimentada a marrom clara ou cinza levemente esverdeada, com muita mica			
4,00		Argila arenosa, saturada, plástica, pouco pegajosa, marrom acimentada, micácea, com pedaço de plástico (vinil) na base			
		Argila siltosa, úmida, plástica, pouco pegajosa, marrom escuro acimentada a marrom. Camada de argila orgânica (8 cm) com presença de restos vegetais. Mais 10 cm de argila silto arenosa, plástica, pegajosa, cinza amarelado ou marrom escura, micácea. Forte odor de material orgânico			
5,00		Argila orgânica, arenosa, úmida, não plástica a pouco plástica, pouco pegajosa, marrom escura a preta ou cinza escura, com micas, com intraclastos argilosos, vermelho e amarelados, com muitos restos vegetais, raízes e fragmentos de madeira			
		Argila siltosa, orgânica, saturada, plástica, pegajosa, marrom escura cinza escura, com restos vegetais. Odor de podre			
6,00		Argila arenosa, com cascalho, pouco consistente, amarela variegada, com muita mica e plaquetas de mica. Parece ser 'bucha' no meio da matriz de argila orgânica			
		Argila siltosa, orgânica, saturada, plástica, pegajosa, marrom escura a cinza escura, com presença de fragmentos silte argilosos, vermelho a rosa variegado em meio à matriz marrom acimentada escura			
		Silte argiloso, pouco úmido, não plástico, não pegajoso, marrom escuro a marrom acimentado, com mica, muita matéria orgânica e raízes			
7,00		Argila siltosa, orgânica, plástica, pegajosa, marrom escura a preta			SQA - FÁCIES ARGILOSA
		Crevasse splay. Camada de areia fina a média, pouco argilosa, friável, ocre acimentada, com grânulos milimétricos de quartzo e cascalhos esparsos			
		Argila siltosa, plástica, pegajosa, marrom escura acimentada a preta, tornando mais marrom na base, presença de muita matéria orgânica (filamentos marrons)			
8,00		Argila siltosa com pouca areia, não plástica, ligeiramente pegajosa, marrom escura a preta			
		Areia fina silto argilosa, ligeiramente plástica, não pegajosa, marrom muito escura, micácea			
9,00		Areia média a grossa, friável, cinza a cinza escura, com grânulos de quartzo, mica e feldspato			
		Areia média a grossa, pouco argilosa, friável, cinza escura a marrom escura			
		Areia média a grossa, com cascalhos centimétricos, cinza escura, variando cascalhos milimétricos e seixos subangulosos e arredondados (até 2 cm diam.), cinza a marrom escuro			
10,0		Areia fina a média argilosa, úmida, muito firme, cinza esverdeado			
		Argila siltosa, variando a areia silto argilosa, pouco úmido, extremamente firme, cinza esverdeado (oxida e fica amarelado com o tempo), com muita mica			

BOLETIM DE SONDAGEM

PROJETO USP LESTE - MESTRADO LGF					
ATIVIDADE Sondagens para amostragem de solo pelo método direct push			LOCAL DE SONDAGEM USP LESTE - PONTO P7		
COORDENADAS 346735 mE / 7402370 mN		DATUM / FUSO WGS-84	ELEVAÇÃO (m) -	DATA ELABORAÇÃO: 08/08/2016	
EQUIPAMENTO Geoprobe 6620DT - Direct Push		LOCAL DESCRIÇÃO LEBAC-UNESP	INÍCIO (DATA-HORA) 11/12/15 - 13:30h	DESENHO Nº 03	
PROF. PERFURAÇÃO (m) 10,6	DIÂM. PERFURAÇÃO (pol.) 2,25"	FOTOGRAFIA SIM	TÉRMINO (DATA-HORA) 11/12/15 - 14:30h	APÊNDICE D	
EQUIPE DE CAMPO Leandro, Josué e Sebastião (IPT)		RESPONSÁVEL Leandro Gomes de Freitas	ESCALA GRÁFICA	ID SDP-07	
PROFUNDIDADE (METROS)	PERFIL GEOTÉCNICO	DESCRIÇÃO TÁCTIL VISUAL			INTERPRETAÇÃO GEOLOGICA
0,00		Argila silte arenosa, seca, não plástica, marrom. Presença de raízes e gramas, com camadas de britas (10cm) e solo vermelho na base			DEPÓSITOS TECNOGÊNICOS (MATERIAIS DE DRAGAGEM)
1,00		Argila silte arenosa, pouco úmida, marrom avermelhada			
		Silte argiloso, pouco úmido, pouco consistente, marrom a marrom escuro, com muita mica e odor de várzea			
		Silte argiloso, pouco úmido, pouco consistente, marrom ou marrom amarelado a marrom escuro, com muita mica e odor de várzea			
		Argila siltosa, úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, marrom variando a preta, com muita mica e com muitos restos vegetais e fragmentos de madeiras. Forte odor de decomposição. Presença de material orgânico na base (2 cm)			
2,00		Areia média a grossa, pouco úmida, muito friável, marrom amarelada a ocre esbranquiçado, com grânulos de quartzo e mica			
		Areia fina a muito fina, siltosa, pouco úmida, muito friável, marrom a marrom amarelada, com muita mica			
		Areia argilo siltosa, muito úmida, ligeiramente plástica, pegajosa, marrom escura acinzentada variando a marrom, com presença de materiais orgânicos e restos vegetais, com pouca mica. Forte odor de decomposição no topo			
3,00		Silte arenoso com camadas mais argilosas, saturada, não plástica, ligeiramente pegajoso, marrom claro a marrom acinzentado, com muita mica e muitos restos vegetais			
		Areia silte argilosa (com porções mais argilosas), saturada, não plástica, ligeiramente pegajosa, marrom escura a marrom escura acinzentada, presença de mica e de materiais orgânicos			
		Areia silte argilosa a argila areno siltosa, muito úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, marrom acinzentada, presença de muita mica, de materiais orgânicos e restos vegetais			
4,00		Argila silto arenosa, muito úmida, ligeiramente plástica, pegajosa, marrom acinzentada, com muita mica, pouco restos vegetais. Presença de material orgânico na base. Pedaco de plástico			
		Areia média a grossa com porções argilosas, não plástica, não pegajosa, ocre acinzentada a esbranquiçado com camada escuras, com pequenos pedregulhos esparsos			
		Areia fina siltosa, não plastica, pouco pegajosa, marrom acinzentada, com mica			
5,00		Argila areno siltosa, não plástica, ligeiramente pegajosa, marrom acinzentada, com mica			
	Argila siltosa, com porções mais ou menos arenosas (areia fina), não plástica, pegajosa, marrom acinzentada. Presença de mica. Restos vegetais e de madeira no topo			SQA - FÁCIES ARGILOSA	
	Argila siltosa, plástica, ligeiramente pegajosa, marrom acinzentado, com mica				
6,00	Argila siltosa, plástica, pegajosa, cinza amarronzada a cinza, variando a cinza escura e com pouca mica				
	Argila siltosa, pouco úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, marrom acinzentada a cinza escura, com mica				
	Argila siltosa pouco arenosa, úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, marrom acinzentada a marrom escura acinzentada e com mica. Forte odor de decomposição				
7,00	Argila siltosa, orgânica, pouco úmida, não plástica, não pegajosa, marrom escura a preta. Com restos vegetais				
	Areia fina a média siltosa, muito úmida, marrom claro acinzentado com muita mica				
	Argila siltosa, orgânica, úmida, ligeiramente plástica, ligeiramente pegajosa, cinza escura a preta. Com restos vegetais. OBS. Ao redor das amostras havia uma camada de areia cinza, provavelmente arrastada da camada de cima				
8,00	Silte arenoso, saturado, muito mole, marrom amarelado a acinzentado				
	Argila silto arenosa, orgânica, úmida, ligeiramente plástica, pouco consistente, ligeiramente pegajosa, marrom escura acinzentada a preta. Com mica. Com muitos restos vegetais na base				SQA - FÁCIES ARENOSA
9,00	Areia média a grossa, friável, ocre amarronzado a cinza, com grânulos de feldspato branco, saturada. Camada com maior teor de argila marrom escura entre 9,30 a 9,35 m. OBS: amostra coletada em outro furo ao lado. Ocorreu um contraste grande da litologia neste trecho entre 9,0 e 9,5 m.				
	Areia média a grossa com cascalhos, cinza escuro.				
10,0	Areia grossa com cascalhos e seixos milimétricos, cinza a cinza escuro, com feldspato branco				
	Areia grossa, com cascalhos e seixos mili a centimétricos, sub angulosos, cinza a cinza escura. Camada com maior teor de argila, marrom escura, entre 10,10 a 10,13 m. Seixos de 3 cm na base				
	Silte areno argiloso, com lentes mais arenosas, úmido, não pegajoso e não plástico, cinza esverdeado			STR - BSP	
11,0	Areia média a grossa siltosa, úmida, não plástica e não pegajosa, cinza esverdeada. Com mica. Obs: Material oxidada e fica amarelado com o tempo				