

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



**Modelo Conceitual Hidrogeológico na Avaliação de Contaminação por  
Hidrocarbonetos de Petróleo em Área no Sul da Bahia**

**Trabalho Final do Curso de Geologia**

**Mariana La Pasta**

**UFRJ  
Rio de Janeiro  
2016**



UFRJ

**Mariana La Pasta**

**Modelo Conceitual Hidrogeológico na Avaliação de Contaminação por  
Hidrocarbonetos de Petróleo em Área no Sul da Bahia**

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

Orientador(es):

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr. (UFRJ)  
M.Sc. Glauco Zely da Silva Eger (UFRJ).

Rio de Janeiro  
2016

La Pasta, Mariana.

Modelo Conceitual Hidrogeológico na Avaliação de Contaminação por Hidrocarbonetos de Petróleo em Área no Sul da Bahia/ Mariana La Pasta - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2016.

47 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2016.

Orientador(es): Gerson Cardoso da Silva Jr., Glauco Zely da Silva Eger

1. Geologia 2. Hidrogeologia. 3. Áreas Contaminadas 4. Aspectos Hidrodinâmicos. 5. Modelo Conceitual. I. Silva Jr., Gerson Cardoso da; Eger, Glauco Zely da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Título.

Mariana La Pasta

Modelo Conceitual Hidrogeológico na Avaliação de Contaminação por Hidrocarbonetos de  
Petróleo em Área no Sul da Bahia

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

Orientador(es):

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr. (UFRJ)  
M. Sc. Glauco Zely da Silva Eger (UFRJ).

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Por:

---

Orientador: Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva JR. (UFRJ)

---

Prof. Dr. Claudio Limeira Mello (Dep. Geologia IGEO/UFRJ)

---

M. Sc. Talita Azevedo da Silva (Geóloga)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2016

À minha mãe Sandra pelo apoio, confiança, incentivo e amor incondicionais em todos os momentos dessa caminhada e ao meu namorado Vinicius, por todo amor, paciência e compreensão.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus por me guiar no caminho e ser razão de mais esta conquista, pois sem ele nada disso seria possível.

A minha mãe Sandra, por toda luta, esforço, perseverança, apoio e amor ao longo desta trajetória, por toda confiança em mim e na minha capacidade de chegar até aqui e principalmente por todas as lições e valores que nenhuma Universidade seria capaz de me fornecer com tanta dedicação.

Ao meu namorado Vinicius, pelo incentivo, paciência, amor e companheirismo ao longo dos 5 anos dessa jornada, sempre com palavras de incentivo e conforto nas horas mais necessárias.

A minha família e amigos, sempre presentes e disponíveis para me incentivar e auxiliar neste caminho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr., por toda paciência, orientação, ensinamentos, e por todas as oportunidades de crescimento e desenvolvimento acadêmico e profissional.

Ao meu orientador, M. Sc. Glauco Zely da Silva Eger, por todos os ensinamentos, companhia, conversas e pelo incentivo para que eu chegassem até aqui.

Aos colegas do Laboratório de Hidrogeologia (HIDROGEO), Mônica Fernandes, Hélisson Nascimento, Talita Azevedo, Renato Pita, Matheus Cabral e Verônica Dutra, por todos os ensinamentos, oportunidades de aprendizado, pela ajuda, as conversas e os momentos de descontração.

Aos meus amigos e colegas de profissão da turma de Geologia da UFRJ do ano de 2011, Kathelyn Nunes, Caroline Ribeiro, Cheyenne Campos, Tatiane Prado, Verônica Batista, Ana Cristina de Jesus, Thelson Julius, Felipe Martins, Felipe Pereira e Rafael Fragoso, pelo apoio e por tantos momentos maravilhosos e inesquecíveis que tornam esta conquista ainda mais especial.

Ao Projeto FUJB, pela oportunidade de estágio e pelo financiamento das campanhas de campo.

## Sumário

Agradecimentos .....	v
Sumário.....	vi
Lista de Figuras e Tabelas .....	viii
Resumo .....	ix
Abstract.....	x
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Áreas Contaminadas e Hidrocarbonetos de Petróleo .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Técnicas de Remediação de Áreas Contaminadas .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Modelos Conceituais Hidrogeológicos de Áreas Contaminadas .....</b>	<b>9</b>
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Localização .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2. Geologia Regional .....</b>	<b>12</b>
<b>3.3. Geologia Local .....</b>	<b>14</b>
<b>3.4. Caracterização hidrogeológica .....</b>	<b>16</b>
<b>3.5. Clima.....</b>	<b>17</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. Análise dos dados preexistentes disponíveis.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2. Campanhas de Campo .....</b>	<b>19</b>
<b>4.3. Interpretação estratigráfica a partir de dados preexistentes .....</b>	<b>19</b>
<b>4.4. Obtenção de dados de variação do nível d'água a partir dos transdutores de pressão (<i>divers</i>).....</b>	<b>19</b>
<b>4.5. Elaboração de Rede de Fluxo .....</b>	<b>19</b>
<b>4.6. Elaboração de Modelo Conceitual .....</b>	<b>20</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>20</b>
<b>5.1. Seções Geológicas da área de estudo.....</b>	<b>20</b>
<b>5.2. Interpretação e comparação dos dados de variação do nível d'água obtidos a partir dos transdutores de pressão (<i>divers</i>) .....</b>	<b>27</b>

<b>5.3. Rede de Fluxo.....</b>	<b>35</b>
<b>5.4. Modelo Conceitual Hidrogeológico.....</b>	<b>40</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>

## Lista de Figuras e Tabelas

### **Figuras:**

Figura 1 - Fases de Hidrocarbonetos no subsolo (Adaptado de Fetter, 1993).....	5
Figura 2 - Comportamento de diferentes tipos de NAPL no meio aquífero (Modificado de Galante, 2008). .....	6
Figura 3 - Distribuição vertical de hidrocarbonetos (Modificado de Mindrisz, 2006). .....	7
Figura 4– Mapa de localização aproximada da área de estudo. .....	11
Figura 5 - Mapa geológico em a área de estudo está inserida (Adaptado de CPRM, 2000). ...	12
Figura 6 - Perfil litológico medido do Grupo Barreiras, próximo à área de estudo (Adaptado de MME, 1999). .....	13
Figura 7 - Perfil litológico de poço tubular localizado na área de estudo com profundidade em metros (Adaptado de FUJB, 2013). .....	15
Figura 8 – Mapa esquemático da área de estudo com a localização dos poços de monitoramento e das sondagens (adaptado de FUJB, 2013). .....	16
Figura 9 - Temperatura máxima, mínima e precipitação em região próxima à área de estudo (dados climatológicos representam uma média do período entre 1961 e 1990). .....	17
Figura 10 - Mapa de localização das seções geológicas expressas nas figuras seguintes. ....	21
Figura 11 - Seção Geológica AB da área de estudo .....	22
Figura 12- Seção Geológica CD da área de estudo .....	23
Figura 13 - Seção Geológica EF da área de estudo .....	24
Figura 14 - Seção Geológica GH da área de estudo .....	25
Figura 15 - Seção Geológica IJ da área de estudo .....	26
Figura 16 - Gráfico comparando os dados obtidos a partir do monitoramento de carga hidráulica dos poços PM-01 e PM-02 e a precipitação pluviométrica horária no mesmo período (4/09/2014 a 10/12/2014). .....	27
Figura 17 - Gráfico relacionando a carga hidráulica e a precipitação pluviométrica no poço PM-01 ao longo de um período de monitoramento de três meses (setembro a dezembro) do ano de 2014. Neste gráfico há um maior detalhamento das variações da carga hidráulica em comparação à Figura 19, observando-se picos associados às chuvas. .....	28
Figura 18 - Gráfico relacionando Carga Hidráulica x Precipitação no PM-02 ao longo de um período de monitoramento de três meses (setembro a dezembro) do ano de 2014.....	29
Figura 19 - Gráfico de monitoramento da carga hidráulica do PM-01 no período de 26/10/2014 a 17/11/2014.....	30
Figura 20 - Gráfico de monitoramento da carga hidráulica do PM-01 no dia 29/10/2014. ....	31
Figura 21 - Gráfico de monitoramento da carga hidráulica do PM-02 no período de 26/10/2014 a 17/11/2014.....	32
Figura 22 - Gráficos de monitoramento da variação da Carga Hidráulica das camadas aquíferas rasa e profunda.....	37
Figura 23 - Esquemas das camadas aquíferas na área de estudo (A – sem ação de falhas B – com ação de falhas) .....	38
Figura 24 - Redes de fluxo das camadas aquíferas rasa e profunda limitadas na área de estudo .....	39
Figura 25 - Mapa representando as estruturas inferidas na área de estudo com base nos dados analisados. .....	40
Figura 26 - Fase Livre de Hidrocarbonetos de Petróleo presente no PM-01 (Dezembro/2014). .....	41
Figura 27 - Esquema de dispersão da Fase Livre. ....	42
Figura 28 - Modelo conceitual simplificado da área de estudo. ....	43

**Tabelas:**

Tabela 1 - Métodos de Remediação (Adaptado de Fernandes & Ferreira, 2010). ....	10
Tabela 2- Valores de carga hidráulica obtidos a partir do monitoramento do nível d'água pelas empresas de consultoria ambiental de 2011 a 2014 – Em rosa, encontram-se os poços localizados na camada aquífera mais rasa, enquanto em azul, encontram-se os poços localizados na camada mais profunda. ....	36

**Anexos:**

**Anexo I** – Perfis de sondagem.

## Resumo

A área de estudo consiste em um posto de revenda de combustíveis localizado em área urbana de ocupação mista (moradias, comércio e serviços) no litoral Sul da Bahia. Em 2002, quase 20 anos após o início de suas atividades, foi registrada a presença de hidrocarbonetos de petróleo no subsolo local. Desde então, a área sofreu diversos processos de intervenção para remediação do problema e vem sendo monitorada. O posto encontra-se inserido no Grupo Barreiras, constituído por sedimentos de origem fluvial e flúvio-costeira (areias quartzosas finas a grossas e areias argilosas intercaladas com camadas de argila). Estes materiais podem estar afetados por falhas, fraturas e heterogeneidades que podem condicionar o fluxo e hidrogeologia locais. Este trabalho tem como objetivo elaborar um modelo conceitual hidrogeológico da área de estudo a fim de melhorar o entendimento dos processos que nela ocorrem. Para sua elaboração, realizaram-se duas campanhas de campo para verificação de parâmetros físico-químicos e instalação e retirada de transdutores de pressão (*diver*), com a finalidade de monitorar as variações do nível d'água. Além disso, utilizaram-se os dados obtidos em investigações ambientais realizadas por diversas empresas para elaborar um modelo conceitual hidrogeológico da área. Os resultados indicam a presença de um sistema aquífero local multicamadas, livre a semiconfinado, com ao menos duas camadas aquíferas, com comportamentos distintos: uma mais rasa com características de aquífero livre; e outra mais profunda, de caráter semiconfinado a confinado. Fica evidente a presença de níveis suspensos mais rasos em algumas porções do aquífero. A área de estudo possui ao menos dois aquíferos que se comportam de maneiras distintas, ambos afetados por falhas que interferem no fluxo de água subterrânea e de contaminantes na região. Apesar dos avanços conceituais, os estudos realizados ainda não fornecem um parecer definitivo sobre a geologia da área de estudo, portanto, recomenda-se a aplicação de novos métodos de investigação como, por exemplo, ferramentas geofísicas (eletrorresistividade ou sísmica rasa).

## Abstract

The study area consists of a fuel retail station located in urban areas of mixed use (housing, trade and services) in the south coast of the state of Bahia, Brazil. In 2002, nearly 20 years after the start of its activities, the presence of petroleum hydrocarbons in the subsoil was noticed. Since then, the area has undergone several intervention processes for the contamination problem remediation and a groundwater monitoring program is active. The facility is inserted in the Barreiras Group area, consisting of sediments of fluvial and fluvial-coastal origin (fine quartz sands interbedded with thick and loamy sands with irregular stratification clays). These materials are likely to be affected by faults, fractures and heterogeneities that might influence the flow and local hydrology. This work aims to develop a hydrogeological conceptual model of the study area to improve understanding the processes occurring on it. For its development, two field campaigns were conducted to check physicochemical parameters and installation and removal of pressure transducers (Diver) were carried out, with the aim of monitoring the water level variations. In addition, data obtained in environmental investigations by several environmental consulting companies was used to develop a hydrogeological conceptual model of the area. The results indicate the presence of a multilayer aquifer system, free to semi-confined, with at least two aquifers with distinct behaviors: a shallower water table aquifer; and a deeper aquifer, possibly with a semi-confined to confined nature. Possibly, additional shallow perched groundwater levels occur in some portions of the aquifer. The study area has at least two aquifers that behave in different ways, both affected by faults and fractures that affect the groundwater and contaminants flow in region. Despite the conceptual advances, the studies do not yet provide a definitive opinion on the geology of the study area, so it is recommended the application of new identification methods such, such as geophysical tools (electrical resistivity or shallow seismic surveys).

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial e o crescimento populacional observado nas últimas décadas estão relacionados com ações que colocam em risco o meio ambiente e a vida. Isto torna o desenvolvimento sustentável um dos maiores desafios da atualidade.

No que diz respeito aos recursos hídricos, torna-se cada vez mais evidente a necessidade de desenvolver métodos que maximizem a produção de forma a atender o mercado crescente e minimizem os riscos e impactos ao meio ambiente. Os processos industriais necessariamente geram passivos ambientais, como a diluição de efluentes em corpos d'água, ameaçando sua potabilidade. Além disso, as atividades industriais também são passíveis de acidentes e falhas na operação, que podem gerar resíduos ambientais, como vazamentos ou emissões indesejadas.

A disseminação do uso de derivados de petróleo em diversos setores é crescente, e com ela a necessidade de estocagem e distribuição dos mesmos. Isto gerou um aumento no número de casos de vazamentos em oleodutos e tanques de armazenagem.

O vazamento de tanques de armazenamento subterrâneos em postos de abastecimento de combustíveis é um dos problemas ambientais mais disseminados em todo o planeta. Pode ocasionar a contaminação do solo e da água subterrânea, trazendo danos ao meio ambiente e à saúde pública (Ferreira *et al.*, 2004). A detecção deste tipo de contaminação torna-se bastante difícil devido a sua localização subsuperficial, pois não é possível fazer observações diretas, de forma que plumas de contaminantes podem se formar no subsolo sem apresentar vestígios em superfície, persistindo por vezes durante anos em alguns casos.

Dentre as substâncias que constituem a gasolina, as que mais causam danos ambientais e à saúde são os compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e os xilenos), pois são os de maior solubilidade em água e alta toxidez (Guimarães, 2011).

Diante deste problema, surge a necessidade de compreender de forma clara não só a maneira como estes contaminantes se comportam, mas também a forma que eles interagem com o meio físico a que estão expostos. Atualmente, é possível aplicar diversos métodos a fim de investigar, detectar e remediar áreas impactadas.

Um dos métodos bastante difundidos atualmente é a utilização de modelos que simulem o comportamento dos poluentes a partir do momento que são lançados nestes corpos hídricos. Neste sentido, a formulação de modelos conceituais de funcionamento geológico-hidrogeológico dos sistemas ambientais é uma ferramenta fundamental para a busca de soluções para os impactos decorrentes da contaminação.

A área de estudo consiste em um posto de abastecimento de combustível localizado na região sul do estado da Bahia. Após 20 anos em operação, foi detectada a presença de hidrocarbonetos na água obtida através de poços de captação em propriedades vizinhas. Desde então o posto vem sendo monitorado e sofreu diversos procedimentos de investigação e remediação a fim de diminuir os impactos gerados pelos contaminantes.

O objetivo do presente trabalho foi selecionar e empregar diversas técnicas de estudo visando melhorar o conhecimento geológico-ambiental de uma área impactada como um modo de planejar e aperfeiçoar ações futuras de remediação.

### **1.1. Objetivos**

O presente trabalho teve como objetivo a elaboração do modelo conceitual hidrogeológico de uma área nos arredores de um posto de abastecimento de combustíveis localizado na região sul do estado da Bahia. Para alcançar tal objetivo foram realizadas diversas ações que constituíram os objetivos específicos do trabalho:

- avaliar o contexto geológico local
- estabelecer a direção do fluxo da água subterrânea na área de estudo

- entender a influência da recarga pluvial

Com isso, foi possível elaborar um modelo conceitual visando simplificar a realidade hidrogeológica da área, a fim de melhorar a compreensão das informações obtidas em campo e possibilitar o melhor entendimento da geologia da área de estudo.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Áreas Contaminadas e Hidrocarbonetos de Petróleo

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2015), área contaminada pode ser definida como “área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de quaisquer substâncias ou resíduos em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger, que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural”.

O surgimento de tais áreas é o resultado de processos socioeconômicos não ambientalmente sustentáveis e do decorrente uso e ocupação do solo sem observância aos parâmetros de proteção ambiental (Günther, 2006). Nestas áreas, os contaminantes podem concentrar-se em subsuperfície e ser transportados a partir de diversos meios, propagando-se por diferentes vias (ar, solo, águas subterrâneas e superficiais), alterando suas características naturais de qualidade e impactando a área e seus arredores (Pinto, 2001).

A contaminação de águas subterrâneas pode ter origens diversas, sendo atualmente as mais comuns relacionadas a atividades industriais (chorumes, elementos radioativos, entre outros), domésticas (esgotos) e agrícolas (fertilizantes, pesticidas, entre outros).

Poluentes ambientais são substâncias de origem sintética ou natural que são liberados no ambiente através de atividades antropogênicas e têm efeitos indesejáveis para o mesmo ou para o homem. Entre os principais grupos de poluentes encontram-se os hidrocarbonetos e sua

presença nos ecossistemas está intensamente relacionada às atividades antrópicas poluidoras, de forma que o petróleo e seus derivados são lançados no ambiente direta e deliberadamente, sendo grandes responsáveis pela contaminação das águas.

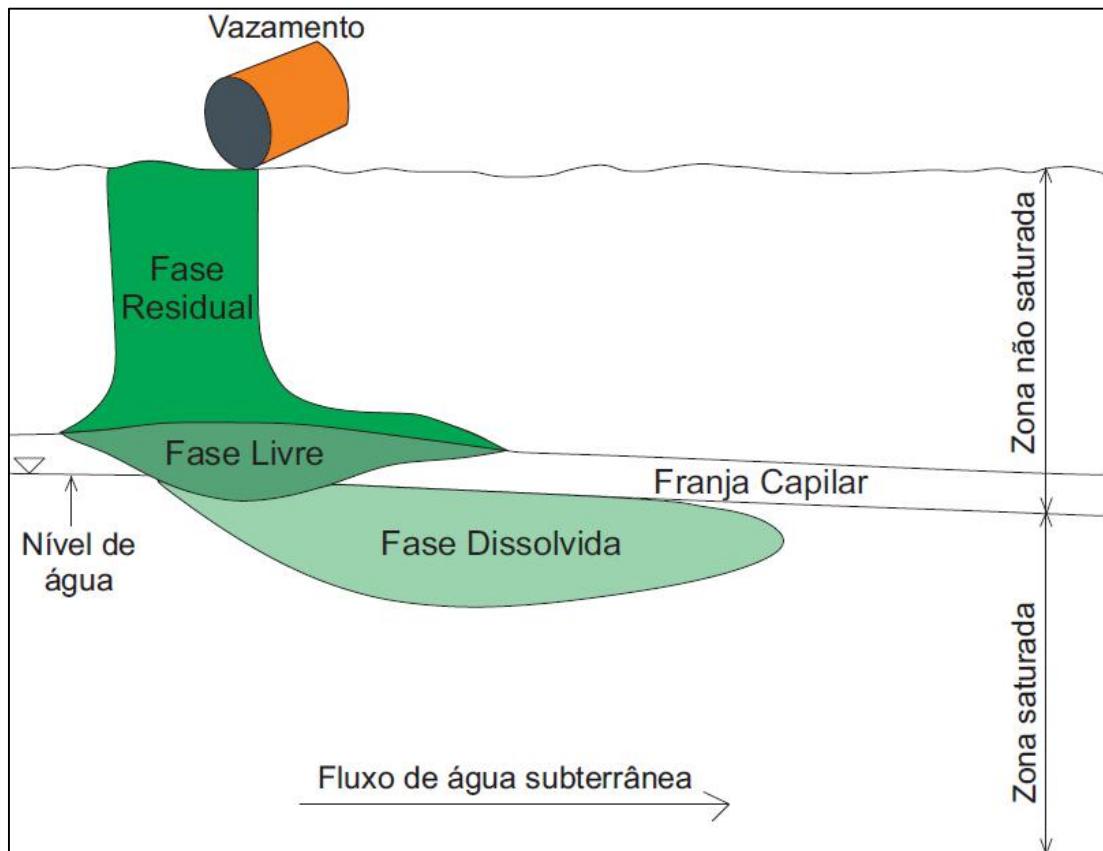
A contaminação por fluidos hidrocarbonetos combustíveis derivados de petróleo (gasolina, diesel) tem características peculiares a este grupo de substâncias, já que estas são, em geral, menos densas que a água e pouco miscíveis (compõem a fase líquida não aquosa: *LNAPL – light non-aqueous phase liquids*). Deste modo, estes contaminantes migram apenas na zona não saturada quando em fase livre (CPRM, 2000).

O petróleo é usado industrialmente para obtenção de diversos produtos, como: óleo combustível, gasolina, parafinas, cosméticos, plásticos, entre outros, e pode ser definido como uma mistura de compostos de ocorrência natural que consiste, predominantemente, de hidrocarbonetos (aproximadamente 90%) e, em menor quantidade, de derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e organometálicos. Sua composição global pode ser definida pelo teor de hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos aromáticos, resinas e asfaltenos.

Por ter caráter hidrofóbico, o petróleo se espalha pela superfície da água em uma lâmina de água livre - rio, lago - formando uma película que impede a troca de gases entre água e ar, eliminando a fauna e a flora da superfície das águas contaminadas e causando grandes impactos. Porém, as dispersões do petróleo através do meio físico (dissolvidos em corpos hídricos, no solo ou aquíferos) têm efeito tóxico muito mais elevado do que a película de óleo que permanece na superfície (Pinto, 2001).

Os hidrocarbonetos costumam ser denominados como contaminantes de fase líquida não aquosa (NAPL) e podem ser divididos em dois grupos: fase líquida não aquosa densa (DNAPL – *dense non-aqueous phase liquids*), que são mais densos que a água, e fase líquida não aquosa leve (LNAPL – *light non-aqueous phase liquids*), que são mais leves que a água.

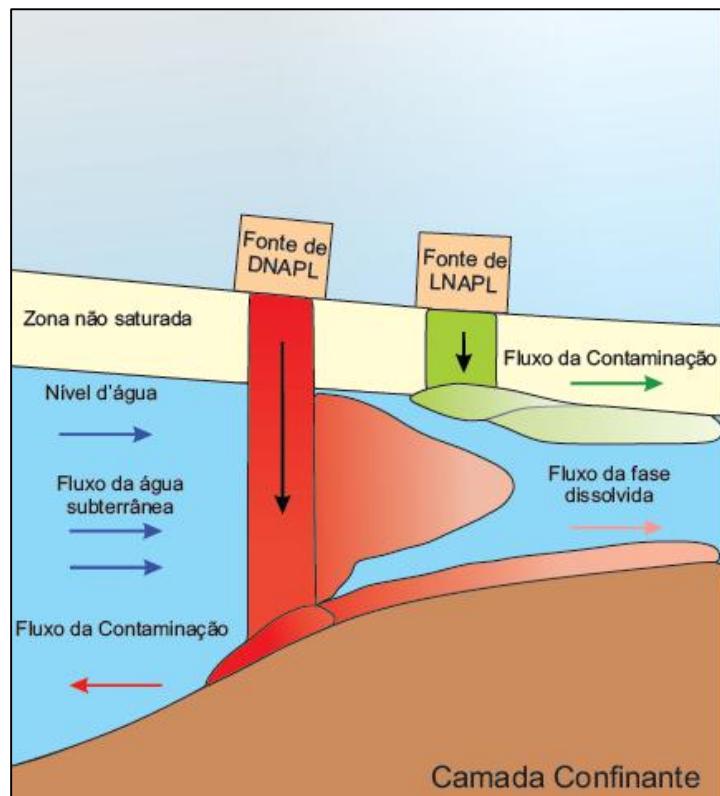
O combustível estará na subsuperfície como líquido de fase não-aquosa (NAPL) em fases distintas (Fetter, 1993): livre (hidrocarboneto líquido, móvel), residual (retido por ação da capilaridade) e dissolvida (dissolvido na água) (Figura 1).



**Figura 1 - Fases de Hidrocarbonetos no subsolo (Adaptado de Fetter, 1993).**

O fluxo de NAPL é controlado por fatores diferentes daqueles que controlam o fluxo aquoso e, portanto, a fase livre se comporta de maneira distinta para cada tipo de contaminante, de forma que os LNAPL permanecem sobre o nível d'água e os DNAPL afundam para a base do aquífero (Galante, 2008) (Figura 2).

Independente da origem do vazamento, o comportamento do hidrocarboneto dependerá principalmente de suas características físico-químicas como: densidade, viscosidade, solubilidade e pressão de vapor, pois elas determinam como ele irá interagir com o meio e influenciar na sua mobilidade, degradação e possibilidade de remoção (Galante, 2008).



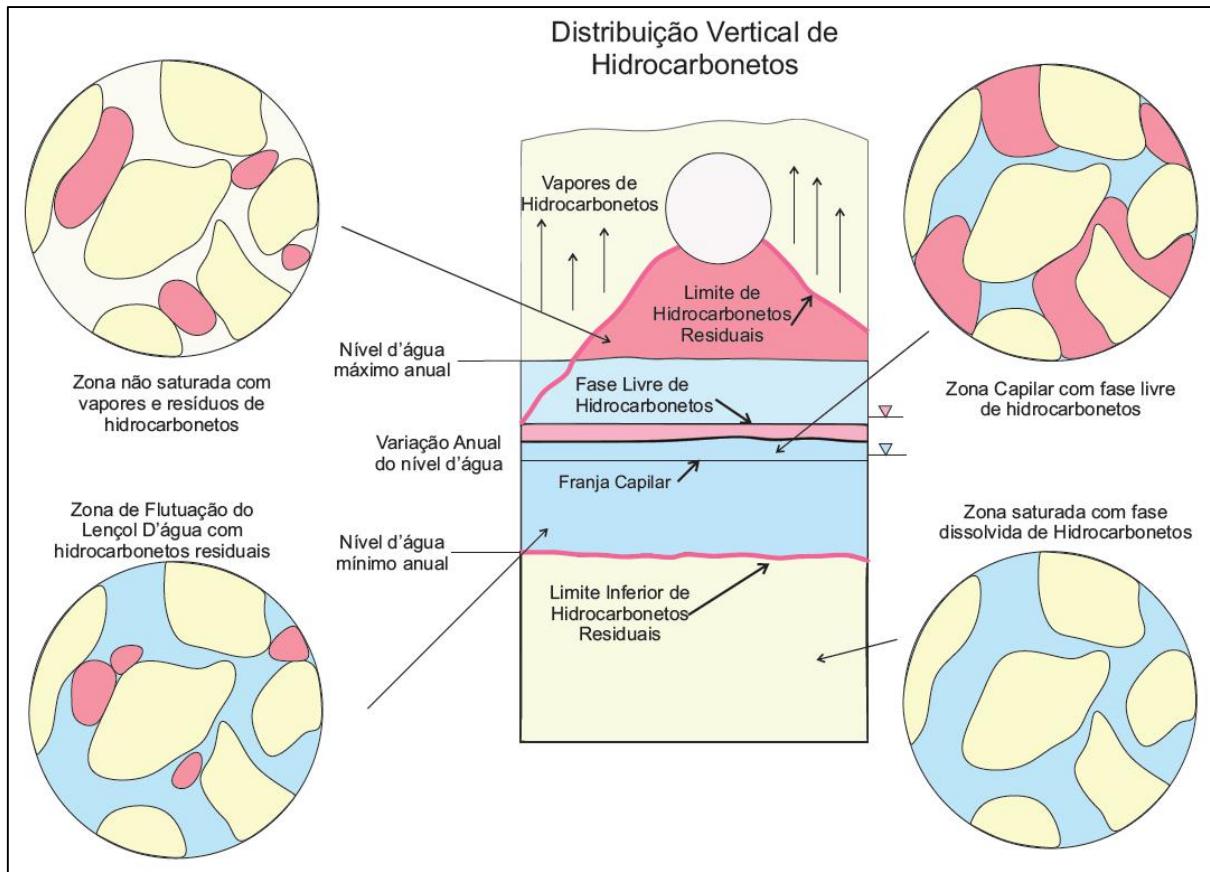
**Figura 2 - Comportamento de diferentes tipos de NAPL no meio aquífero (Modificado de Galante, 2008).**

Durante a ocorrência do vazamento, a movimentação do mesmo será determinada pela soma das seguintes forças: gravidade (tende a puxá-lo para baixo), pressão do ar presente na zona não saturada (atua no sentido contrário ao da gravidade) e pressão do próprio hidrocarboneto (Galante, 2008).

Parte dos contaminantes fica retida nos poros do solo pelas forças capilares (fase residual), enquanto a fase móvel continua a migrar, fazendo com que o volume de fase livre tenda a diminuir, pois fica retido pela rede de poros do solo. Assim, a menos que sejam alimentadas por um vazamento contínuo, as plumas contaminantes se autolimitam (Galante, 2008).

Quando a pressão do hidrocarboneto é menor do que a do ar, o movimento cessa e o contaminante fica imobilizado na zona não saturada. Porém se a pressão é maior do que a do ar o movimento continua até encontrar a franja capilar. Então, o hidrocarboneto começará a se

mover lateralmente e haverá formação de uma lente de hidrocarbonetos sobre a superfície da franja capilar, que se espalhará lateralmente com o tempo (Galante, 2008) (Figura 3).



**Figura 3 - Distribuição vertical de hidrocarbonetos (Modificado de Mindrisz, 2006).**

À medida que a fonte do vazamento continua a fornecer o produto, o solo vai se tornando mais saturado de hidrocarbonetos e o centro da pluma vai migrando descendemente, deixando uma fase residual de hidrocarbonetos no solo ao lado e acima da frente de avanço da pluma.

Em alguns casos, mesmo após cessar o vazamento, a pluma pode permanecer com uma configuração estável por meses ou até anos. Frequentemente são encontrados casos em que a pluma é estável, mas seu centro tem uma saturação de LNAPL que excede o nível residual (Marques, 2007).

As características geológicas e hidrogeológicas de um local impactado determinarão a extensão da área em subsuperfície afetada pelos contaminantes (Spillborghs 1997 *apud*

Galante 2008). Nos aquíferos, devido à lenta circulação de água, capacidade de adsorção dos terrenos e pequeno tamanho dos canalículos, uma contaminação pode levar muito tempo para se manifestar claramente.

O óleo cru e seus derivados são constituídos por hidrocarbonetos não aquosos de relativa alta solubilidade em água como os BTEX, que irão se dissolver parcialmente provocando a contaminação do aquífero (Ferreira *et al.*, 2004).

Um agravante para este problema é que a gasolina comercializada em nosso país é adicionada a 25 a 27% de etanol. Isto aumenta consideravelmente a solubilidade dos BTEX, acelerando sua migração em corpos d'água e, como o etanol é preferencialmente degradado em relação a estes compostos, ele consome rapidamente todos os aceptores de elétrons disponíveis no meio, tornando mais difícil a degradação dos mesmos (Tiburtius *et al.*, 2005).

## **2.2 Técnicas de Remediação de Áreas Contaminadas**

O tratamento de uma área contaminada poderá incluir métodos químicos, físicos e biológicos, a depender do tipo de resíduo e das características da própria área. As tecnologias disponíveis para o tratamento destes resíduos são diversas e vêm sendo aprimoradas constantemente, mas muitas vezes precisam ser combinadas para que seja possível degradar a mistura de diversos componentes tóxicos que não podem ser tratados de forma única (Pinto, 2001).

A remediação de áreas contaminadas consiste na aplicação de uma técnica ou um conjunto de técnicas em uma área contaminada visando remover ou conter os contaminantes presentes, de modo a possibilitar a sua reutilização nos padrões aceitáveis de risco ao meio ambiente e à saúde humana (Fernandes & Ferreira, 2010).

É importante ressaltar que as técnicas de remediação a serem empregadas devem levar em conta tanto as características físico-químicas dos contaminantes envolvidos, quanto a sua

aplicabilidade nas condições hidrogeológicas da área (Mindrisz, 2006). Estas técnicas podem ser classificadas em *ex situ* ou *in situ*.

Entre as técnicas disponíveis atualmente para a remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, destacam-se: *pump and treat*, dessorção térmica, encapsulamento geotécnico, biorremediação, entre outras relacionadas na Tabela 1.

### **2.3 Modelos Conceituais Hidrogeológicos de Áreas Contaminadas**

Um modelo conceitual é uma ideia básica de como um sistema ou processo funciona e é uma maneira bastante eficiente de predizer e avaliar o comportamento de um sistema hidrogeológico sob condições de *stress*. Diz respeito à integração e convergência da análise de todos os dados obtidos, no sentido de se chegar a uma caracterização hidrogeológica da unidade ou das unidades aquíferas em estudo (Eger, 2015).

Modelos conceituais hidrogeológicos são fundamentais como ferramentas de apoio para a previsão, por exemplo, das concentrações de contaminantes (Beven, 2002; Troldborg et al. 2007; Rojas et al. 2010). Assim, a caracterização hidrogeológica deverá ser menos detalhada e mais abrangente regionalmente, no caso de estudos preliminares ou de reconhecimento, ter um maior detalhamento, no caso de estudos gerais ou de viabilidade, e deve chegar ao nível de projeto executivo, no caso dos chamados estudos detalhados.

O modelo conceitual é uma descrição qualitativa do sistema real, a conceptualização basicamente envolve a identificação das estruturas e dos processos (Eger, 2015).

O modelo é parte fundamental da pesquisa hidrogeológica, e as incertezas são fatos dentro de um modelo, já que se trata de uma amostra incompleta do ambiente subsuperficial em que ocorrem inúmeras interações.

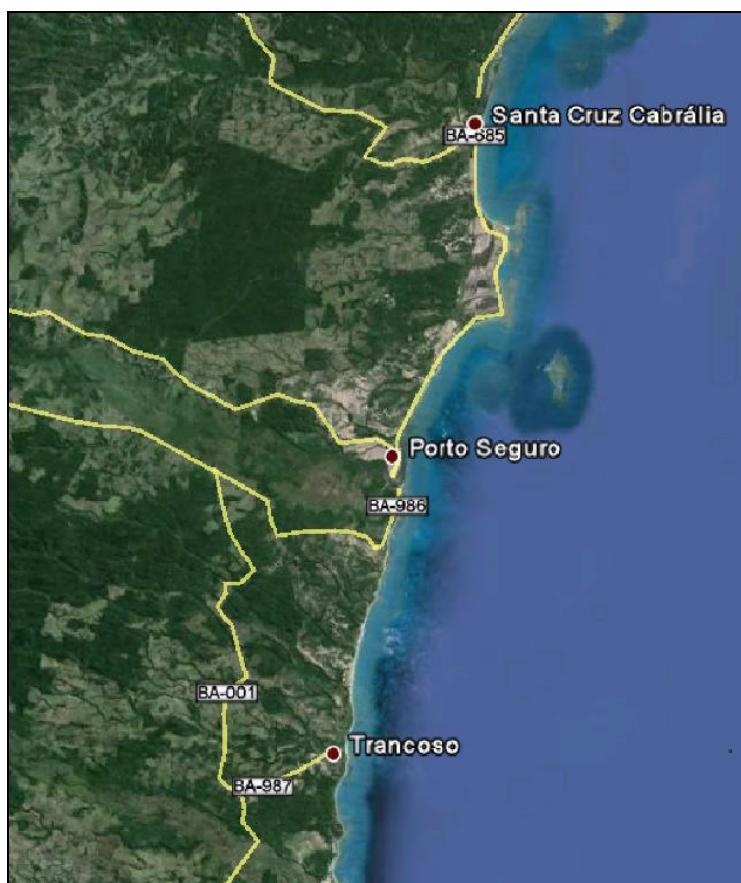
Tabela 1 - Métodos de Remediação (Adaptado de Fernandes &amp; Ferreira, 2010).

Tecnologia	Aplicação	Processo	Metodologia	Prós e Contras
Encapsulamento Geotécnico	<i>In situ</i>	Físico	Confinamento do local contaminado por meio de barreiras de baixa permeabilidade.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo Custo.</li> <li>• Aplicado quando o volume do solo contaminado é grande ou quando há muitos contaminantes diferentes.</li> </ul>
<i>Pump and Treat</i>	<i>In situ e Ex situ</i>	Físico-químico	Consiste na captura da pluma de contaminação e tratamento da água contendo efluentes para depois introduzi-la novamente no aquífero ou descartá-la.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificilmente consegue limpar completamente o aquífero, de forma que o tratamento é considerado finalizado quando os contaminantes atingem concentrações aceitáveis para a legislação vigente.</li> <li>• A reinjeção de águas tratadas no subsolo reduz custos na disposição de efluentes, promovem maiores taxas de lavagem do solo e diminui o tempo de remediação.</li> </ul>
Dessorção Térmica	<i>In situ e Ex situ</i>	Térmico	Aquecimento direto do solo visando à separação dos contaminantes de acordo com seu ponto de ebulição.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicado em solos, lamas ou sedimentos contaminados.</li> <li>• Alto custo.</li> </ul>
Incineração	<i>Ex situ</i>	Térmico	Oxidação de materiais orgânicos através da combustão controlada até produtos mais simples e menos tóxicos como CO <sub>2</sub> e água.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiente em casos de contaminação por compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis, hidrocarbonetos clorados e pesticidas.</li> <li>• Destrução total da parcela orgânica dos contaminantes, e por isso se aplicam a resíduos de alta periculosidade.</li> </ul>
Biorremediação	<i>In situ e Ex situ</i>	Biológico	Utiliza a capacidade dos microorganismos de degradar uma grande variedade de compostos orgânicos e pode ser realizada <i>in situ</i> ou <i>ex-situ</i> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sua eficácia está ligada às condições ideais de temperatura, nutrientes e quantidade de O<sub>2</sub> a fim de estimular a população de microorganismos.</li> <li>• O tempo de duração pode ser longo dependendo de diversos fatores.</li> </ul>
Extração de Vapores do Solo	<i>In situ</i>	Físico	Retira compostos orgânicos voláteis da zona não saturada do subsolo e da franja capilar através da aplicação de pressão a vácuo em poços próximos à contaminação a fim de induzir o fluxo controlado de ar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inviável para compostos orgânicos de massa muito maior que os VOC's, pois aumenta muito a demanda energética, elevando o custo do processo.</li> <li>• O gás retirado deve passar por uma estação de tratamento de vapores.</li> </ul>
Atenuação Natural	<i>In situ</i>	Biológico	Processos físicos, químicos e biológicos que, em condições favoráveis, permitem a redução de massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentrações de contaminantes no solo ou água subterrânea sem intervenção humana.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficaz para VOC's, SVOC's e combustíveis derivados de petróleo.</li> <li>• Limitado por diversos fatores como: falta de nutrientes, receptores de elétrons ou ambos, mobilidade e toxicidade das degradações intermediárias.</li> </ul>
Remoção de Fase livre de Hidrocarbonetos leves	<i>In situ</i>	Físico	Consiste em um bombeamento direto e a separação dos líquidos através de um separador água-óleo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não é efetivo para remediação das águas subterrâneas, pois nestes casos de contaminação uma grande porcentagem dos hidrocarbonetos permanece adsorvida ao solo, e atua como uma fonte contínua de contaminação em fase dissolvida.</li> </ul>

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. Localização

A área de estudo consiste em um posto de revenda de combustível situado na parte sul do Estado da Bahia, próximo à costa. A área do posto em si é de cerca de 950 m<sup>2</sup>, mas a área total da pesquisa, incluindo os poços de monitoramento e sondagens, compreende mais de 50.000 m<sup>2</sup>, estando inserida em zona urbana com ocupação mista, composta por residências e comércios (Figura 4).



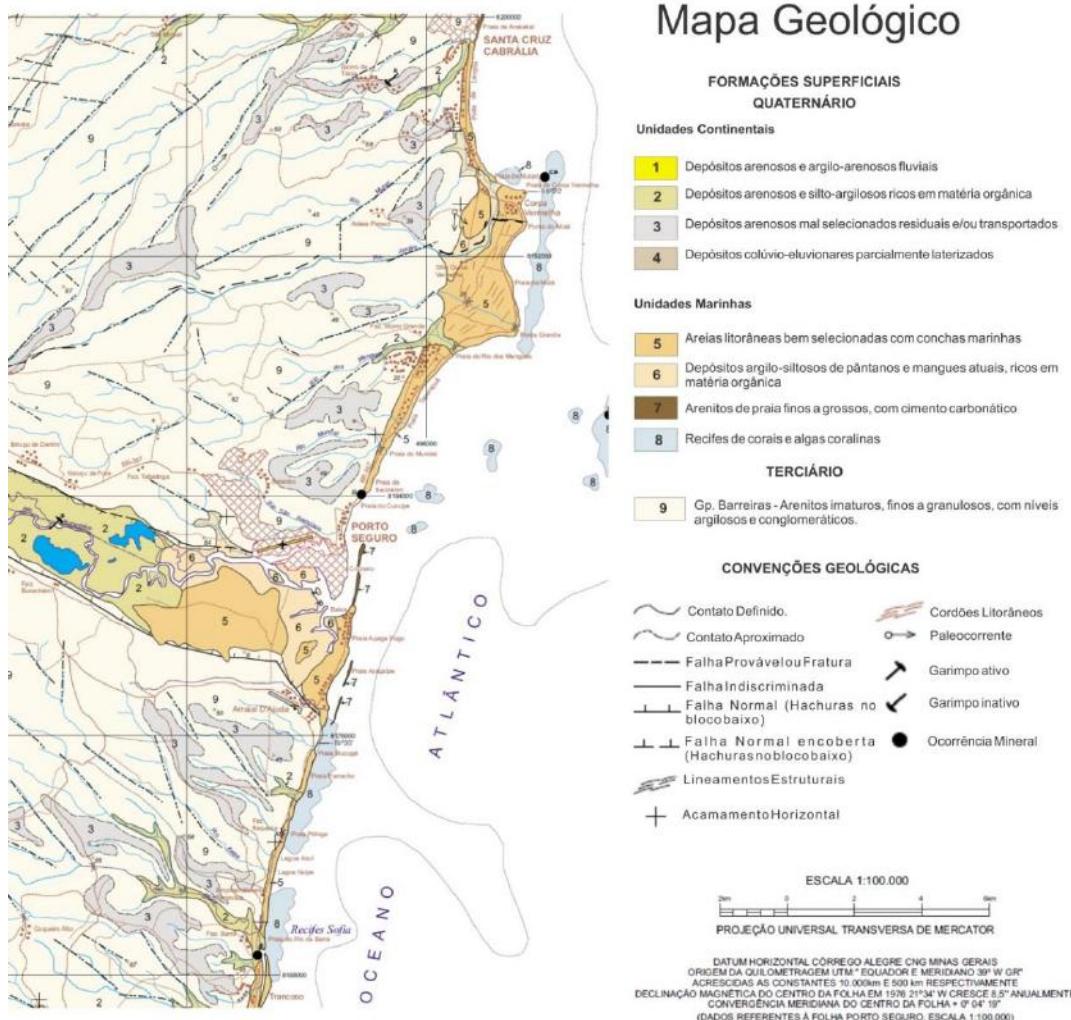
**Figura 4– Mapa de localização aproximada da área de estudo.**

Para os fins deste trabalho, devido ao sigilo exigido pelas empresas envolvidas nos procedimentos executados na área de estudo, a mesma não será especificada e delimitada.

O posto de combustível iniciou suas atividades em 1983 e cerca de vinte anos após houve a detecção da presença de hidrocarbonetos no subsolo local, com o registro

de odor de combustível nas águas subterrâneas captadas nos poços tubulares das propriedades vizinhas ao empreendimento. Por esta razão, a área do posto foi submetida a processos de remediação e vem sendo investigada e monitorada desde então.

### 3.2. Geologia Regional



**Figura 5 - Mapa geológico em a área de estudo está inserida (Adaptado de CPRM, 2000).**

A área de estudo encontra-se inserida geologicamente no Gp. Barreiras, que é constituído por sedimentos clásticos de origem continental (fluvial, flúvio-costeira), representados por estratos compostos por areias quartzosas finas a grossas, areias argilosas intercalados com argila de coloração variada que formam extensos tabuleiros, frequentemente cortados por falésias junto à linha de costa (Sampaio, 2011) (Figura 5).



**Figura 6 - Perfil litológico medido do Grupo Barreiras, próximo à área de estudo (Adaptado de MME, 1999).**

Ocorrem arenitos grossos a conglomeráticos, com matriz caulinítica, pouco consolidados, pobemente selecionados, cinza-esbranquiçados, amarelados e avermelhados (Monteiro *et al.*, 2002) (Figura 6).

Estes depósitos arenosos apresentam estruturas de estratificação cruzada acanalada e planar, laminação plano-paralela ou maciços, enquanto os níveis lamosos e argilosos são maciços ou finamente laminados. Tais níveis são em geral lenticulares, com espessura inferior a 50 cm, podendo também ocorrer na forma de leitos mais espessos (chegando a poucos metros), com geometria tabular e grande extensão lateral.

Além do Grupo Barreiras é possível observar uma forte presença de Unidades Quaternárias, que podem ser marinhas, caracterizadas por unidades de recifes de corais e algas coralinas, unidades de pântanos e mangues atuais, unidades de terraços arenosos, além de unidades de arenitos de origem carbonática e vulcânica que se encontram na costa do estado da Bahia, ou continentais, caracterizadas por unidades detrito-lateríticas, unidades de depósitos arenosos que podem estar associados a lagos ou ter origem eólica, unidades arenosas de origem fluvio-lagunas essencialmente composta por areias, siltes e argilas ricas em matéria orgânica e unidades fluviais arenosas, areno-argilosas e seixosas (MME, 1999).

Os materiais geológicos presentes na área podem estar afetados por falhas e descontinuidades que eventualmente condicionam o fluxo e características hidrogeológicas locais.

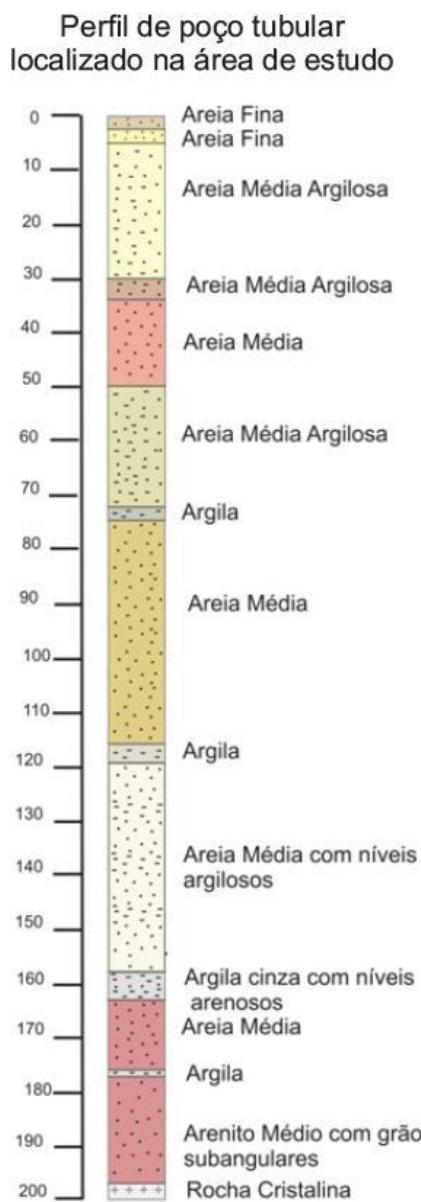
As feições neotectônicas/morfotectônicas observadas na área foram classificadas em cinco grupos distintos: falhas na direção NW-SE, falhas na direção NE-SW, *grábens* dos baixos cursos fluviais, zonas de falhas de direção E-W, e blocos basculados (MME, 1999).

É comum a presença de heterogeneidades como paleocanais e mudanças de fácies que dificultam a interpretação geológica na área. Tais feições são comuns no Gp. Barreiras em toda sua área de ocorrência.

### **3.3. Geologia Local**

Ao analisar os perfis litológicos disponíveis dos poços tubulares e dos poços de monitoramento, foi possível observar que a área de estudo é composta por camadas areno-argilosas e arenosas intercaladas a sedimentos finos sob a forma de camadas ou

lentes argilosas, características do Grupo Barreiras, que cobre grande parte da região em questão (Figura 7).

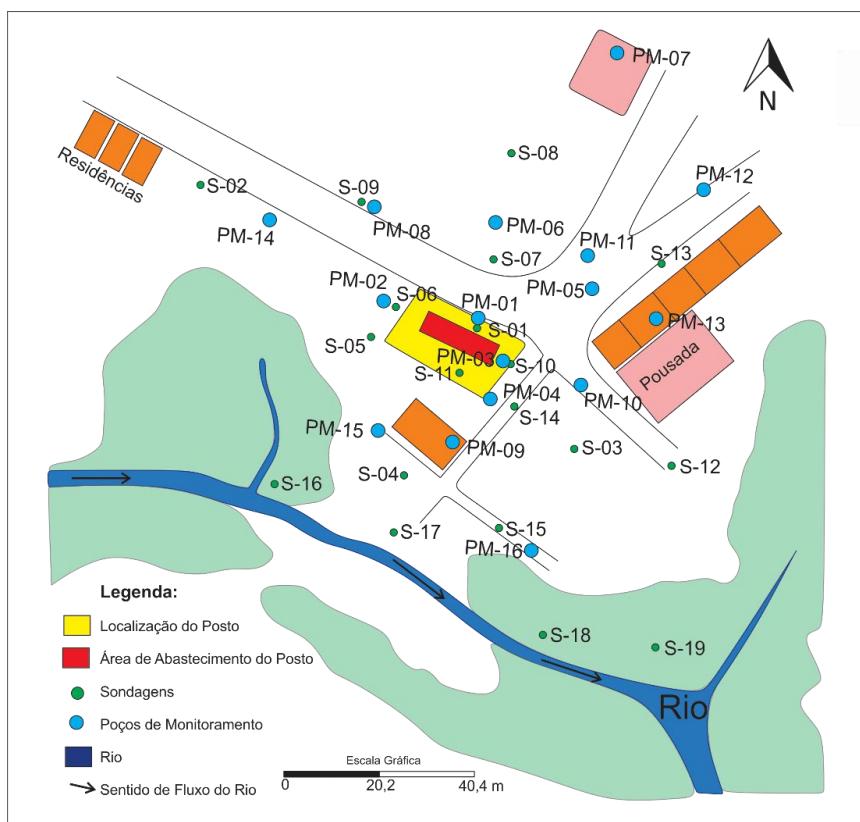


**Figura 7 - Perfil litológico de poço tubular localizado na área de estudo com profundidade em metros (Adaptado de FUJB, 2013).**

É importante ressaltar que a quantidade e distribuição irregular dos poços de monitoramento e poços tubulares existentes no perímetro avaliado não é a ideal para a realização de um estudo detalhado no que diz respeito ao fluxo e transporte de contaminantes, o que dificulta a elaboração de um modelo conceitual consistente, e gera dificuldades no entendimento geológico da área.

### 3.4. Caracterização hidrogeológica

O sistema aquífero presente na região avaliada é constituído pelo Grupo Barreiras, representado por rochas clásticas continentais formadas por sedimentos arenosos com granulometria variando de grossa a fina e sedimentos areno-argilosos que se apresentam intercalados a sedimentos finos sob a forma de camadas e lentes argilosas (FUJB, 2013).



**Figura 8 – Mapa esquemático da área de estudo com a localização dos poços de monitoramento e das sondagens (adaptado de FUJB, 2013).**

Através de dados obtidos nos poços de monitoramento localizados na área de estudo (Figura 8), verificou-se que o Aquífero Barreiras apresenta um caráter multicamadas, com comportamento livre a confinado, com expressiva variação da posição dos níveis potenciométricos no aquífero raso.

Foi possível verificar também boas potencialidades hídricas no aquífero em questão, com vazões variando entre 5 a 12  $m^3/h$  em poços de captação de água subterrânea com profundidade de até 80 m e vazões ao redor de 90 $m^3/h$  com

recuperação do aquífero de 18 a 30 minutos em poços de captação mais profunda, com aproximadamente 190 m de profundidade (FUJB, 2013).

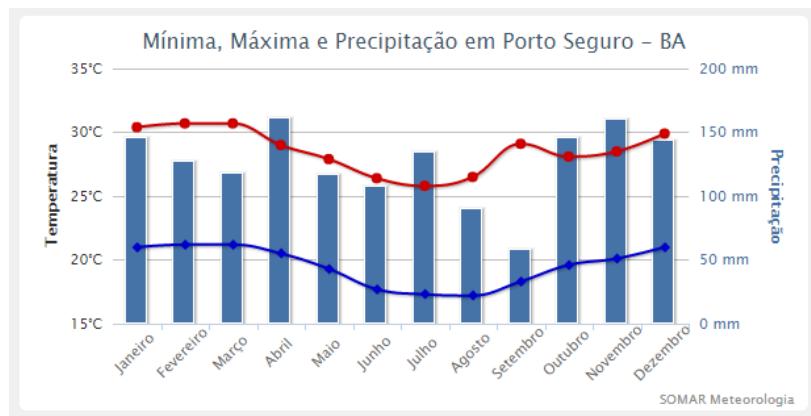
Os níveis d'água (NA) observados nos poços instalados na área, monitorados pelas empresas de consultoria ambiental, entre 2011 e 2014, apresentam níveis de profundidades máximas ocorrendo no PM-11 a 35,4 m (anos de 2011 e 2013) e mínimas no PM-14 a 15,25 m (ano de 2011).

Nas campanhas de campo realizadas foi observada a presença de fase livre no PM-01 a aproximadamente 31,5m de profundidade com espessura variando de 6 a 10 cm nas diferentes campanhas, não sendo observada nos demais poços de monitoramento utilizados para os fins deste trabalho. Devido à presença pontual da fase livre, pode-se supor que ela está relacionada com as atividades do posto de abastecimento, provavelmente havendo um *by-pass* deste combustível no próprio poço.

### 3.5. Clima

O clima na área de estudo é tropical, quente e úmido, com cobertura vegetal de floresta e uma temperatura média compensada anual de 24,3°C (INMET, 2015).

A região tem chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com um período mais seco nos meses de agosto e setembro e chuvas mais intensas de outubro a dezembro (Figura 9).



**Figura 9 - Temperatura máxima, mínima e precipitação em região próxima à área de estudo (dados climatológicos representam uma média do período entre 1961 e 1990).**

Devido à influência marítima, a umidade relativa do ar média varia entre 80 e 85% e não se altera significativamente de acordo com as estações do ano (INMET, 2015).

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia consiste no monitoramento automático do nível d'água na área de estudo, aliada à construção de perfis e seções geológicas e avaliações potenciométricas visando a elaboração de um modelo conceitual hidrogeológico da área de estudo. Ela pode ser divida em 4 etapas: 1) análise das informações de interesse preexistentes sobre a área de estudo; 2) trabalhos de campo para levantamento de dados hidrogeológicos; 3) compilação e processamento dos dados e; 4) elaboração do modelo conceitual hidrogeológico preliminar da área do estudo.

##### **4.1. Análise dos dados preexistentes disponíveis**

Foi realizado um levantamento bibliográfico a fim de compilar dados para consultas e embasamento teórico e técnico.

A maioria dos dados preexistentes disponíveis foram obtidos em relatórios técnicos relativos a trabalhos realizados anteriormente na área do estudo por diversas empresas e pelo Laboratório de Hidrogeologia – UFRJ. Dados de monitoramento de nível d'água, sondagens e avaliações ambientais foram disponibilizados no âmbito de um projeto do Instituto de Geociências com a Fundação José Bonifácio (FUJB-UFRJ), além de documentos, mapas e perfis realizados em pesquisas de outros órgãos governamentais (ex. CPRM, IBGE, INMET).

#### **4.2. Campanhas de Campo**

Durante as campanhas de campo foram realizadas medições do nível estático em 15 poços de monitoramento localizados na área de estudo.

#### **4.3. Interpretação estratigráfica a partir de dados preexistentes**

Os dados estratigráficos obtidos na bibliografia disponível foram compilados e interpretados através da geração de seções geológicas, a fim de possibilitar melhor entendimento e obtenção de um modelo conceitual da área de estudo.

#### **4.4. Obtenção de dados de variação do nível d'água a partir dos transdutores de pressão (*divers*)**

Durante as campanhas de campo foram instalados transdutores de pressão (*divers*) em dois dos poços de monitoramento localizados na área (PM-01 e PM-02), os mesmos permaneceram por três meses (do dia 4 de setembro ao dia 10 de dezembro de 2014) a fim de monitorar o nível d'água a cada meia hora e determinar a influência da recarga pluvial na região.

Estes poços foram os escolhidos para realizar este experimento, pois já havia indícios de que cada um estava localizado em um nível potenciométrico distinto.

Os dados de nível d'água foram comparados com os dados de precipitação medidos de hora em hora na estação de monitoramento mais próxima da área, localizada a cerca de 20 km.

#### **4.5. Elaboração de Rede de Fluxo**

Utilizando as informações de nível d'água obtidas nas campanhas de campo realizadas e em relatórios anteriores, foram delimitadas ao menos duas camadas

aquíferas distintas e também elaboradas redes de fluxo, a fim de melhor compreender o comportamento da água subterrânea nas camadas aquíferas distintas.

#### **4.6. Elaboração de Modelo Conceitual**

A elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual fornece uma ideia de como os sistemas aquíferos funcionam e, através dele, é possível representar de forma clara as unidades e o fluxo do sistema, bem como prever seu comportamento sob determinadas situações (bombeamento, oscilações de recarga, etc.).

O modelo gerado como resultado deste trabalho reuniu informações existentes na bibliografia e dados obtidos nas campanhas de campo para representar, o sistema de fluxo de água na área de estudo, bem como o comportamento da pluma de contaminação. Esse modelo, embora elaborado ainda em caráter preliminar, permite uma melhor visualização dos mecanismos de fluxo e transporte, auxiliando na compreensão da distribuição e destino da pluma contaminante presente no local.

### **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a pesquisa (estratigrafia, piezometria, rede de fluxo) e que permitiram a formulação do modelo conceitual hidrogeológico da área do estudo. Posteriormente, avaliou-se o conjunto de resultados quanto à sua coerência.

#### **5.1. Seções Geológicas da área de estudo**

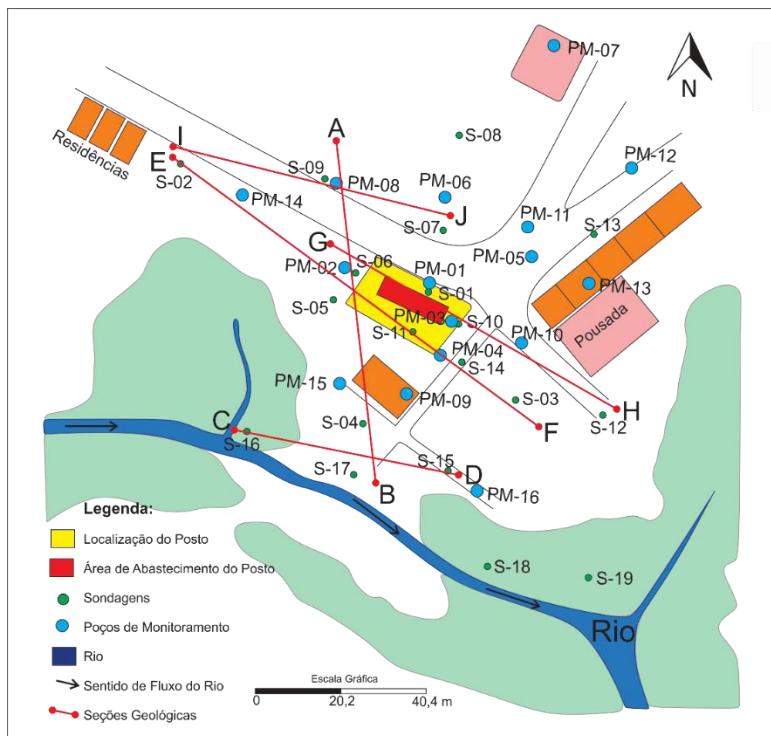
Os dados de sondagem e dos poços de monitoramento (Figura 8), retirados de relatórios elaborados pelas empresas de consultoria que atuaram na área de estudo,

foram compilados a fim de gerar perfis (Anexo I) e seções geológicas que fornecessem informações litológicas e possibilissem a correlação dos poços da região.

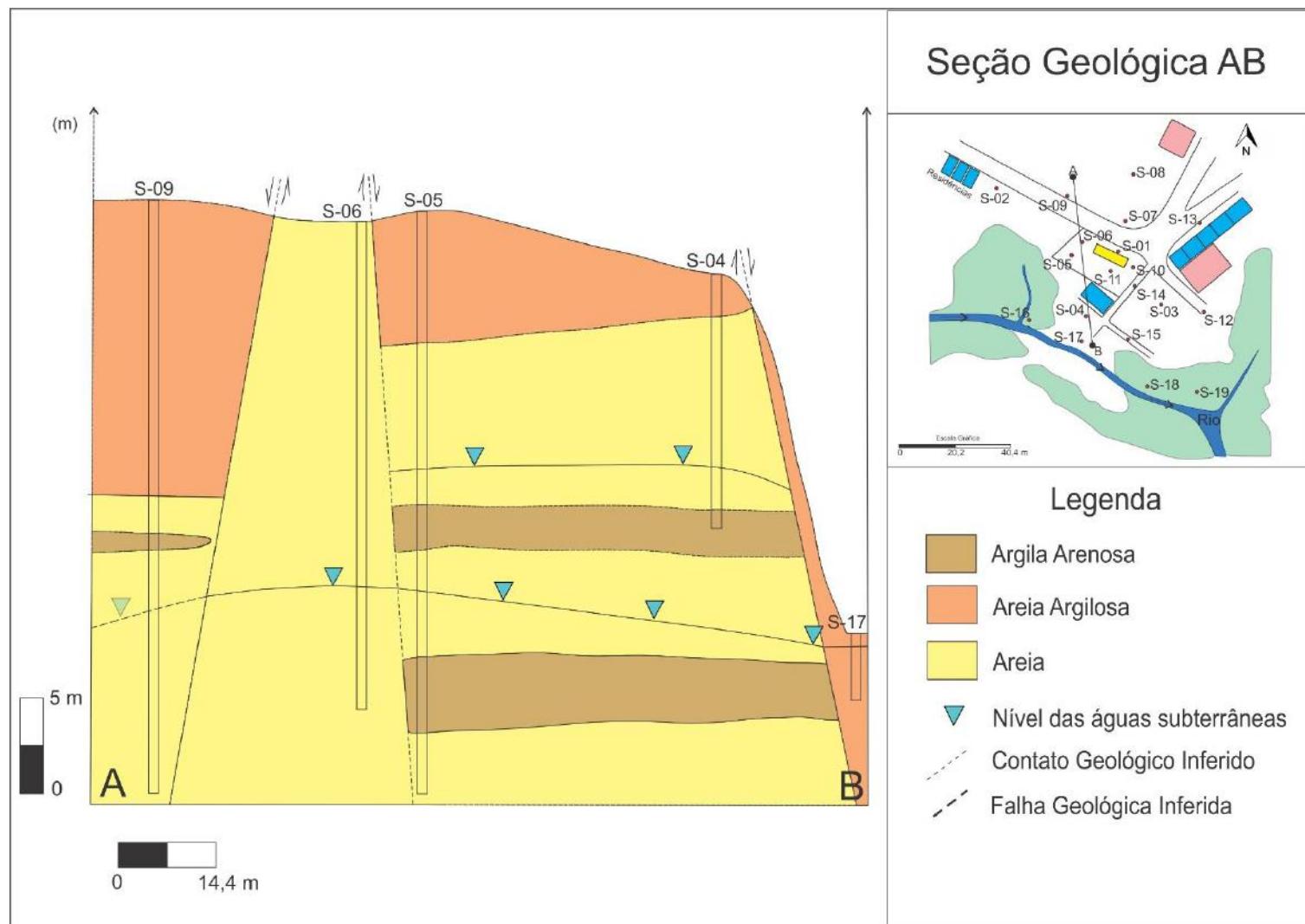
A descrição realizada pelas empresas que fizeram trabalhos de sondagem e instalação de piezômetros na área é frequentemente heterogênea, com informações truncadas ou incompatíveis entre cada levantamento, sem refletir adequadamente o contexto geológico local. Desta maneira, a reelaboração dos perfis das sondagens a partir dos dados originais foi um trabalho importante que demandou a interpretação geológica da autora para tentar homogeneizar os dados.

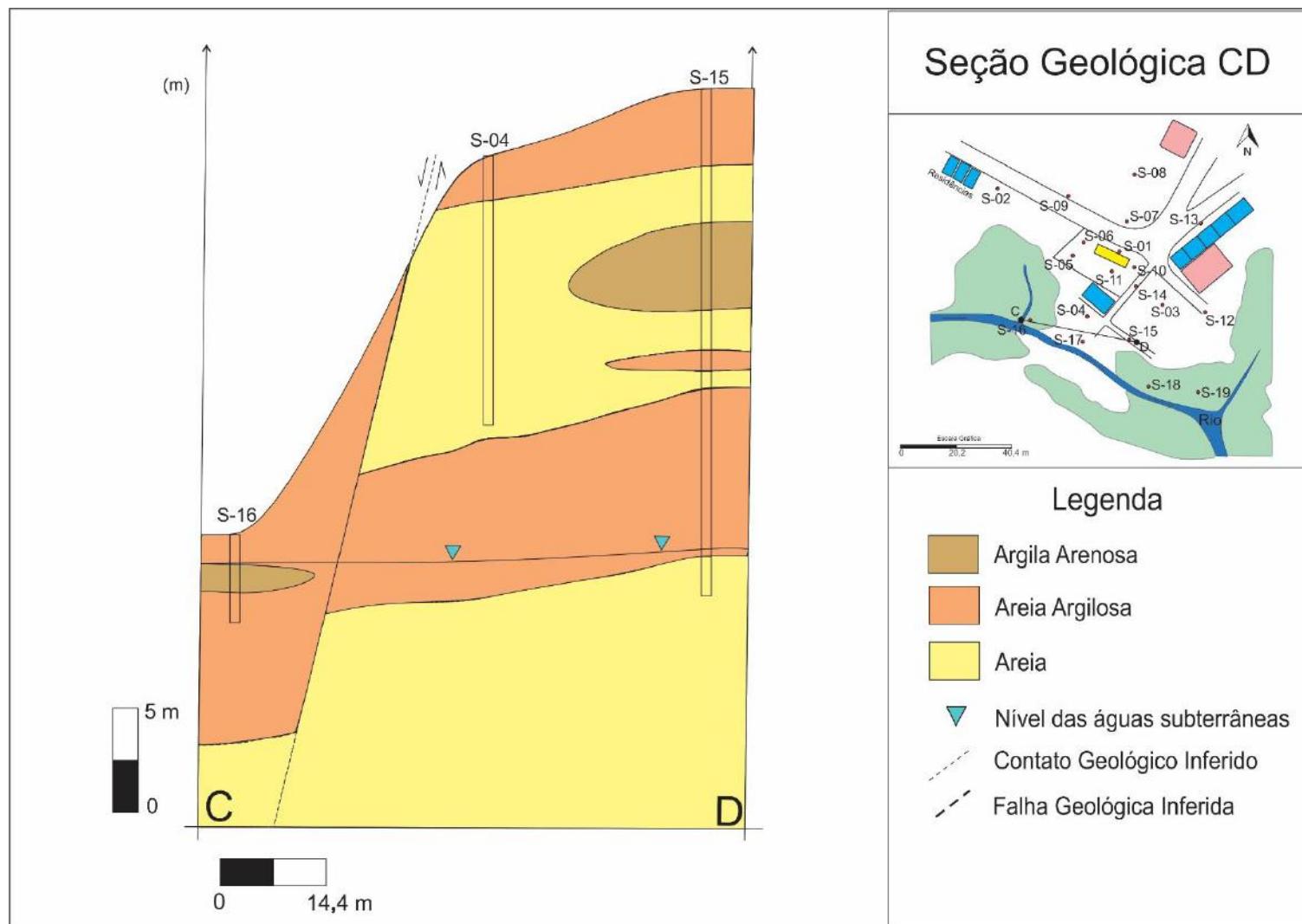
Os dados estratigráficos obtidos a partir da bibliografia disponível possibilitaram a elaboração de seções geológicas (Figuras 10 a 15) com objetivo de facilitar a visualização da distribuição litológica na área de estudo.

É importante ressaltar que a distribuição dos poços de monitoramento cujas informações encontram-se disponíveis para os fins desta pesquisa não é regular, logo, a mesma está sujeita a erros de interpolação dos contatos geológicos representados.



**Figura 10 - Mapa de localização das seções geológicas expressas nas figuras seguintes.**





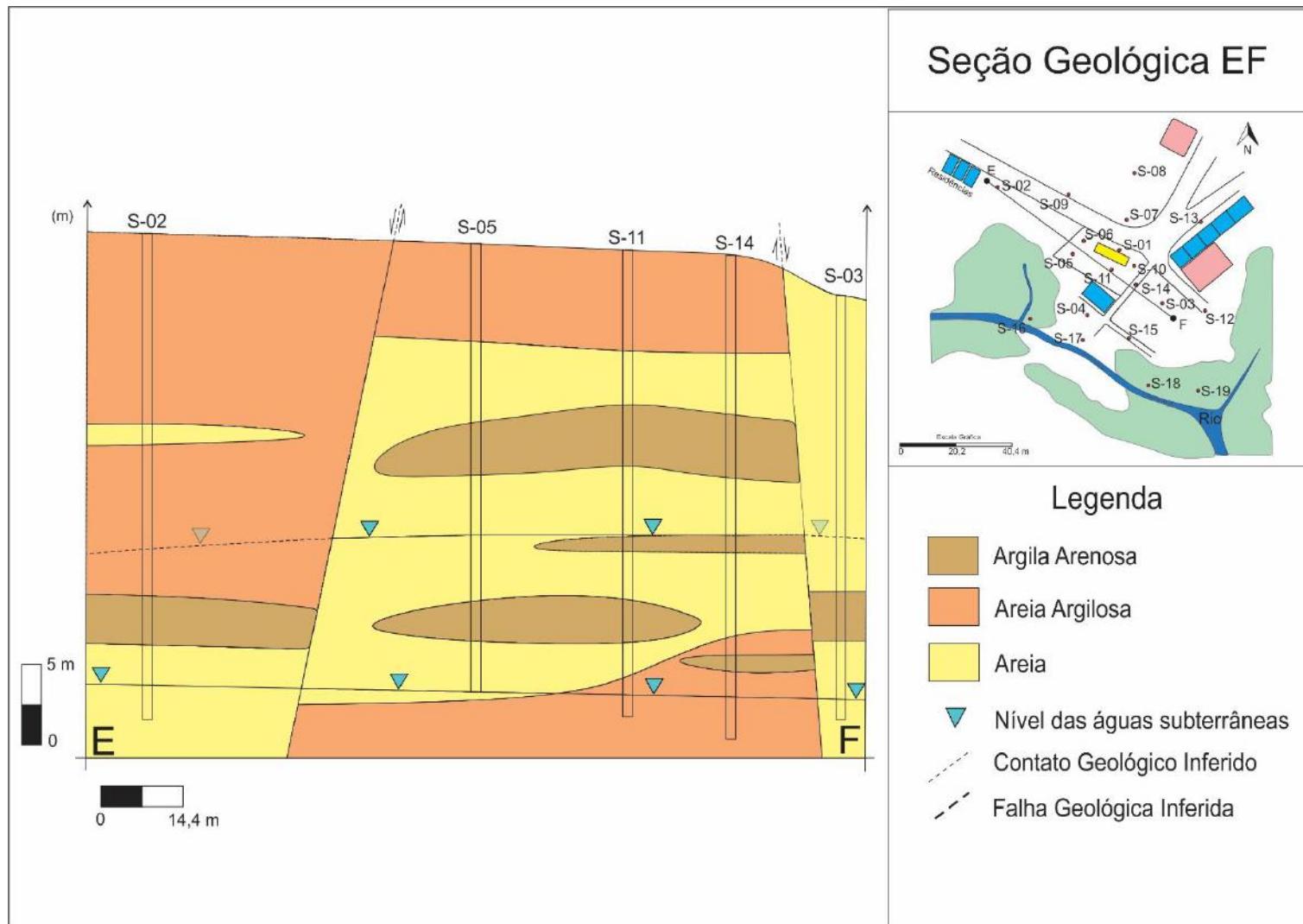


Figura 13 - Seção Geológica EF da área de estudo

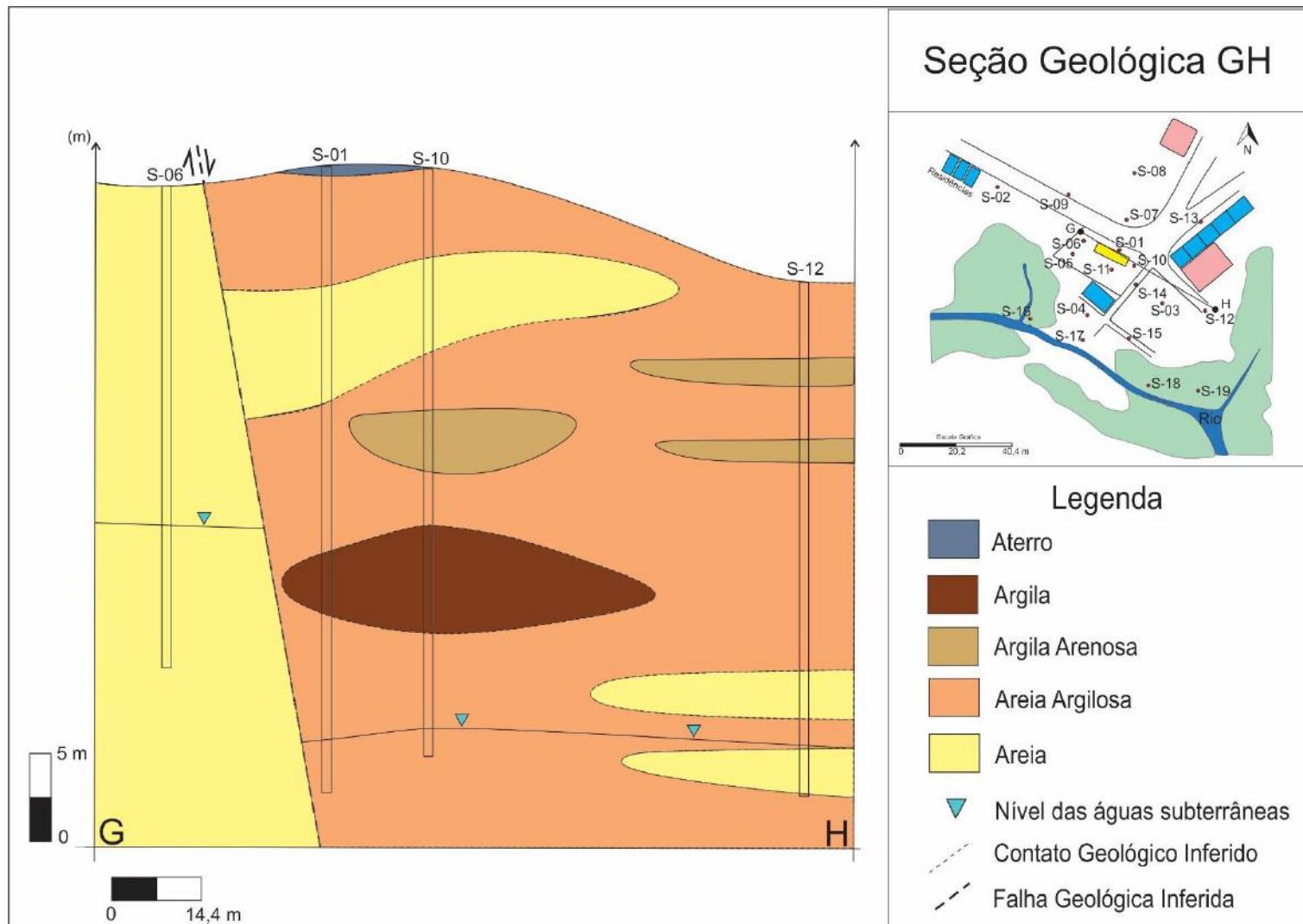
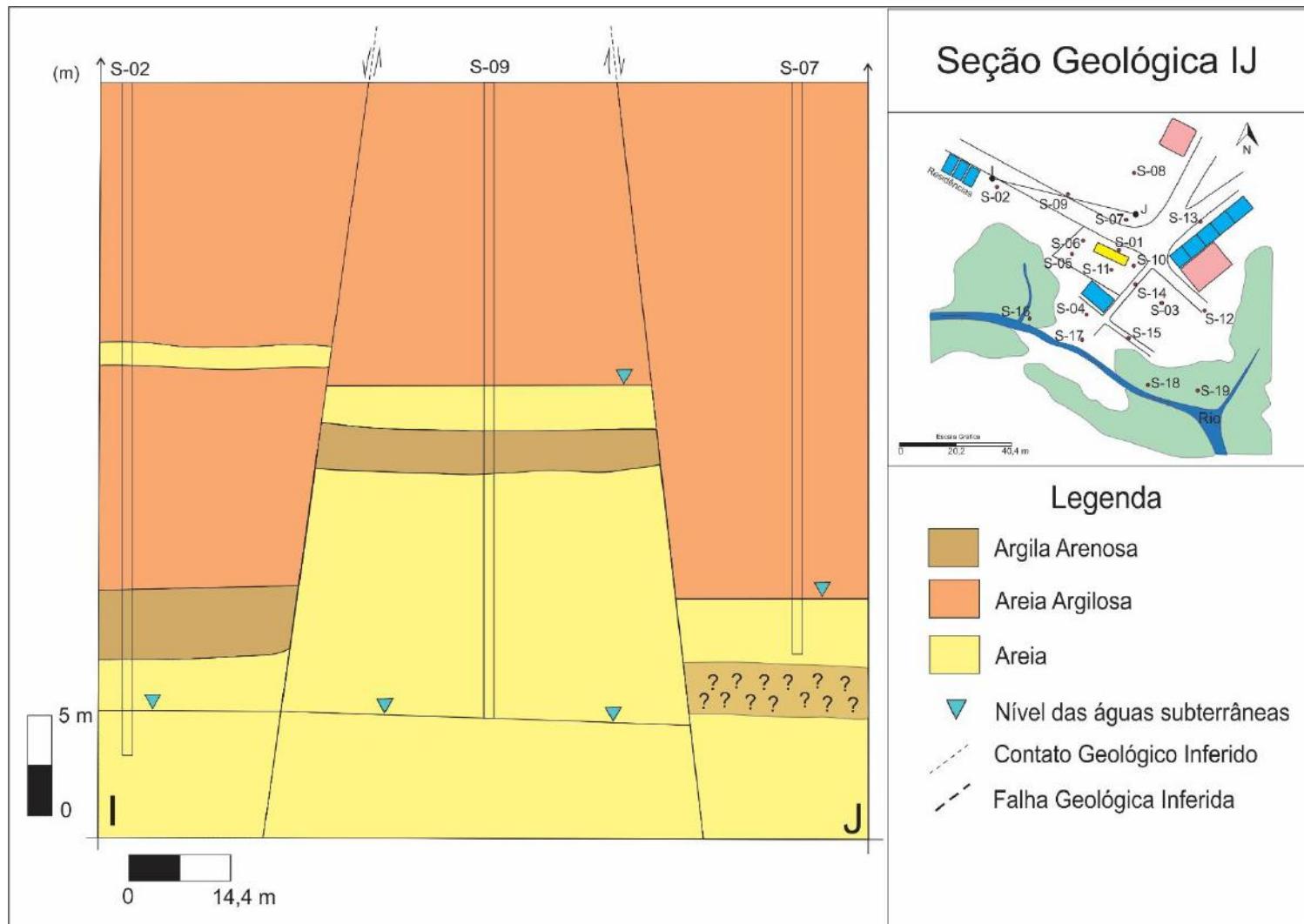


Figura 14 - Seção Geológica GH da área de estudo

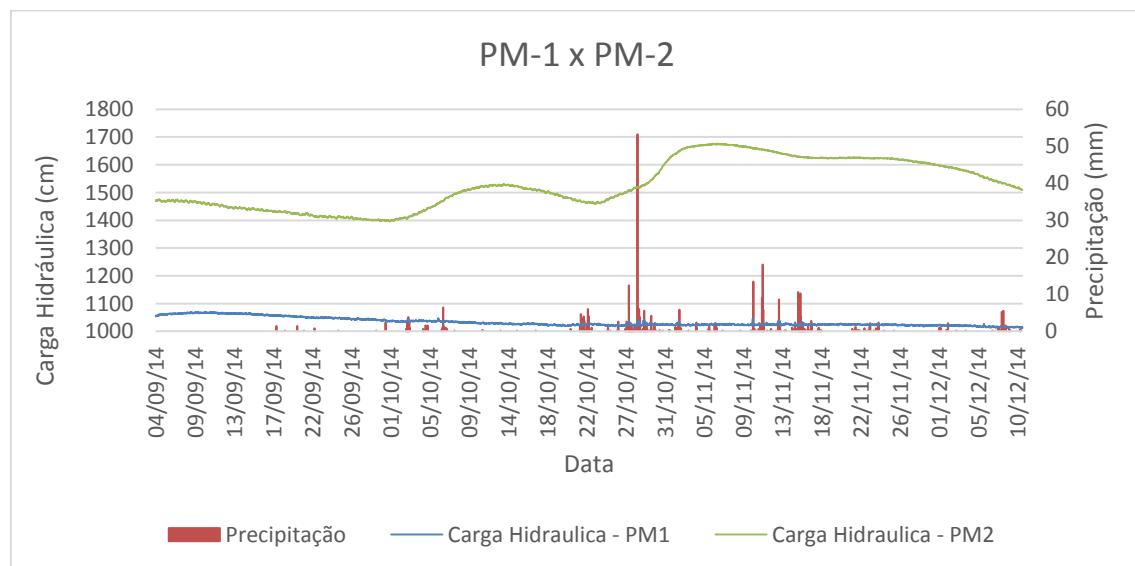


As informações de nível d'água utilizadas na confecção das seções geológicas foram baseadas em comparativos entre os dados de sondagem e os dados obtidos nos poços de monitoramento próximos.

As falhas normais presentes na área de estudo (representadas nas figuras de 10 a 15), podem influenciar bastante no comportamento e interação dos fluidos com o meio, de forma a se comportar de duas maneiras: falha selante, não permite a passagem de fluidos servindo como barreira no fluxo tanto de água quanto de contaminantes, ou falha condutora, permite a passagem dos fluidos podendo conduzi-los e alterar sua direção natural.

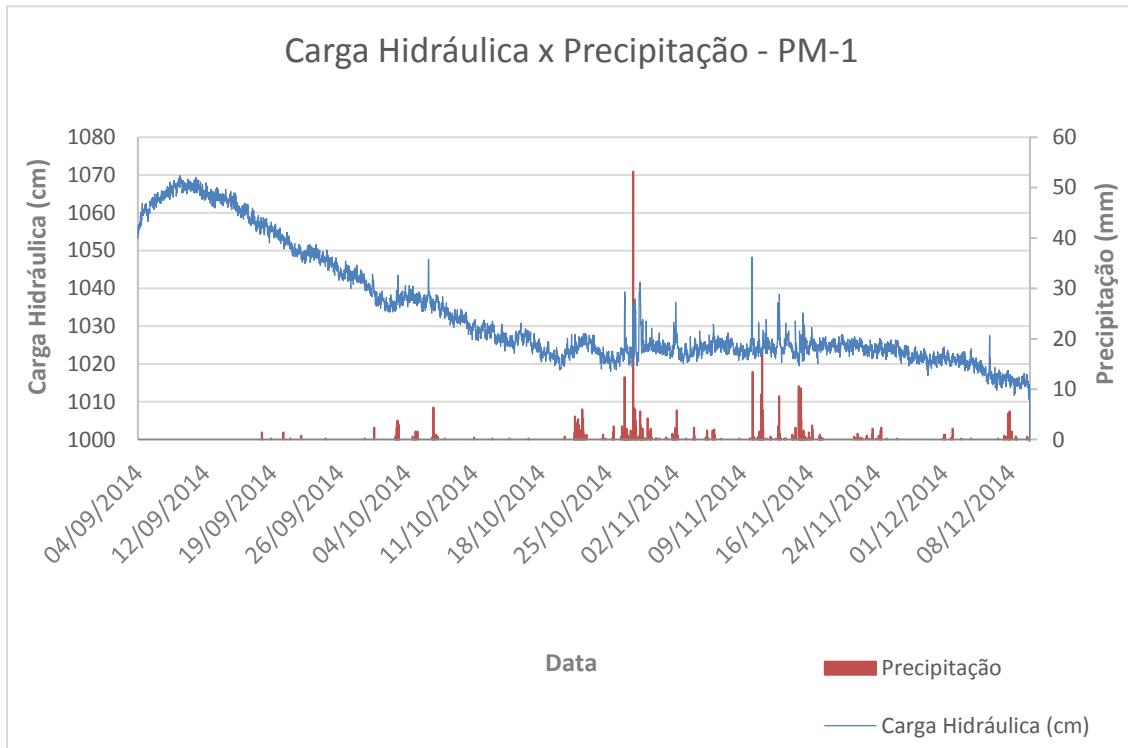
## 5.2. Interpretação e comparação dos dados de variação do nível d'água obtidos a partir dos transdutores de pressão (*divers*)

Os dados obtidos a partir do monitoramento contínuo do nível d'água da região por três meses, utilizando transdutores de pressão (*divers*) em dois dos poços de monitoramento localizados na área de estudo (PM-01 e PM-02) foram tratados e organizados nos gráficos das Figuras 16 a 18.



**Figura 16 - Gráfico comparando os dados obtidos a partir do monitoramento de carga hidráulica dos poços PM-01 e PM-02 e a precipitação pluviométrica horária no mesmo período (4/09/2014 a 10/12/2014).**

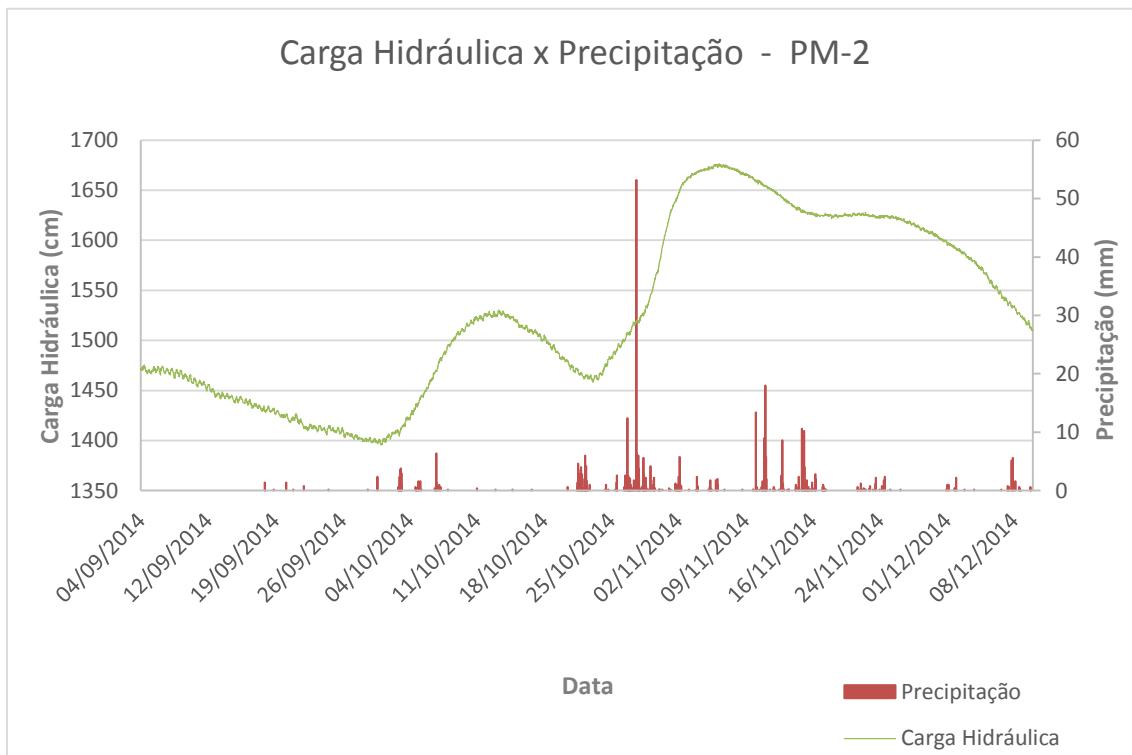
Ao analisar o gráfico obtido pela comparação dos dados de monitoramento dos poços PM-01 e PM-02 (Figura 16), é possível observar uma grande diferença de comportamento da carga hidráulica nos dois poços quando a área é submetida a um evento chuvoso. Isto sugere que cada um dos poços analisados encontra-se em uma camada aquífera distinta, com resposta diferenciada à recarga pluvial.



**Figura 17 - Gráfico relacionando a carga hidráulica e a precipitação pluviométrica no poço PM-01 ao longo de um período de monitoramento de três meses (setembro a dezembro) do ano de 2014. Neste gráfico há um maior detalhamento das variações da carga hidráulica em comparação à Figura 19, observando-se picos associados às chuvas.**

No gráfico representado pela Figura 17, observa-se que a carga hidráulica varia muito pouco (1070-1010 cm) quando correlacionada com a precipitação neste intervalo de tempo, sugerindo uma camada aquífera que não é afetada de forma brusca pela infiltração de água da chuva no solo, ou seja, uma camada mais profunda. Porém há um efeito de resposta rápida e curta duração de oscilação da carga hidráulica, efeito este claramente associado a eventos chuvosos. Provavelmente esse fenômeno deve-se a

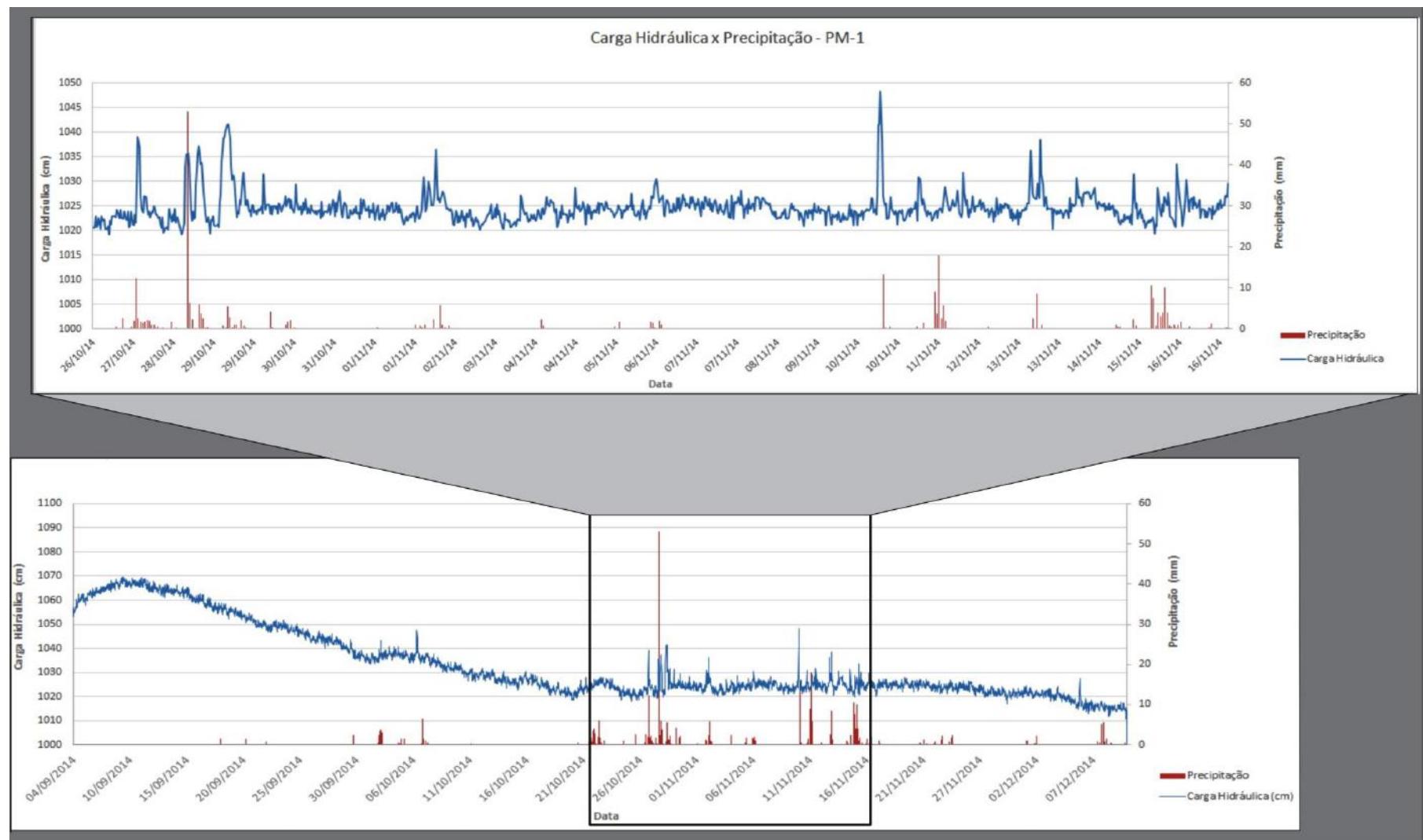
infiltração pelo próprio poço de monitoramento ou pelo seu pré-filtro (*by-pass*) por problemas construtivos, resultando em um aumento do nível piezométrico rapidamente dissipado. Há também oscilações pequenas devido a variações randômicas do instrumento de medida.



**Figura 18 - Gráfico relacionando Carga Hidráulica x Precipitação no PM-02 ao longo de um período de monitoramento de três meses (setembro a dezembro) do ano de 2014.**

No gráfico obtido a partir do monitoramento do PM-02 (Figura 18), observa-se que a carga hidráulica varia bastante quando comparada à do PM-01 (1395 – 1675 cm), ao ser correlacionada com a precipitação neste intervalo de tempo. Isto sugere uma camada aquífera afetada de forma mais imediata pela infiltração de água da chuva no solo, com uma resposta muito mais rápida a este tipo de recarga, por ser uma camada mais rasa em relação à que se encontra o PM-01.

Ao se utilizarem dados de períodos de tempo mais restritos, obtêm-se os gráficos representados nas Figuras 19 a 21 a seguir.



**Figura 19 - Gráfico de monitoramento da carga hidráulica do PM-01 no período de 26/10/2014 a 17/11/2014.**

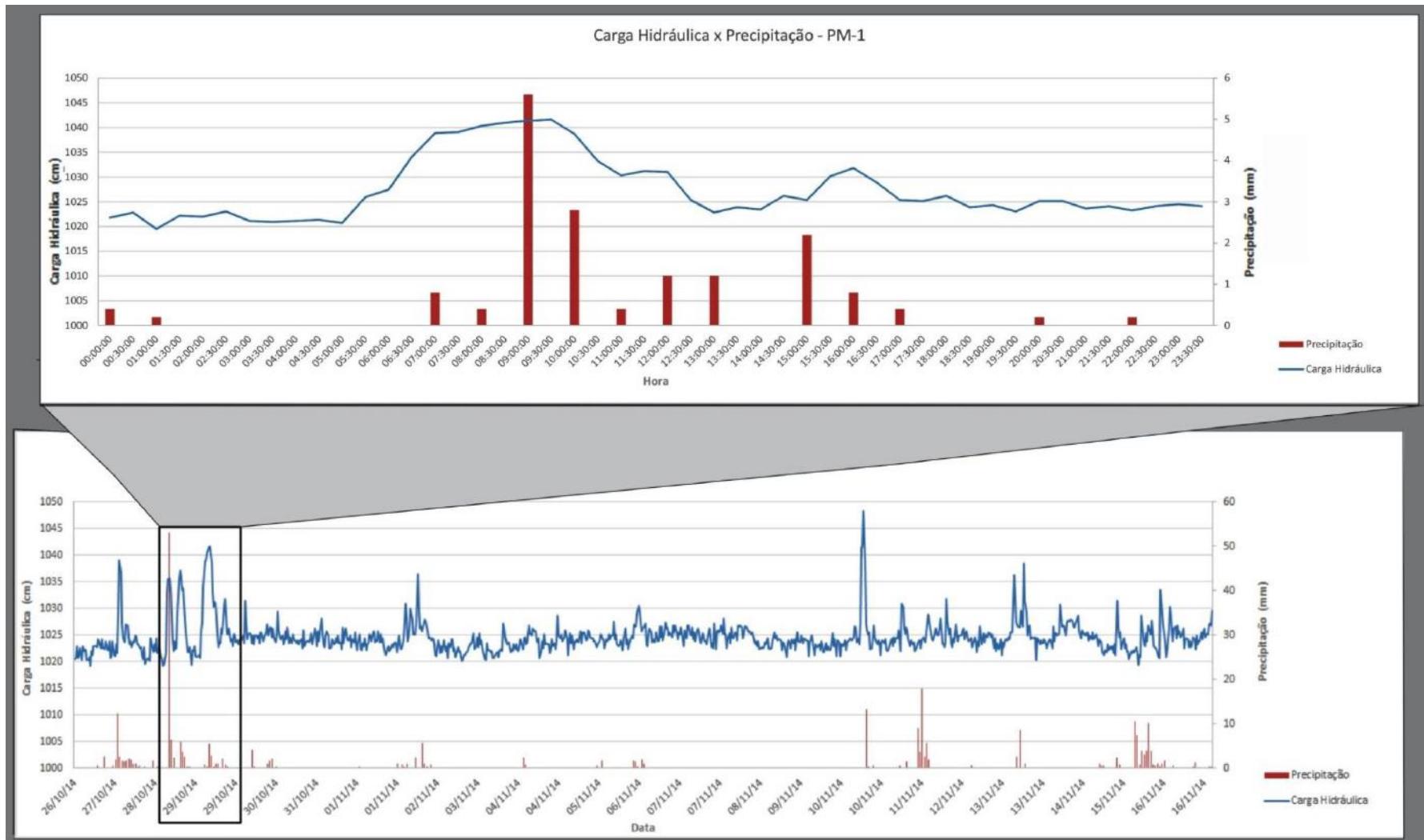


Figura 20 - Gráfico de monitoramento da carga hidráulica do PM-01 no dia 29/10/2014.

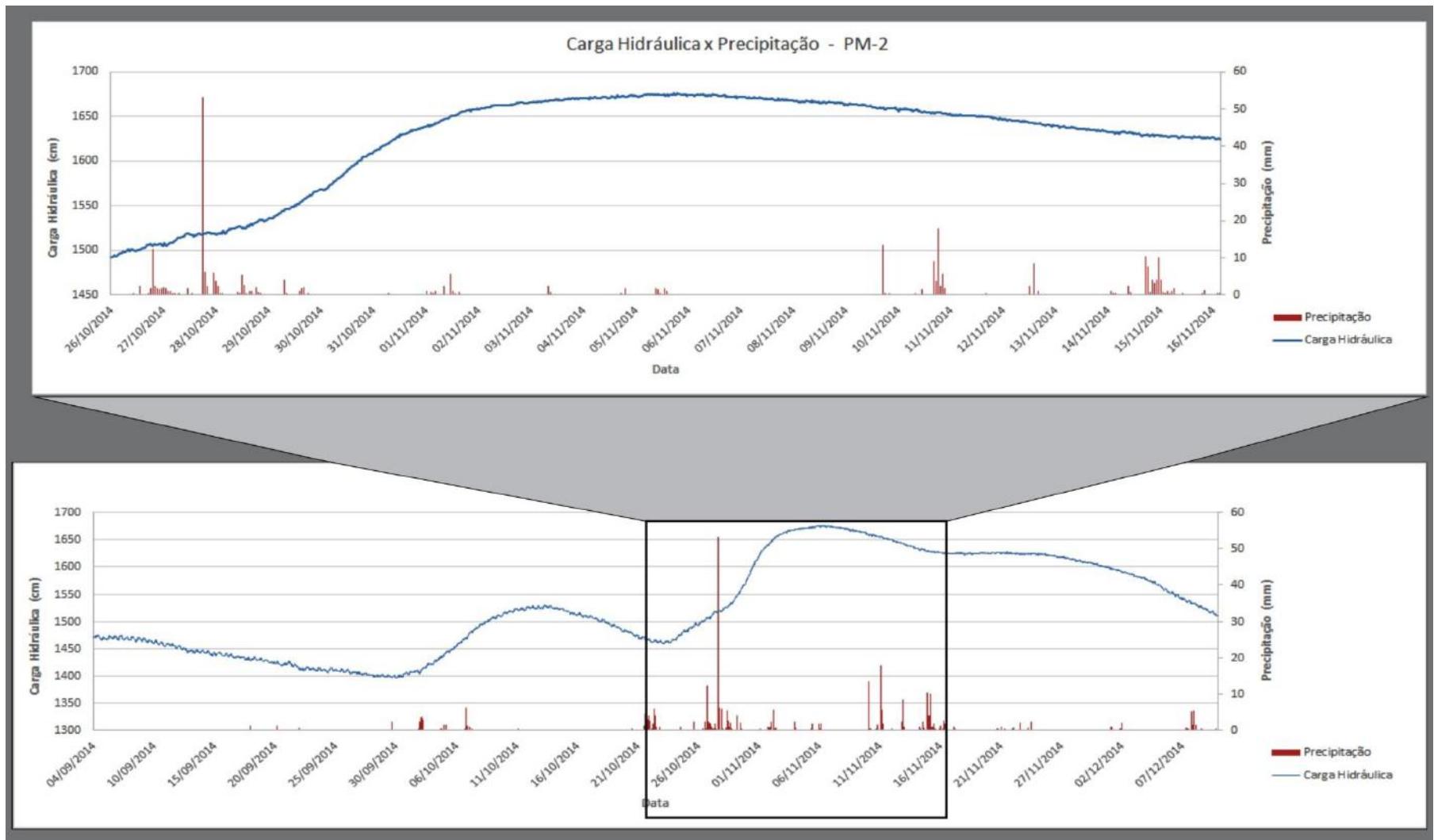


Figura 21 - Gráfico de monitoramento da carga hidráulica do PM-02 no período de 26/10/2014 a 17/11/2014.

Analizando-se os dados de monitoramento de carga hidráulica dos poços PM-01 e PM-02 em um espaço temporal mais restrito (26/10/2014 – 17/11/2014), escolhido devido aos eventos pluviométricos ocorridos neste intervalo, é possível observar o comportamento do nível d'água nestes poços logo após uma chuva representativa (53,2 mm) ocorrida no dia 28/10/2014.

No gráfico mais detalhado no PM-01 (Figura 19) observa-se que a carga hidráulica do aquífero se mantém bastante estável durante todo o período analisado, de 26/10/2014 a 17/11/2014, mesmo após a região ter sido submetida a uma quantidade de chuva considerável. Isto sugere que o tempo de resposta à recarga da chuva neste aquífero é maior do que o tempo que o PM-01 esteve sob monitoramento, ou seja, uma resposta lenta, da ordem de meses, devido à profundidade do aquífero. Na figura 20 foi elaborado um gráfico ainda mais detalhado, utilizando como parâmetro as medições de carga hidráulica obtidas de 30 em 30 minutos no PM-01. Este gráfico evidencia uma variação de mais de 10 cm em apenas uma hora. Aparentemente, este fenômeno se trata de um efeito de poço, que pode estar relacionado a diversos fatores, entre eles o mais provável é a entrada direta de água dentro do poço.

A partir do gráfico detalhado do PM-02 (Figura 21) é possível estimar o tempo de resposta do aquífero à recarga pelo evento chuvoso. Observa-se que a carga hidráulica medida no poço aumenta aproximadamente 10 dias após o evento.

É importante ressaltar que os dados pluviométricos utilizados para fins deste trabalho foram obtidos a partir da estação pluviográfica mais próxima, localizada a aproximadamente 20 km da área de estudo.

### **5.3. Rede de Fluxo**

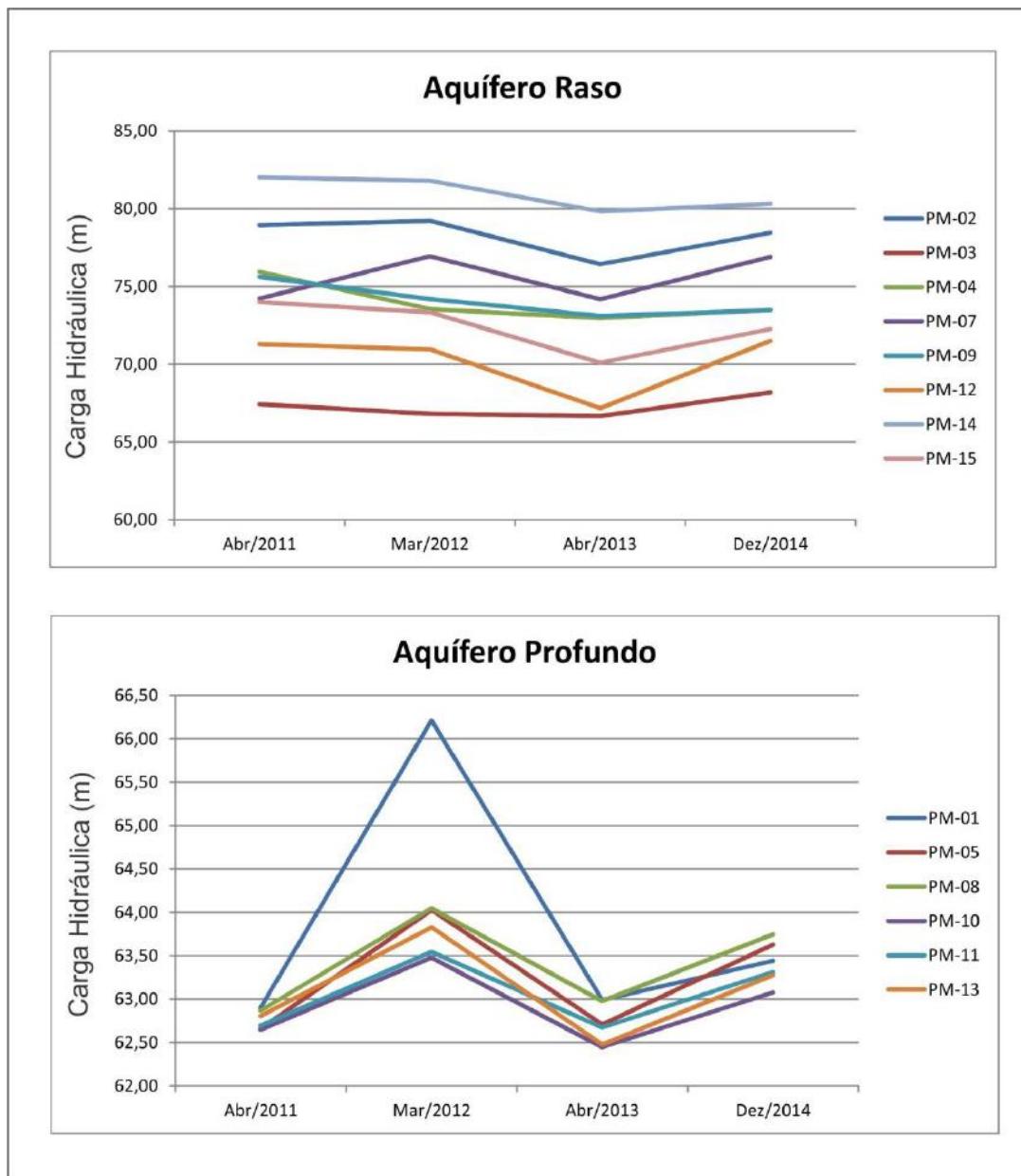
A partir dos diversos trabalhos realizados na área de estudo com objetivo de monitorar as condições hidrogeológicas do local, foi possível compilar dados de

monitoramento de nível d'água estático em quatro anos consecutivos e utilizando estes dados e a cota da boca do poço de monitoramento (cota da boca do PM – nível d'água = carga hidráulica), calcular a carga hidráulica dos poços neste período de tempo (Tabela 2).

**Tabela 2- Valores de carga hidráulica obtidos a partir do monitoramento do nível d'água pelas empresas de consultoria ambiental de 2011 a 2014 – Em rosa, encontram-se os poços localizados na camada aquífera mais rasa, enquanto em azul, encontram-se os poços localizados na camada mais profunda.**

Poço de Monitoramento (PM)	Cota da boca do PM (m)	Profundidade do PM (m)	Carga Hidráulica – abr 2011 (m)	Carga Hidráulica – mar 2012 (m)	Carga Hidráulica – abr 2013 (m)	Carga Hidráulica – dez 2014 (m)
<b>PM-01</b>	97,66	35,00	62,90	66,21	62,99	63,44
<b>PM-02</b>	97,72	26,07	78,96	79,23	76,43	78,45
<b>PM-03</b>	97,76	32,52	67,43	66,81	66,67	68,19
<b>PM-04</b>	95,70	24,50	75,93	73,55	72,98	73,50
<b>PM-05</b>	97,93	37,00	62,66	64,03	62,71	63,63
<b>PM-06</b>	97,93	30,00	69,07	73,15	Seco	Seco
<b>PM-07</b>	99,04	28,57	74,22	76,94	74,17	76,89
<b>PM-08</b>	97,95	37,00	62,87	64,05	62,98	63,75
<b>PM-09</b>	90,89	21,57	75,62	74,19	73,10	73,47
<b>PM-10</b>	95,36	35,90	62,65	63,48	62,45	63,08
<b>PM-11</b>	98,09	37,50	62,69	63,54	62,67	63,31
<b>PM-12</b>	97,66	33,00	71,29	70,96	67,17	71,50
<b>PM-13</b>	95,88	38,85	62,81	63,83	62,48	63,28
<b>PM-14</b>	97,27	23,20	82,02	81,80	79,82	80,32
<b>PM-15</b>	90,94	21,10	74,01	73,34	70,10	72,26
<b>PM- 16</b>	-	-	-	-	-	Não Monitorado

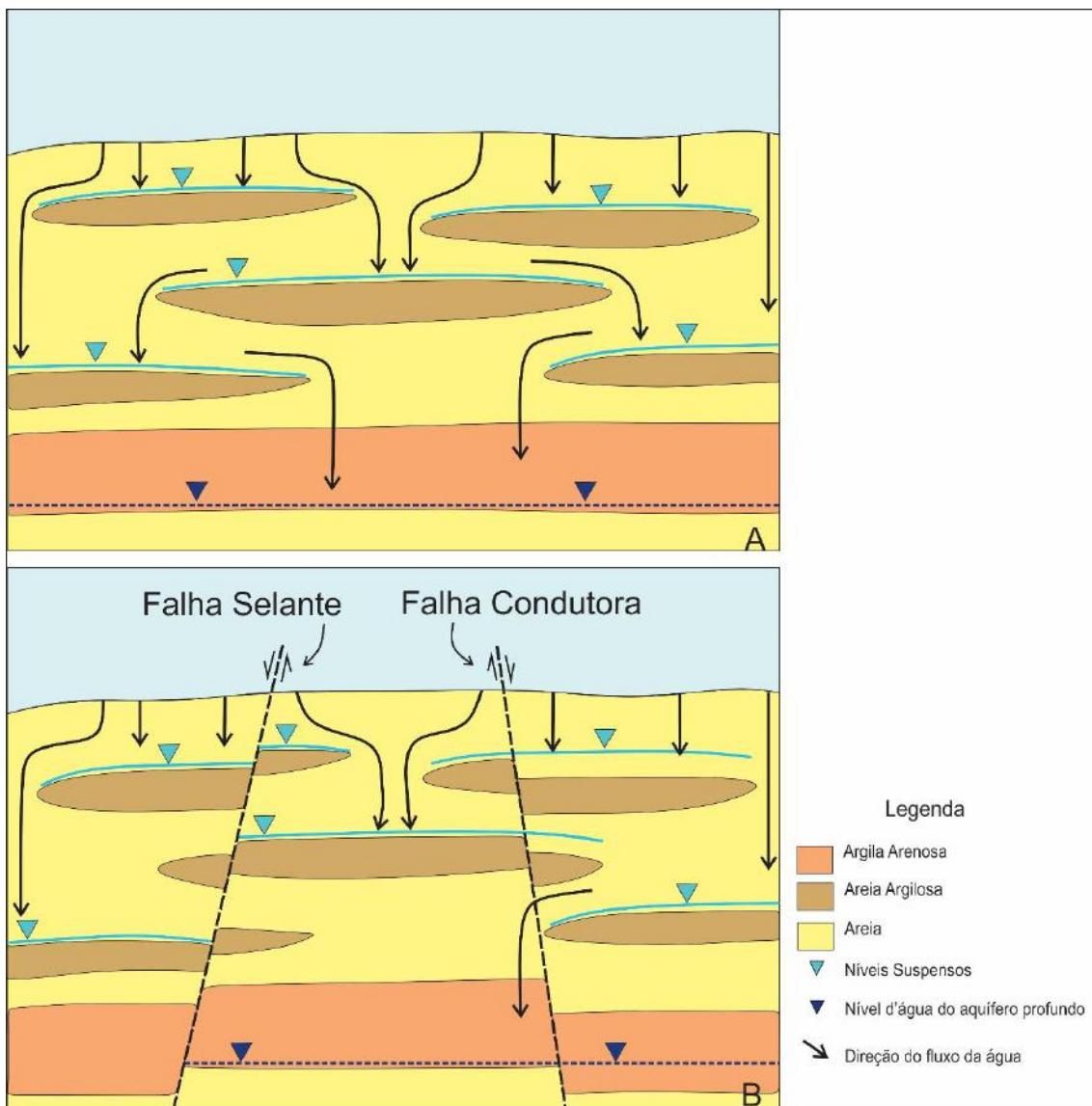
Utilizando os resultados de carga hidráulica expressos na tabela 2, foi possível delimitar a piezometria das duas camadas aquíferas com comportamentos distintos: uma camada mais rasa, composta por diversos níveis suspensos, com carga hidráulica variando aproximadamente de 66 a 82 metros e uma camada mais profunda, com carga hidráulica variando aproximadamente de 62 a 64 metros (Figura 22).



**Figura 22 - Gráficos de monitoramento da variação da Carga Hidráulica das camadas aquíferas rasa e profunda.**

Nota-se na observação dos poços do aquífero mais raso / freático que há uma variabilidade considerável nos níveis d'água observados em cada poço, que chega a vários metros de diferença (Figura 23). Tal fato aponta para a presença de níveis diferenciados, com um controle exercido pelo posicionamento das lentes de argila e controle estrutural (diferentes blocos de falha), ao modo de aquíferos suspensos (Figura 23).

Devido às características geológicas da região, e principalmente ao padrão litológico observado nas seções representadas pelas figuras 11 a 15 do presente trabalho, onde pode-se observar um padrão de camadas arenosas com lentes de caráter mais argiloso, existe uma grande possibilidade de que os níveis aquíferos suspensos, sejam controlados e limitados por estas lentes argilosas.

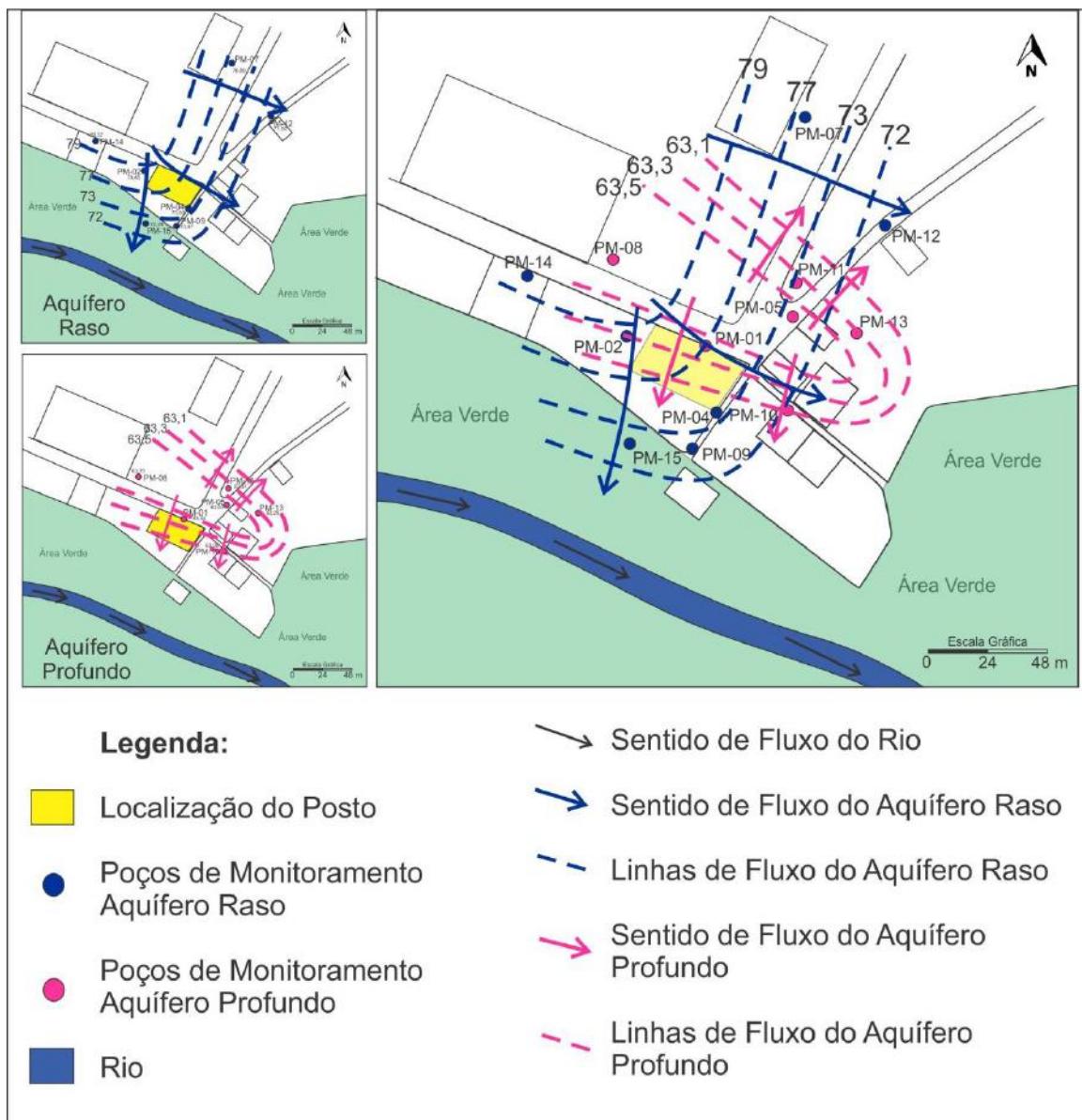


**Figura 23 - Esquemas das camadas aquíferas na área de estudo (A – sem ação de falhas B – com ação de falhas)**

Cada uma das camadas aquíferas delimitadas potenciometricamente apresenta uma direção principal de fluxo de água subterrânea distinta, considerando o nível

freático até cerca de 35 m de profundidade (profundidade máxima dos poços de monitoramento e sondagens na área) (Figura 24).

É importante ressaltar que os dados disponíveis até o momento não fornecem subsídios suficientes para delimitar com precisão as fronteiras do aquífero, devido à possível presença de paleocanais, descontinuidades (falhas) e variações faciológicas.

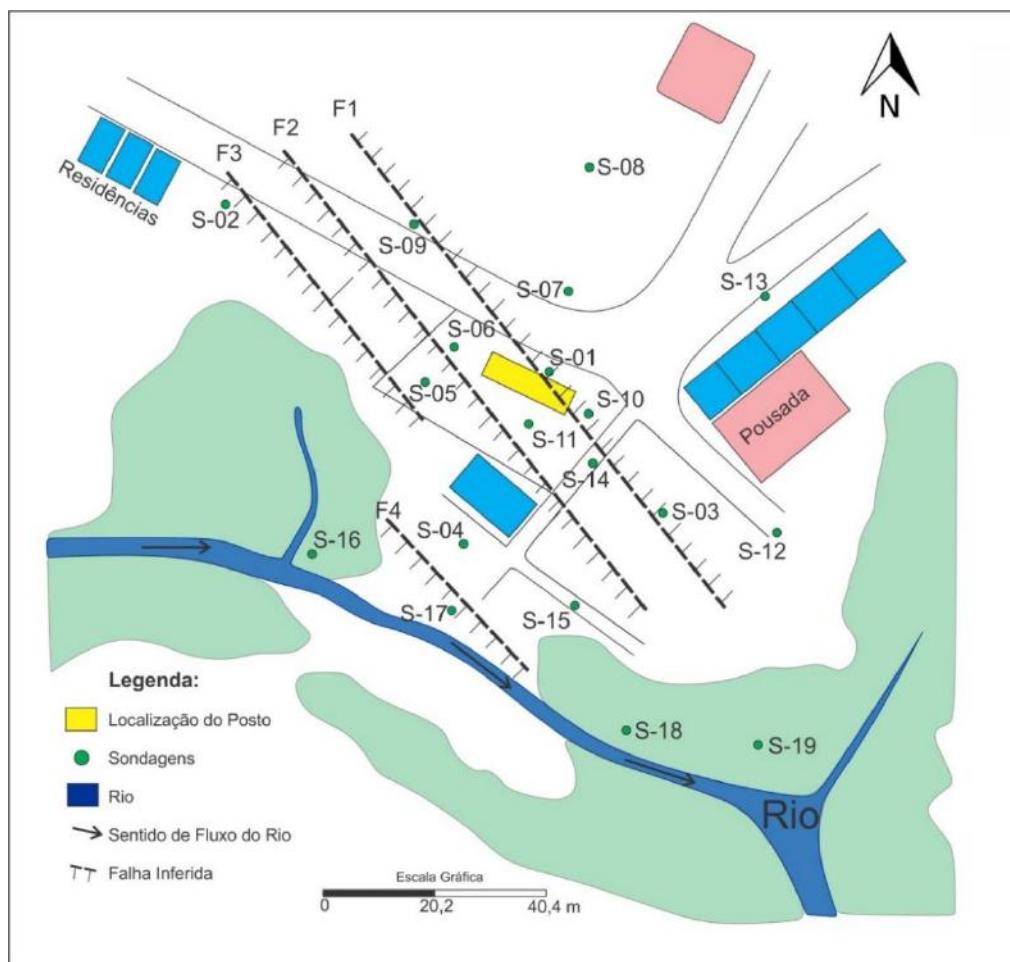


**Figura 24 - Redes de fluxo das camadas aquíferas rasa e profunda limitadas na área de estudo**

#### 5.4. Modelo Conceitual Hidrogeológico

Um modelo conceitual hidrogeológico é a representação escrita ou gráfica de um sistema aquífero, e através dele é possível representar de forma clara as unidades e o fluxo do sistema, determinar o comportamento de contaminantes a partir das fontes e prever seu comportamento sob determinadas situações de interesse.

A área de estudo é constituída pelas rochas do Gp. Barreiras, caracterizadas pela alternância de sedimentos arenosos com granulometria variando entre grossa a fina e sedimentos areno-argilosos, com intercalações de sedimentos finos sob a forma de camadas e lentes de argila.



**Figura 25 - Mapa representando as estruturas inferidas na área de estudo com base nos dados analisados.**

Há evidências da presença de falhas normais de direção aproximadamente NW-SE na área de estudo (Figura 25) que podem exercer papel determinante no transporte e dispersão dos contaminantes presentes.

A área de estudo é caracterizada pela presença de um aquífero multicamadas, com duas direções de fluxo principais indicadas pela potociometria (Figura 25), que podem estar associadas à presença de dois níveis aquíferos distintos. A profundidade do nível de água dos poços de monitoramento, entre 2011 e 2014, sofreu variações entre 0,87 m (PM-11) e 28,86 m (PM-06), e em dezembro de 2014 a profundidade do NA apresentou valores máximos no PM-14 a 16,95 m e mínimo no PM-11 a 34,78 m.

Nas visitas de campo realizadas em 2014 pela equipe do projeto, bem como nas visitas anteriores, ficou evidente a presença de fase livre de hidrocarbonetos derivados de petróleo no PM-01 (Figura 26).

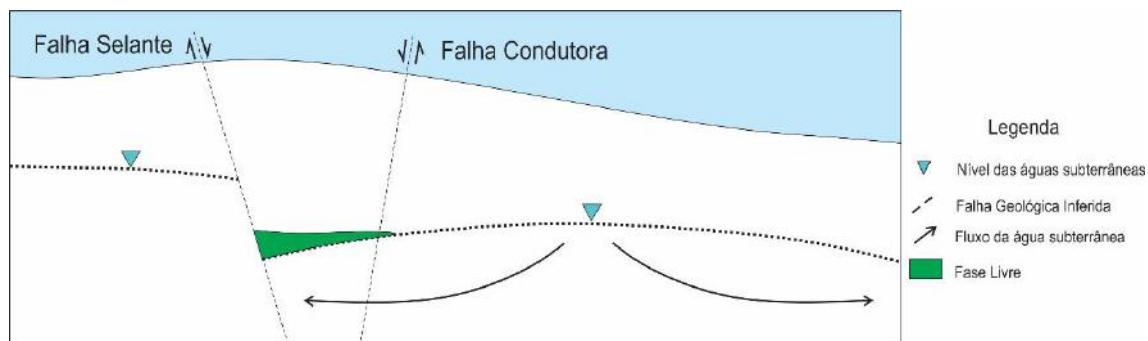


**Figura 26 - Fase Livre de Hidrocarbonetos de Petróleo presente no PM-01 (Dezembro/2014).**

A fonte de contaminação primária provavelmente está relacionada aos processos operacionais do posto (reabastecimento dos tanques, desperdício relacionado ao abastecimento de veículos, entre outros), visto que foram realizados testes de

estanqueidade, bem como a troca dos tanques subterrâneos utilizados no armazenamento destes hidrocarbonetos e, ainda assim, a fase livre permanece presente no local.

A presença de fase livre está sempre limitada ao PM-01 em uma profundidade de aproximadamente 31,5 m, não tendo sido evidenciada em nenhum outro poço na área de estudo, portanto é possível sugerir que a fase livre esteja sujeita a algum tipo de agente de controle que limite a sua dispersão e a mantenha localizada pontualmente (Figura 27).



**Figura 27 - Esquema de dispersão da Fase Livre.**

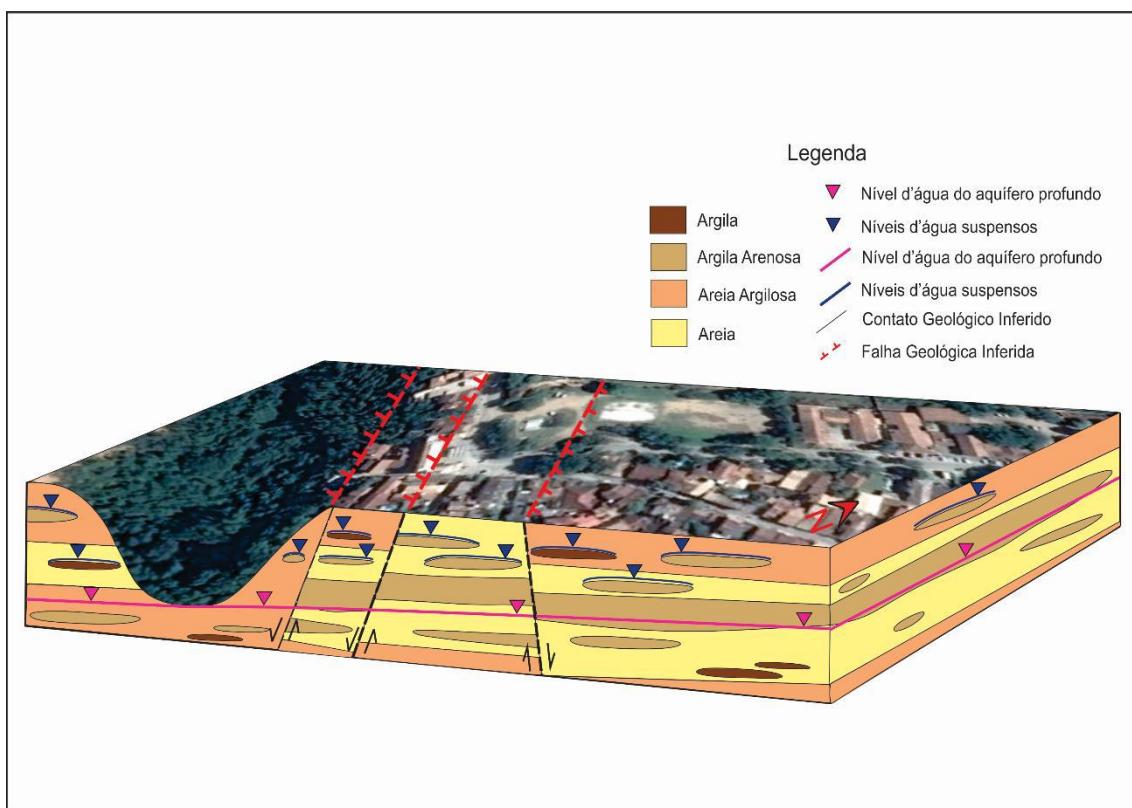
Suspeita-se de que a fase dissolvida da contaminação já tenha alcançado maior dispersão, devido ao forte odor de combustível e o próprio aspecto turvo da água em alguns poços de monitoramento durante as campanhas de campo.

Com base nos perfis litológicos de sondagens e poços de monitoramento elaborados a partir dos dados das empresas de consultoria ambiental que atuaram na área de estudo em 2005, 2010 e 2012 e do monitoramento de água subterrânea realizado pela empresa concessionária (2013/14), foi possível elaborar um modelo conceitual da área de estudo (Figura 28).

Este modelo reuniu informações existentes na bibliografia e dados obtidos nas campanhas de campo para representar, na forma simplificada de um bloco diagrama, o sistema aquífero da área de estudo.

A área é composta essencialmente por camadas de areia intercaladas com camadas areno-argilosas e lentes de argila de espessura variada que formam extensos tabuleiros.

A hidrogeologia da área consiste em um aquífero multicamadas, constituído por uma camada mais rasa mais instável, composta por níveis d'água suspensos e uma camada mais profunda, mais estável. Ambas as camadas afetadas por falhas normais, na direção NW-SW que podem afetar o fluxo de água subterrânea e contaminantes, de modo a servir como barreira ou como condutores dos mesmos.



**Figura 28 - Modelo conceitual simplificado da área de estudo.**

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de estudo está inserida no Gp. Barreiras, sendo representada por camadas arenosas a areno-argilosas intercaladas a sedimentos finos sob a forma de camadas ou lentes argilosas.

Através da compilação dos dados obtidos foi possível elaborar algumas seções geológicas visando organizar e melhorar o entendimento das informações obtidas. Estas seções foram elaboradas a partir da interpretação de dados disponíveis na bibliografia, não tendo sido obtidos diretamente pela autora do presente estudo. Observa-se também que a dificuldade na elaboração de seções geológicas e de um modelo conceitual na área se deve principalmente às variações faciológicas, baixa qualidade na descrição dos dados, distribuição esparsa dos poços, que gera ausência de continuidade das informações, dificultando, dessa forma, o entendimento geológico e conferindo um certo grau de complexidade à área.

A interpretação dos dados disponíveis aliada ao padrão geológico característico da região sugere a presença de estruturas (falhas e fraturas) que podem influenciar de forma direta o fluxo de água subterrânea na área e, portanto, o fluxo de contaminantes.

O sistema aquífero caracterizado na área de estudo é do tipo multicamadas, com duas direções de fluxo principais segundo os dados potenciométricos, considerando a profundidade de até aproximadamente 35 m (profundidade máxima atingida pelos poços de monitoramento e sondagens disponíveis). É possível perceber uma grande variabilidade na carga hidráulica da camada aquífera rasa, sugerindo a presença de diversos níveis suspensos, enquanto a camada aquífera mais profunda é mais estável. É importante ressaltar que os dados disponíveis não fornecem informação suficiente para delimitar aquíferos com precisão.

Através da comparação entre os dados da precipitação pluviométrica e a carga hidráulica dos poços, para avaliação de causa-efeito, foi possível perceber a influência da recarga pluvial nas camadas aquíferas delimitadas anteriormente, de forma que o PM-01, representando o nível d'água mais profundo, apresenta uma resposta bastante lenta e pouco perceptível à precipitação, enquanto o PM-02, representando um nível d'água mais raso apresenta resposta rápida e bastante expressiva, da ordem de 10 dias, às variações no nível d'água provocadas por eventos chuvosos.

Durante as visitas de campo foi constatada a presença de fase livre de hidrocarbonetos na área de estudo com espessura de aproximadamente 8 cm no poço de monitoramento PM-01, o que é compatível com os dados disponíveis na bibliografia utilizada.

A presença de fase livre no PM-01 e ausência da mesma no PM-02 sugere uma contaminação do aquífero profundo, que pode estar sendo ocasionada por diversos fatores, entre eles as diferentes áreas de recarga para os dois aquíferos ou até mesmo um problema geológico/estratigráfico/estrutural na área de estudo. Aparentemente, há um *by-pass* entre o vazamento no tanque ou linhas de abastecimento do posto de serviço e o aquífero profundo, já que praticamente não se observa fase livre na camada aquífera mais rasa.

O modelo conceitual da área deve ser aprofundado e, para isso, recomenda-se a utilização de outros métodos de investigação, como: aquisição de dados geofísicos (método de eletrorresistividade ou sísmica rasa) visando a delimitação (extensões e continuidades) dos corpos, bem como a possível presença de estruturas que interfiram na dinâmica local, levantamento topográfico para melhor conhecimento do terreno, análises granulométricas para delimitar melhor as camadas e elucidar questões sobre como a diferença de porosidade e permeabilidade pode afetar na delimitação dos

aquíferos na área, instalações de poços multiníveis para o entendimento do comportamento hidrogeológico, além de análises químicas no solo e nas águas subterrâneas para a delimitação da pluma de contaminação.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- BEVEN, K. **Towards a coherent philosophy for modelling the environment.** *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* 458 (2026): 2465–2484 DOI: 10.1098/rspa.2002.0986. 2002.
- BONFIM, L. F. C.; Lopes, H. B. V. **Hidrogeologia da região dos municípios de Porto Seguro e Santa Cruz de Cabrália, Bahia.** IV Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste. Recife, p. 405-416, 2001.
- CPRM - **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações** 2º Edição, p. 382-387, 2000.
- EGER, G. Z. S. **Formulação de Modelos Conceituais Hidrogeológicos em áreas contaminadas:** estudo de caso do Centro Tecnológico de Resíduos (CENTRES), Queimados-RJ. Dissertação de Mestrado. UFRJ, 2015. 91 p.
- FERREIRA, S. M.; DE OLIVEIRA, E.; DUARTE, U. **Comportamento da Gasolina com Etanol (E-20) e da Gasolina Pura Após a Simulação de um Vazamento em Colunas de Laboratório.** Revista do Instituto de Geociências – USP, v. 4, n. 2, p. 91-102, 2004.
- FERNANDES, R. L.; FERREIRA, J.P. **Estudos dos efeitos da remediação eletrocinética em um solo contaminado por hidrocarbonetos.** Projeto de graduação. Rio de Janeiro. UFRJ, 2010. 113 p.
- FETTER, C. W. *Contaminant Hydrology*. New York, NY, Macmillan Publishing Co. 1993. 458 p.
- FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA JOSÉ BONIFÁCIO - UFRJ. **Modelo Conceitual Atualizado de Posto de Serviços.** Relatório. Rio de Janeiro, 2013. 55 p.
- GALANTE, G. C. S. **Plumas de contaminação por hidrocarbonetos em diferentes cenários hidrogeológicos paulistas.** Dissertação de mestrado. São Paulo. USP, 2008. 130 p.
- GUIMARÃES, L. B. **Identificação da presença de combustíveis em subsuperfície através de técnicas de biologia molecular.** Dissertação de Mestrado. Santa Catarina. 2011. 120 p.
- GÜNTHER, W. M. R. **Áreas contaminadas no contexto da gestão urbana.** São Paulo em perspectiva, Vol.20, n. 2, p. 105-117, 2006.
- MARQUES, S. G. **Metodologia geofísica para contaminação por hidrocarbonetos – Estudo de caso em posto de combustíveis.** Dissertação de Mestrado. São Paulo. USP, 2007. 112 p.
- MINDRISZ, A. C. **Avaliação da contaminação da água subterrânea de poços tubulares, por combustíveis fósseis no município de Santo André, São Paulo:** uma

contribuição à gestão ambiental. Dissertação de Doutorado. São Paulo. USP, 2006. 155 p.

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Projeto Porto Seguro – Santa Cruz de Cabrália.** Programa de informações para gestão territorial – GATE. Salvador, 1999.

**MONTEIRO, A. B.; COSTA, W. D.; FILHO, M. L.; BARBOSA, D. L. Hidrogeologia e gestão do aquífero Barreiras nos bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco.** XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, 2002. 11 p.

**PINTO, E. M. Principais dificuldades de gerenciamento de resíduos industriais no Estado do Rio de Janeiro:** o caso CENTRES – Centro Tecnológico de Resíduos, localizado no município de Queimados. Dissertação de Mestrado. Niterói. UFF, 2001. 137 p.

**ROJAS, R.; KAHUNDE, S.; PEETERS, L.; BATELAAN, O.; FEYEN, L.; DASSARGUES, A.** **Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modelling.** Journal *Hydrology* 394 (3–4): p. 416–435. 2010.

**SAMPAIO, M. C. Análise Estratigráfica e qualidade das águas subterrâneas do Grupo Barreiras na região de Porto Seguro.** Projeto de Graduação. Bahia. UFBA, 2011. 55 p.

**TIBURTIUS, E. R. L.; ZAMORA-PERALTA, P.; EMMEL, A.; LEAL, E. S. Degradação de BTXS via processos oxidativos avançados.** Quim. Nova, Vol. 28, No. 1, p. 61–64, 2005.

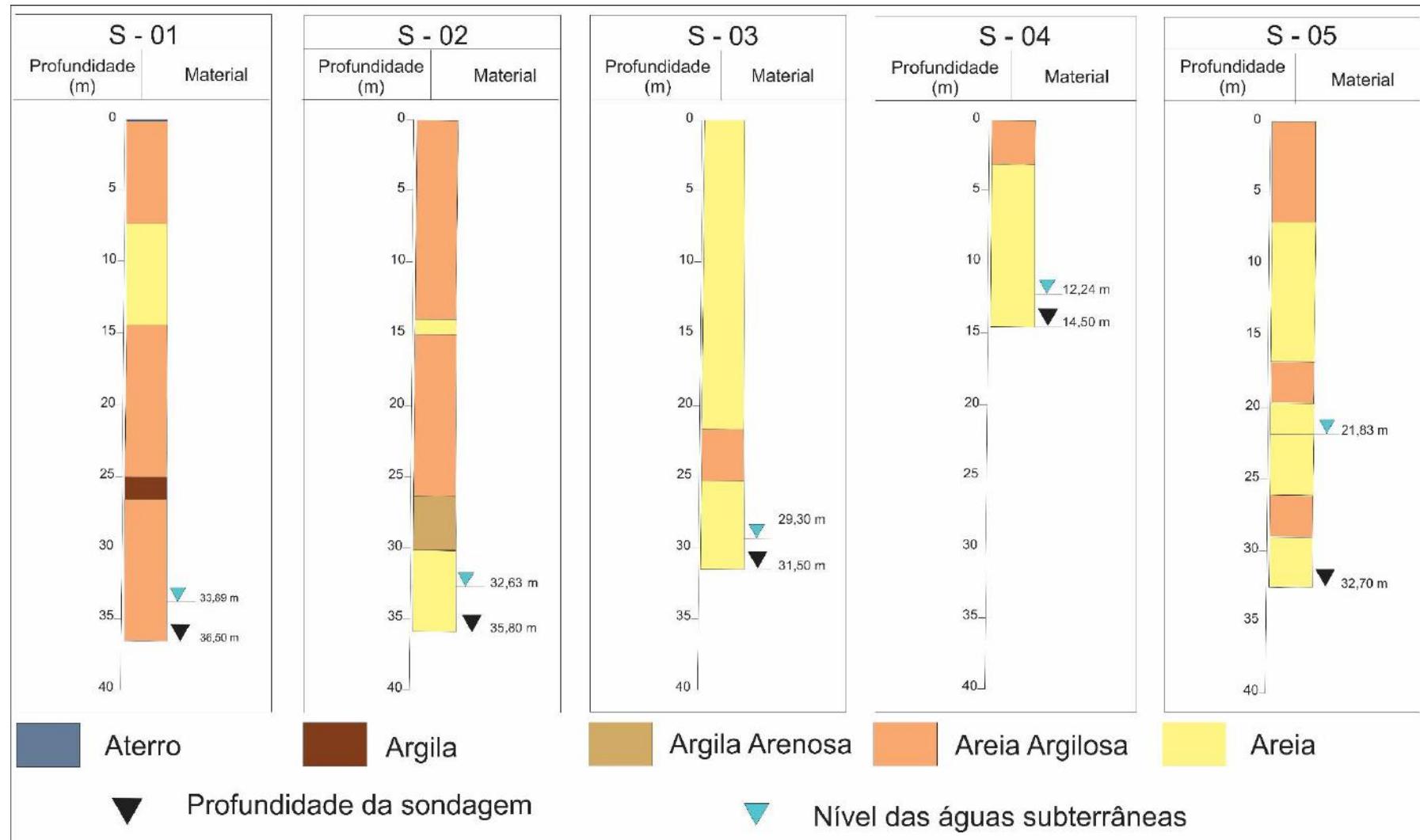
**TROLDBORG, L.; REFSGAARD, J.C.; JENSEN, K.H.; ENGESGAARD, P.** **The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in a multi-aquifer system.** *Hydrogeology Journal* 15(5): 843–860. 2007.

#### Sítios da Web:

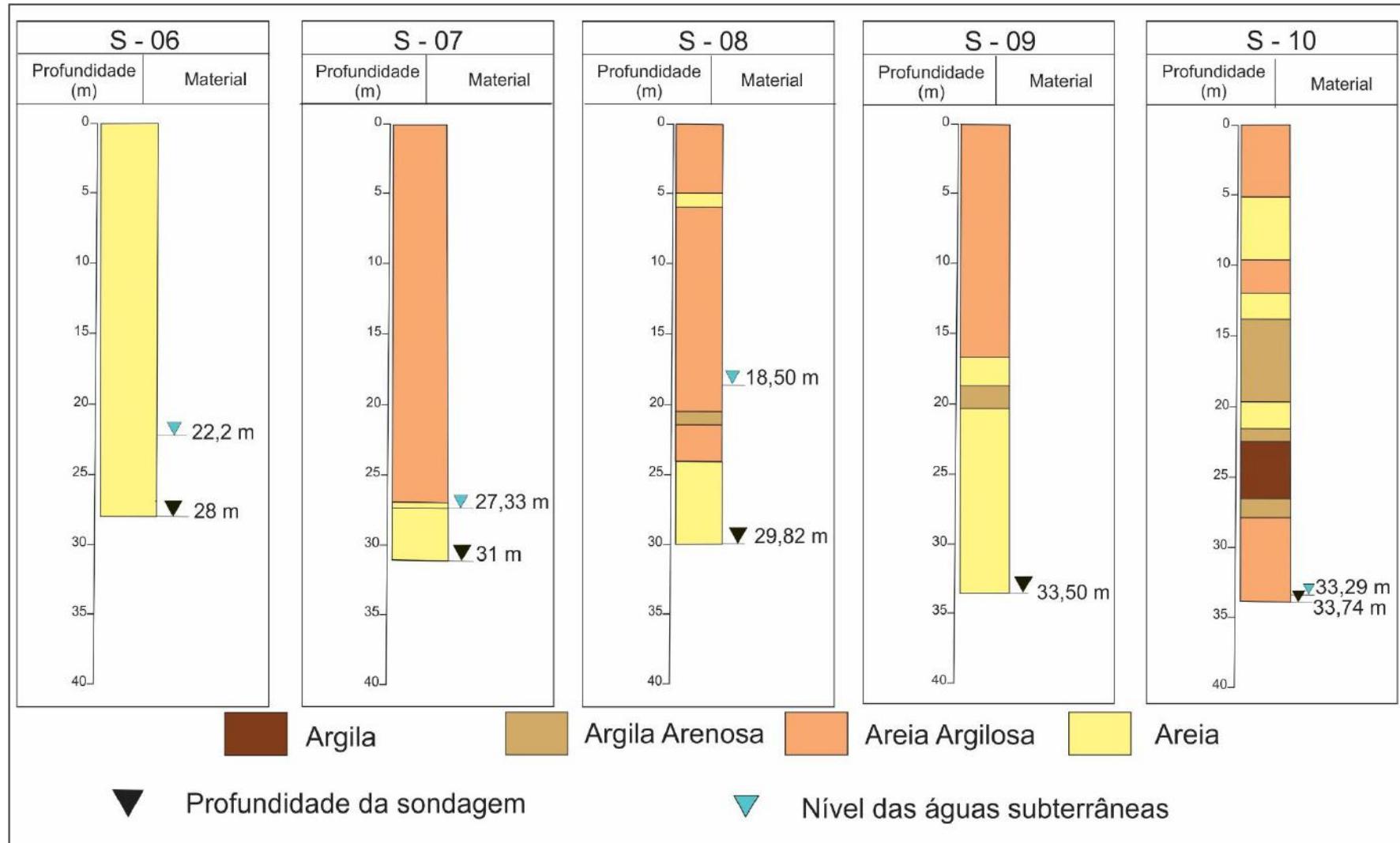
**INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> (acessado em 25/08/2015).

**MMA – Ministério do Meio Ambiente.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas> (acessado em 10/09/2015).

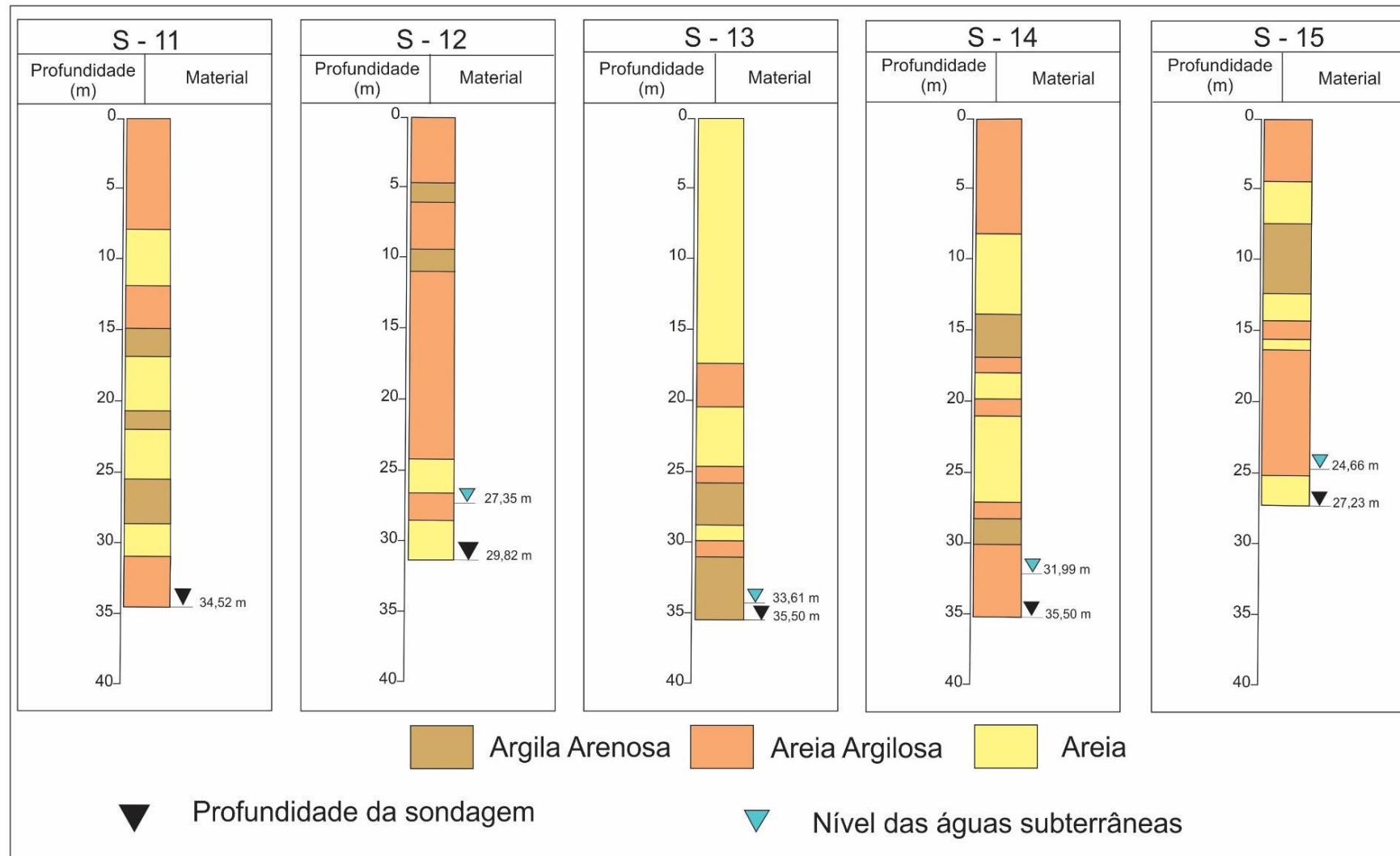
# **ANEXO I**



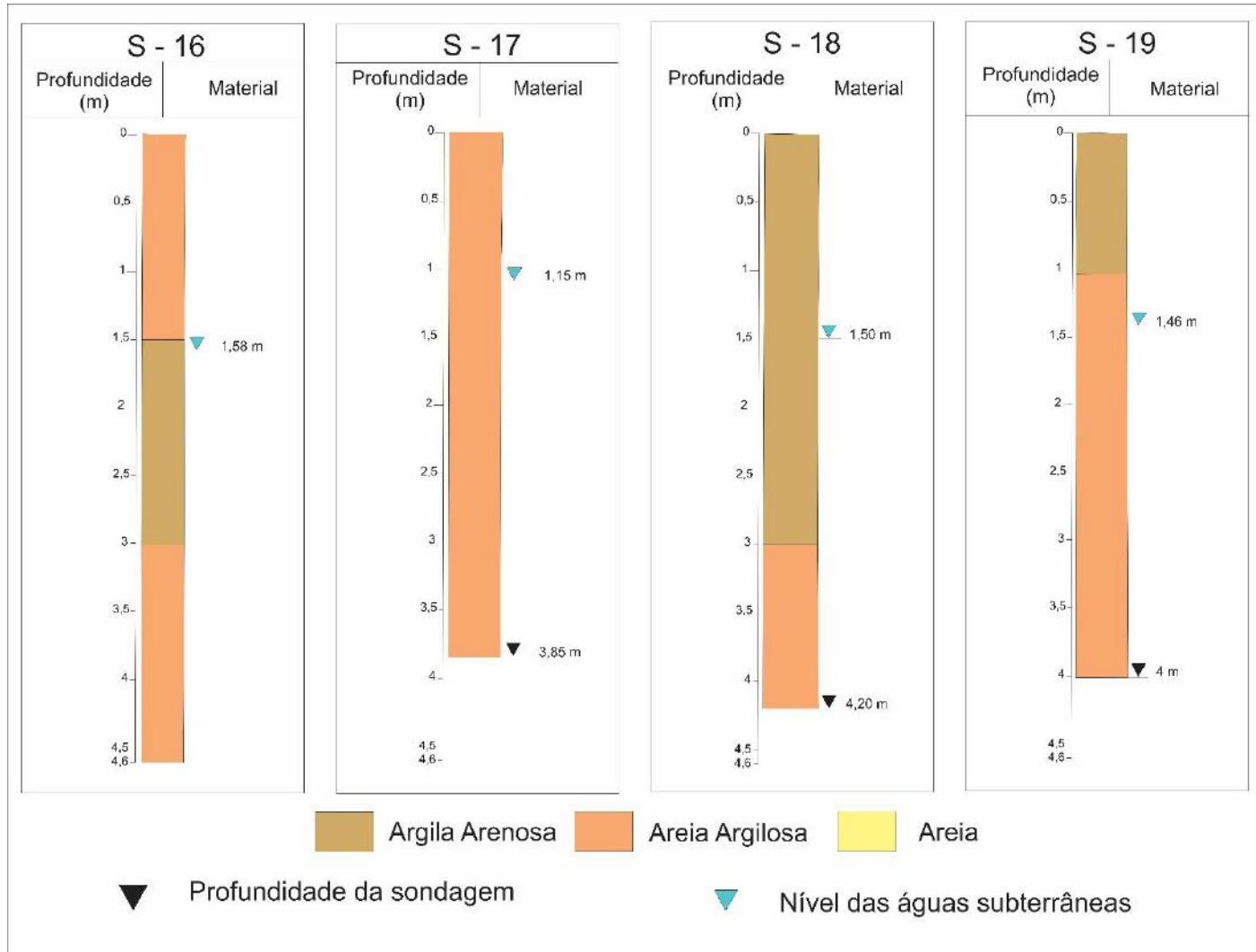
Perfis de sondagem (S-01 a S-05)



Perfis de sondagem (S-06 a S-10)



Perfis de sondagem (S-11 a S-15)



Perfis de sondagem (S-16 a S-19)