

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

Ana Cláudia Schneider

**ESTUDO EM TEMPO REAL DA MIGRAÇÃO DE ETANOL NA  
ZONA VADOSA EM EXPERIMENTO DE CAMPO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil

Florianópolis  
2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

S358e Schneider, Ana Cláudia

Estudo em tempo real da migração de etanol na zona  
vadosa em experimento de campo [dissertação] / Ana Cláudia  
Schneider ; orientador, Henry Xavier Corseuil. -  
Florianópolis, SC, 2012.

115 p.: il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia ambiental. 2. Álcool. 3. Monitoramento  
ambiental. I. Corseuil, Henry Xavier. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental. III. Título.

CDU 628.4

Ana Cláudia Schneider

**ESTUDO EM TEMPO REAL DA MIGRAÇÃO DE ETANOL NA  
ZONA VADOSA EM EXPERIMENTO DE CAMPO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Ambiental” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Florianópolis, 02 de abril de 2012.

\_\_\_\_\_  
Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.  
Coordenador do Curso

\_\_\_\_\_  
Prof. Henry Xavier Corseuil, Dr.  
Orientador

**Banca Examinadora:**

\_\_\_\_\_  
Prof. Martinus Theodorus van Genuchten, Dr.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

\_\_\_\_\_  
Prof., Masato Kobiyama, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

\_\_\_\_\_  
Prof., Sebastião Roberto Soares, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



A Deus e a minha família.



## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado graças ao apoio de diversas pessoas e instituições. Gostaria de agradecer:

Ao meu orientador professor Dr. Henry Xavier Corseuil, pela orientação e paciência para a realização deste trabalho, como também pelos conselhos e oportunidades a mim dados nestes 5 anos de família REMAS.

A todos os membros que compõe e compuseram a equipe REMAS, pois sem eles este trabalho não seria possível. Gostaria de agradecer em especial à Dra. Marilda Fernandes, responsável pelo laboratório de análises químicas, e à Dra. Cristina Cardoso Nunes, por estar sempre presente e aberta a discussões.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado, e à Petrobras, pelo financiamento do projeto “Implantação e desenvolvimento do modelo SCBR e monitoramento das áreas experimentais da Ressacada”.

Gostaria de agradecer a meu pai, pelo apoio em todas as decisões tomadas por mim, pelos conselhos e por estar presente em toda esta jornada. Gostaria de agradecer também a meus irmãos, suas esposas e filhos e em especial à minha cunhada Ana Carina, por me ajudar tanto nestes anos.

A meus professores, em especial ao professor Dr. Daniel José da Silva, por fazer me gostar ainda mais de engenharia e por ensinar a dar um passo para trás para olhar as coisas de outra forma.

A Deus, por estar sempre presente em todos os passos desta grande jornada.





*“A man should look for what is, and not for what he thinks should be.”*

(Albert Einstein)



## RESUMO

Em casos de derramamentos com misturas de gasolina e etanol, a presença de etanol pode alterar o comportamento de migração dos compostos na zona vadosa, dependendo da umidade do meio solo, características do solo e do volume de etanol e gasolina derramados. Para avaliar a migração de misturas com grandes proporções de etanol em condições reais, foi realizado um experimento de campo com monitoramento em tempo real da liberação controlada de uma mistura contendo 170 L de etanol e 30 L de gasolina na zona não saturada. As concentrações de etanol na zona vadosa foram obtidas com reflectômetros no domínio do tempo. Por ser um método não destrutivo e com resultados em tempo real, foi possível avaliar a influência das condições de campo na migração do combustível. O monitoramento da zona vadosa foi realizado por um período de 30 dias, dos quais nos 12 primeiros dias o nível do lençol manteve-se sem variação significativa. Observou-se que, no primeiro dia após a liberação do combustível, o etanol migrou por 1,5 m da zona vadosa, chegando à franja capilar. No período em que não houve variação do nível do lençol, parte do etanol permaneceu retido na zona vadosa. Imediatamente após uma elevação de 0,8 m do nível do lençol, as concentrações de etanol diminuíram significativamente, indicando a ocorrência de diluição do etanol remanescente e migração para a zona saturada. Este estudo indicou que a migração de etanol está significativamente ligada ao volume de etanol derramado e à umidade do solo. Com base nestas informações recomenda-se que a ocorrência de etanol juntamente com a variação do nível do lençol sejam consideradas nas investigações ambientais de casos de derramamento destas misturas em regiões com elevada precipitação, como é o caso do Brasil.

**Palavras-chave:** Etanol, zona vadosa, monitoramento em tempo real.



## ABSTRACT

In case of ethanol and gasoline blends, ethanol could change the migration behavior of these compounds in the unsaturated zone, depending on soil moisture and the volume spilled. To evaluate the migration behavior of high proportion ethanol blends was performed a field experiment with a controlled release of 170 L of ethanol and 30 L of gasoline in the unsaturated zone, with real time monitoring. Ethanol concentrations were determined with time domain reflectometry, to assess the influence of a field condition in fuel migration, with a real time non-destructive method. The unsaturated zone was monitored for 30 days, in which the water table was static in the first 12 days. This study shows that, at the first day after the release, ethanol migrated to the capillary fringe and reached a 30% fraction. Ethanol was retained in the unsaturated zone without water table fluctuations. Immediately after a 0.8 m water table rise, ethanol concentrations decreased significantly indicating dilution and migration into the saturated zone. This study indicates that ethanol migration in the unsaturated zone is related to the volume released and to the soil moisture, and its transport to the saturated zone should be significant in regions with high annual precipitation and water table oscillations, such as in Brazil.

**Keywords:** Ethanol, unsaturated zone, real time monitoring.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Representação esquemática das zonas do solo, em relação à saturação de água.....   | 8  |
| Figura 2 - Modelo conceitual do transporte dos contaminantes na subsuperfície .....   | 12 |
| Figura 3 - Diagrama ternário para o sistema gasolina-etanol-água, a 21°C .....  | 14 |
| Figura 4 - Esquema da sonda TDR modelo TRIME-EZ (Imko).....   | 20 |
| Figura 5 - Determinação da fração de etanol com o solo da área experimental .....   | 22 |
| Figura 6 - Localização da área experimental .....   | 24 |
| Figura 7 - Fonte da liberação de gasolina e etanol em campo .....   | 26 |
| Figura 8 - Esquema de instalação das sondas TDR em campo .....  | 26 |
| Figura 9 - Análise granulométrica do solo da área experimental - profundidade de 60 cm .....  | 28 |
| Figura 10 - Análise granulométrica do solo da área experimental - profundidade de 90 cm .....   | 28 |
| Figura 11 - Análise granulométrica do solo da área experimental - profundidade de 180 cm .....  | 29 |
| Figura 12 - Relação entre umidade volumétrica e constante dielétrica para o solo da área experimental .....                             | 30 |
| Figura 13 - Dados de temperatura e precipitação na área experimental.....   | 31 |
| Figura 14 - Variação do nível do lençol e precipitação na área experimental....   | 32 |
| Figura 15 - Variação da umidade volumétrica na área experimental .....  | 33 |
| Figura 16 - Relação entre constante dielétrica e fração volumétrica de etanol em saturação com solo da área experimental.....           | 34 |
| Figura 17 - Relação entre constante dielétrica e fração volumétrica de etanol em capacidade de campo com solo da área experimental..... | 36 |
| Figura 18 - Fração volumétrica de etanol no nível 0,6 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento .....         | 38 |
| Figura 19 - Fração volumétrica de etanol no nível 0,9 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento .....         | 38 |
| Figura 20 - Fração volumétrica de etanol no nível 1,2 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento .....         | 39 |
| Figura 21 - Fração volumétrica de etanol no nível 1,5 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento .....         | 39 |





## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da gasolina C .....  | 5  |
| Tabela 2 - Propriedades físico-químicas dos BTEX .....   | 6  |
| Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do etanol combustível.....   | 7  |
| Tabela 4 - Propriedades do solo coletado na área experimental .....  | 27 |
| Tabela 5 - Análise de variância da regressão polinomial para determinação da umidade volumétrica .....                             | 30 |
| Tabela 6 - Estimativa da altura da franja capilar ( $h$ ) a partir dos valores de $r$ ...  | 33 |
| Tabela 7 - Análise de variância da regressão linear para determinar a fração de etanol na zona saturada .....                      | 35 |
| Tabela 8 - Análise de variância da regressão linear para determinação da fração volumétrica de etanol em capacidade de campo ..... | 36 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |  |
|-----------|--|
| ANP       | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  |
| BTEX      | Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, o-Xileno, m-xileno e p-xileno |
| CETESB    | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental              |
| CIDASC    | Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola              |
| CONAMA    | Conselho Nacional do Meio Ambiente                           |
| EHC       | Etanol Hidratado Combustível                                 |
| EPA       | United States Environmental Protection Agency                |
| FAO       | Food and Agriculture Organization of the United Nations      |
| LNAPL     | Light Non-Aqueous Phase Liquids                              |
| MTBE      | metil-tert-butil-éter  |
| Petrobras | Petróleo Brasileiro S/A                                      |
| REMAS     | Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas              |
| SCBR      | Solução Corretiva Baseada no Risco                           |
| TDR       | Time Domain Reflectometry                                    |
| USDE      | United States Department of Energy                           |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |                                   |
|-------------------|-----------------------------------|
| $h$               | Altura da franja capilar          |
| $\sigma$          | Tensão superficial da água        |
| $\rho$            | Massa específica da água          |
| $g$               | Aceleração da gravidade           |
| $r$               | Raio                              |
| $d_n$             | Tamanho representativo do poro    |
| $d_{50}$          | Diâmetro médio da partícula       |
| $n$               | Porosidade                        |
| $V_v$             | Volume de vazios                  |
| $V_t$             | Volume total                      |
| $c$               | Velocidade da onda no meio        |
| $c_0$             | Velocidade da onda no vácuo       |
| $\varepsilon$     | Constante dielétrica              |
| $\mu$             | Permeabilidade Magnética          |
| $L$               | Comprimento da haste              |
| $t$               | Tempo de trânsito                 |
| $\theta$          | Umidade volumétrica               |
| $\theta_g$        | Umidade gravimétrica              |
| $m_{\text{água}}$ | Massa de água                     |
| $m_{\text{solo}}$ | Massa de solo                     |
| $\rho_s$          | Densidade do solo                 |
| $\rho_a$          | Densidade da água                 |
| $x$               | Variável regressora               |
| $y$               | Variável dependente               |
| $K_s$             | Condutividade hidráulica saturada |



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>1</b>  |
| 1.1 OBJETIVOS.....  | 4         |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                | <b>5</b>  |
| 2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES.....                           | 5         |
| 2.1.1 Gasolina comercial brasileira.....                            | 5         |
| 2.1.2 Etanol combustível.....                                       | 6         |
| 2.2 ZONA VADOSA.....  | 7         |
| 2.2.1 Fase sólida.....  | 8         |
| 2.2.2 Fase líquida.....   | 9         |
| 2.2.3 Fase gasosa.....  | 9         |
| 2.2.4 Propriedades da zona vadosa.....                              | 9         |
| 2.3 TRANSPORTE DOS CONTAMINANTES NA SUBSUPERFÍCIE.....              | 11        |
| 2.3.1 Gasolina.....   | 11        |
| 2.3.2 A influência do etanol.....                                   | 13        |
| 2.4 MONITORAMENTO EM TEMPO REAL.....                                | 15        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                  | <b>19</b> |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....                                     | 19        |
| 3.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA.....                        | 19        |
| 3.3 SONDAS TDR.....   | 20        |
| 3.4 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO.....                                | 21        |
| 3.4.1 Calibração das sondas TDR para determinação da saturação..... | 21        |
| 3.4.1 Determinação da fração de etanol em tempo real.....           | 21        |
| 3.4.2 Verificação estatística dos dados.....                        | 23        |
| 3.5 EXPERIMENTO EM CAMPO.....                                       | 24        |
| 3.5.1 Caracterização da área experimental.....                      | 25        |
| 3.5.2 Fonte de contaminação.....                                    | 25        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                               | <b>27</b> |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....                                     | 27        |
| 4.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA.....                        | 29        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....  | 31        |
| 4.4 DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DE ETANOL EM TEMPO REAL.....                                 | 34        |
| 4.4.1 Zona saturada .....   | 34        |
| 4.4.2 Zona vadosa .....   | 35        |
| 4.5 MIGRAÇÃO DE ETANOL NA ZONA VADOSA EM EXPERIMENTO<br>DE CAMPO .....                  | 37        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>6 RECOMENDAÇÕES.....</b>   | <b>45</b> |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>ANEXO 1 – ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO .....</b>                                 | <b>55</b> |
| <b>ANEXO 2 – ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO .....</b>                                 | <b>67</b> |
| <b>ANEXO 3 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE<br/>HIDRÁULICA DA ÁREA EXPERIMENTAL.....</b> | <b>73</b> |
| <b>ANEXO 4 – ESTIMATIVA DA ALTURA DA FRANJA CAPILAR<br/>.....</b>                       | <b>77</b> |
| <b>ANEXO 5 – MONITORAMENTO DAS FRAÇÕES DE ETANOL<br/>EM CAMPO.....</b>                  | <b>81</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

A adição de um oxigenante à gasolina é uma prática efetuada visando aumentar sua octanagem. Recentemente, o oxigenante também tem sido utilizado com o objetivo estratégico de reduzir as emissões de poluentes, como o monóxido de carbono. Um dos primeiros oxigenantes utilizados foi o chumbo tetraetila, grande fonte de poluição de aquíferos por chumbo (GOMEZ, 1998), o qual foi substituído pelo etanol, no Brasil, a partir da criação do programa Proálcool (ANP, 2010). Na América do Norte, o chumbo tetraetila foi substituído pelo MTBE (metil-tert-butil-éter). Apesar de eliminar o problema causado pela contaminação de solos, águas subterrâneas e superficiais por chumbo, o MTBE pode causar efeitos adversos à saúde humana e passou a ser considerado um contaminante (EPA, 1997). O governo dos Estados Unidos aprovou uma lei (EUA, 2004) que bane o MTBE em todo seu território até dezembro de 2014. Com isso, há uma crescente procura por um oxigenante que não cause prejuízo à saúde humana em caso de acidentes.

A partir de 1974, com a criação do programa Proálcool, o Brasil tem utilizado o etanol como combustível e como oxigenante da gasolina. O volume de etanol adicionado à gasolina pode variar, dependendo do volume de produção do combustível. De acordo com a ANP (2010), o etanol começou a ser adicionado à gasolina brasileira com um volume de 4,5%, em 1977 e, a partir de 1990, toda gasolina comercial possui volume entre 20 e 25% de etanol anidro. No ano de 2010, o Brasil produziu cerca de 28 milhões de m<sup>3</sup> de etanol, mantendo o crescimento de produção iniciado em 2001 (ANP, 2011a). Devido à experiência do Brasil no uso do etanol como oxigenante da gasolina, diversos países passaram a adotar a mesma prática. Em 2010, o Brasil exportou 1,9 milhões de m<sup>3</sup> de etanol anidro e hidratado, tendo como principal mercado consumidor o continente asiático (40% das exportações), seguido da Europa (25%) e América do Norte (18%) (ANP, 2011a). Nos Estados Unidos, a adição de etanol à gasolina como oxigenante é uma prática comum, sendo comercializado com os volumes de 10% (E10), 15% (E15), 20% (E20) e 30% (E30) e, como combustível, chega a 85% (E85), sendo armazenado e transportado na forma E10 ou E85 (USDE, 2011).

O transporte de combustíveis é efetuado através de dutos de distribuição, caminhões, trens, além do transporte marítimo, sendo armazenado em tanques superficiais (como em refinarias) e subterrâneos (como em postos de gasolina), o que gera uma grande área de possível

contaminação em casos de acidentes. Portanto, é fundamental entender o impacto que estas misturas têm no ambiente, pois podem contaminar as águas subterrâneas utilizadas no abastecimento para consumo humano. De acordo com o relatório da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2011), 25% dos solos do planeta estão degradados e, devido ao crescimento da população mundial e à crescente demanda de água, o bombeamento de águas subterrâneas tem se intensificado, os aquíferos estão se tornando poluídos e salinizados, nas áreas costeiras. Em dezembro de 2010 havia no estado de São Paulo 3.675 áreas contaminadas, das quais 79% têm como fonte os postos de combustíveis (CETESB, 2010). O tanque de armazenamento de combustíveis possui uma vida útil e a CETESB recomenda que seja trocado com no máximo 15 anos de utilização. Das áreas mapeadas pela CETESB no ano de 2010, apenas 4% das contaminações por postos de combustível foram reabilitadas, em que os combustíveis líquidos são o maior tipo de contaminante encontrado (CETESB, 2010).

Devido à porcentagem de etanol na gasolina comercial brasileira e à grande utilização de etanol combustível, a chance de que ocorram diferentes proporções de gasolina e etanol na subsuperfície, em caso de acidentes ou vazamentos, é elevada. Em casos de acidentes na zona vadosa, a gasolina tende a migrar e se acumular na interface do nível do lençol, devido à sua densidade e baixa solubilidade dos compostos em água (PARKER, 1989; PANTAZIDOU e SITAR, 1993). Os compostos tóxicos presentes na gasolina, conhecidos como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno, o-xileno, m-xileno e p-xileno), irão se solubilizar gradativamente na água subterrânea. Em presença de etanol, este comportamento pode se alterar, pois o etanol é solúvel em gasolina e em água em qualquer proporção, possui densidade menor que a da água e diminui sua superfície de tensão, causando depressão da franja capilar (ANNABLE, JAWITZ e RAO, 1998; MCDOWELL, BUSCHECK e POWERS, 2003). Dependendo do volume liberado e da água disponível no solo, o etanol pode ficar retido na zona vadosa, particionando-se da gasolina e migrando para a água presente nos poros (MCDOWELL e POWERS, 2003; FREITAS e BARKER, 2011b). Se o etanol e a gasolina atingirem a zona saturada, o etanol poderá aumentar a concentração dos compostos BTEX na água subterrânea, comportamento conhecido como efeito cossolvência (HEERMANN e POWERS, 1998; CORSEUIL, KAIPPER e FERNANDES, 2004), além de dificultar sua atenuação natural, resultando em plumas de BTEX mais longas (CORSEUIL *et al.*, 1998; MACKAY *et al.*, 2006).

Devido à grande influência do etanol sobre a migração dos BTEX, tanto na zona vadosa quanto na zona saturada, observa-se a necessidade do estudo da migração do etanol na zona vadosa em condições reais, devido às alterações que ocorrem naturalmente em campo, como heterogeneidade do solo e precipitações. Determinar as frações de etanol em ambientes subsuperficiais é uma peça chave para avaliar a sua influência sobre os compostos BTEX. Em casos reais, a subsuperfície é considerada um meio dinâmico, em que pode ter suas condições alteradas rapidamente. Portanto, viu-se necessário utilizar um método de monitoramento em tempo real para que se pudesse acompanhar o comportamento do etanol desde o momento em que ocorre a liberação de uma mistura de gasolina e etanol até atingir a água subterrânea.

Este trabalho foi motivado pela crescente demanda de etanol, pela escassez de informações da migração de grandes volumes etanol em estudo de campo, em casos de acidentes na zona não saturada de regiões com temperaturas amenas e alta pluviosidade, como é o caso do Brasil e pela necessidade dessas informações para o gerenciamento de áreas contaminadas, de acordo com a resolução CONAMA nº 420 (2009). Para este estudo, foi adotada uma mistura com elevada proporção de etanol visando simular um caso de vazamento de tanque de armazenamento, em que a chance de se obter uma elevada proporção de etanol é grande, devido ao volume de etanol que é adicionado na gasolina comercial brasileira, à alta comercialização de etanol combustível e ao fato de que a mistura de gasolina e etanol é frequentemente armazenada na forma de E85 (mistura contendo 85% de etanol anidro e 15% de gasolina).

Este estudo faz parte de uma parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina e a Petrobras, que há mais de 10 anos desenvolve projetos de pesquisa com o objetivo de melhor entender os processos de migração e remediação dos contaminantes na água subterrânea, em casos de acidentes com combustíveis. Este trabalho tem foco no transporte de etanol na zona vadosa, mas é parte integrante de um projeto que visa o estudo do transporte de BTEX e etanol para a zona saturada, em que o transporte da gasolina foi abordado em uma dissertação de mestrado aprovada por este programa. Os dados deste trabalho foram obtidos em experimentos de laboratório, com experimentos em colunas em diversas proporções de gasolina e etanol, e campo, através da liberação controlada de uma mistura contendo 170 L de etanol e 30 L de gasolina (proporção conhecida comercialmente por E85), com monitoramento em tempo real da zona vadosa por um

período de 30 dias. O projeto terá continuidade com monitoramento dos contaminantes na zona saturada, como parte do projeto financiado pela Petrobras intitulado “Implantação e desenvolvimento do modelo SCBR e monitoramento das áreas experimentais da Ressacada”.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a migração de etanol para avaliar o comportamento deste combustível na zona vadosa do solo em experimento de campo controlado através de uma técnica de detecção em tempo real.

Os objetivos específicos foram:

- a) Adequar a metodologia de determinação da umidade volumétrica em tempo real para a detecção da fração de etanol em experimento de campo;
- b) Avaliar o particionamento do etanol em tempo real na zona vadosa em função da umidade do solo;
- c) Avaliar a influência das flutuações do nível do lençol freático no transporte de etanol na zona vadosa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES

#### 2.1.1 Gasolina comercial brasileira

A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos que variam de quatro a doze átomos de carbono, composta por alcanos, alcenos, cicloalcanos (ou naftenos) e aromáticos, com ponto de ebulição que variam entre 30°C e 220°C (PETROBRAS, 2011). Há também, em pequena quantidade, contaminantes com enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais. A gasolina comercializada no Brasil (gasolina C) possui entre 20% e 25% de etanol anidro, de acordo com a legislação vigente (ANP, 2011c). A Tabela 1 mostra as principais propriedades físico-químicas da gasolina C.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas da gasolina C

| Propriedade                                | Unidade             | Valor         |
|--|---------------------|---------------|
| Massa molar <sup>(a)</sup>                 | g.mol <sup>-1</sup> | 100 a 105     |
| Massa específica a 20°C <sup>(b)</sup>     | Kg.m <sup>-3</sup>  | 735,0 a 765,0 |
| Pressão de vapor a 37,8°C <sup>(b)</sup>   | kPa                 | 54,0 a 64,0   |
| Viscosidade a 29°C <sup>(a)</sup>          | cP                  | 0,54          |
| Constante dielétrica a 20°C <sup>(a)</sup> | -                   | 2,07          |




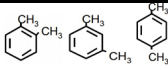
Fonte: (a) OLIVEIRA (2001), (b) ANP (2005).

Do ponto de vista ambiental, os principais contaminantes encontrados na gasolina são os hidrocarbonetos aromáticos, conhecidos como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e os isômeros orto, meta e para xileno), pois dentre os compostos que compõem a gasolina pura são os que possuem maior solubilidade em água, além de tóxicos e até carcinogênicos, como é o caso do benzeno (EPA, 1998). A Resolução CONAMA nº 396 (2008) lançou os valores máximos permitidos de parâmetros com maior probabilidade de ocorrência em águas subterrâneas, em que os valores máximos para consumo humano são 5 µg.L<sup>-1</sup> para o benzeno, 170 µg.L<sup>-1</sup> para o tolueno, 200 µg.L<sup>-1</sup> para o etilbenzeno e 300 µg.L<sup>-1</sup> para os xilenos totais.

O comportamento dos compostos BTEX no ambiente subterrâneo está diretamente ligado às suas propriedades físico-químicas. Os BTEX são compostos apolares e, conseqüentemente, hidrofóbicos (FERIS *et al.*, 2008). Entretanto, o benzeno é o composto que usualmente é o foco de atenção, pois possui significativamente maior solubilidade em água,

em relação aos demais compostos da gasolina, podendo ser encontrado em maior quantidade na fase dissolvida. A constante da lei de Henry mostra a tendência que um composto tem para se particionar ao ar; quanto maior o valor, maior a tendência de particionamento. A pressão de vapor é a pressão com a qual um líquido está em equilíbrio com sua fase vapor, ou seja, quanto maior a pressão de vapor, maior tendência à evaporação terá o líquido. A Tabela 2 mostra as propriedades físico-químicas dos compostos BTEX, que serão abordadas no transporte dos contaminantes.

Tabela 2 - Propriedades físico-químicas dos BTEX

| Propriedade  | Benzeno   | Tolueno   | Etilbenzeno   | Xilenos   |
|--|---|---|---|---|
| Fórmula estrutural   |  |  |  |  |
| Fórmula molecular  | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>   | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>   | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>  | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>  |
| Densidade relativa (20°C) (kg.m <sup>3</sup> )                     | 0,8765  | 0,8669  | 0,867   | 0,880* ; 0,8642* ; 0,8610*  |
| Viscosidade dinâmica (20°C) (cP)                                   | 0,6468  | 0,58  | 0,678   | 0,802; 0,608; 0,635   |
| Solubilidade em água (20°C) (mg.L <sup>-1</sup> )                  | 1780  | 515   | 152   | 170; 200* ; 198   |
| Pressão de vapor (20°C) (mm Hg)                                    | 76  | 22  | 7   | 7; 9; 9   |
| Constante de Henry (25°C) (atm.m <sup>3</sup> .mol <sup>-1</sup> ) | 5,46E-3   | 6,61E-3   | 7,9E-3  | 4,94E-3; 6,91E-3; 7,01E-3   |

Fonte: NEWELL *et al.* (1995).

### 2.1.2 Etanol combustível

No Brasil, o etanol anidro combustível é utilizado apenas para a composição da gasolina C, comercializada pelos postos de combustíveis. O etanol combustível, também chamado etanol hidratado combustível (EHC), deve possuir um volume máximo de água de 4,9% em sua composição (ANP, 2011b). Obtido através do processo fermentativo de

\* Propriedade determinada a 25°C.

açúcares, amido e celulose (GOMEZ *et al.*, 2008), é um composto orgânico polar solúvel em qualquer proporção tanto em gasolina quanto em água, devido à sua estrutura molecular. O etanol não é considerado um composto tóxico, portanto tem se mostrado uma ótima alternativa como combustível e oxigenante da gasolina, além de possuir baixa permanência no meio em caso de acidentes (LOVANH, HUNT e ALVAREZ, 2002). A Tabela 3 mostra as principais propriedades físico-químicas do etanol, as quais podem influenciar o seu comportamento de migração no meio ambiente subterrâneo.

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do etanol combustível

| <b>Propriedade</b>                    | <b>Unidade</b>          | <b>Valor</b>                     |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Fórmula molecular                     | -                       | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH |
| Massa molar                           | g.mol <sup>-1</sup>     | 46,07                            |
| Densidade relativa <sup>(a)</sup>     | g.mL <sup>-1</sup>      | 0,784                            |
| Constante de Henry <sup>(a)</sup>     | atm.mol.m <sup>-3</sup> | 5,4E-6                           |
| Pressão de vapor <sup>(b)</sup>       | mm Hg                   | 46                               |
| Viscosidade cinemática <sup>(b)</sup> | cP                      | 1,24                             |
| Constante dielétrica <sup>(b)</sup>   | -                       | 39,08                            |
| Solubilidade                          | mg.L <sup>-1</sup>      | ∞                                |

Fonte: (a): OLIVEIRA (1997), a 20°C; (b): OLIVEIRA (2001), a 29°C.

## 2.2 ZONA VADOSA

Por definição, a zona vadosa é a região do solo que se encontra entre o nível do lençol e a superfície, composta pela franja capilar e a zona não saturada (Figura 1). Entretanto, quando o foco é o meio poroso e o fluxo de seus fluidos, a zona não saturada e zona vadosa são frequentemente utilizadas como sinônimos (NIELSEN, 2006). Esta região é caracterizada por ser um ambiente multifásico, com propriedades que diferem da zona saturada, por apresentar fase sólida (partículas do solo), fase líquida (água de constituição, umidade do solo, líquidos que podem estar presentes no meio) e fase gasosa (ar e vapores). Neste trabalho, os termos zona vadosa e zona não saturada serão tratados como sinônimos, representando a região acima do nível do lençol.

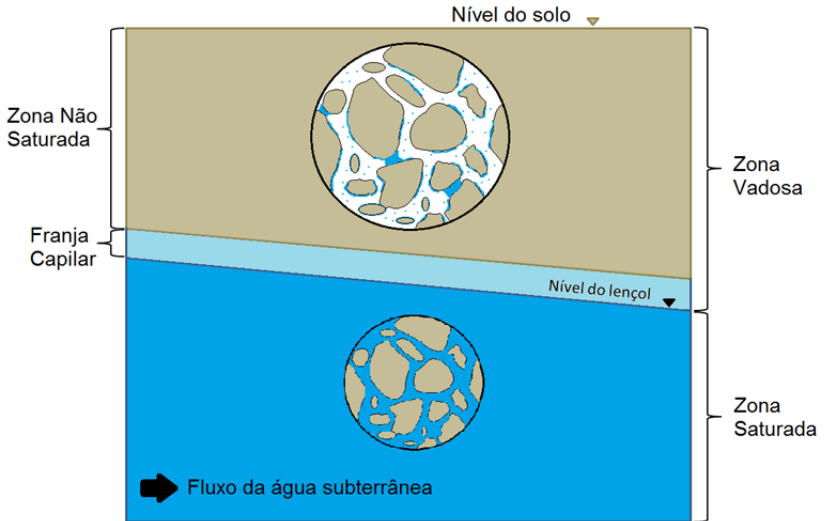


Figura 1 - Representação esquemática das zonas do solo, em relação à saturação de água

### 2.2.1 Fase sólida

A fase sólida possui grande influência no fluxo da zona vadosa, pois representa o meio em que o fluido pode passar ou ficar retido (ALBRECHT *et al.*, 1989). Ela pode ser composta por partículas de rocha fraturada, areia, silte, argila e até mesmo matéria orgânica, possuindo os mais variados tamanhos. Os diâmetros destas partículas influenciarão no transporte dos fluidos nesta região, pois é por onde se formarão os caminhos preferenciais. O tamanho destes caminhos, além das propriedades dos fluidos, é que determinará a velocidade de migração. A análise granulométrica tem grande importância ao se estudar a zona vadosa. Esta análise é efetuada através do peneiramento do solo, separando as partículas pelo diâmetro da peneira, em que o resultado é um gráfico cumulativo de porcentagem do solo passante em função do diâmetro do grão. Quanto mais vertical é o formato do gráfico, mais uniformes serão as partículas, com pouca variedade de tamanho de partículas. Esta uniformidade pode fazer com que haja menos caminhos preferenciais. O formato do grão também pode ter importância, pois pode alterar propriedades como a porosidade e transmissividade do fluido.



### **2.2.2 Fase líquida**

A fase líquida da zona vadosa é naturalmente constituída por água, mas em casos de acidentes pode haver fluidos solúveis em água (como o etanol) e fluidos insolúveis em água (como a gasolina). O tempo que a fase líquida fica na zona vadosa depende das propriedades da fase sólida e das propriedades do líquido, como viscosidade, densidade, superfície de tensão, pressão de vapor e molhabilidade. A precipitação e recarga são os meios de entrada de água na zona vadosa, o que ocorre naturalmente no ciclo hidrológico. O mecanismo de saída se dá pela migração até a zona saturada, evapotranspiração e consumo por microrganismos. O mesmo tende a ocorrer com líquidos hidrofílicos, a partir do momento que suas propriedades (como temperatura) se equilibrem com a do meio (COREY, 1977).

O comportamento dos fluidos hidrofóbicos, como a gasolina, poderá ser diferente. Estes líquidos, mesmo considerados imiscíveis, podem ter certa solubilidade em água, como é o caso dos BTEX. Entretanto isto não ocorre instantaneamente, podendo levar certo tempo para detectar estes constituintes em água (SCHWARZENBACH, GSCHWEND e IMBODEN, 2003). A entrada destes líquidos no meio não é natural, normalmente ocorre em casos de vazamentos ou acidentes, onde ocorrerá uma competição pelos espaços vazios, havendo presença de gasolina, água e vapores resultantes da volatilização.

### **2.2.3 Fase gasosa**

A fase gasosa tem um papel importante, pois diferencia a zona vadosa da zona saturada, fazendo com que os fluidos migrem de maneira diferente do que ocorre em um aquífero. Durante a precipitação ou recarga a fase gasosa é reduzida do volume total disponível no poro, em que a água ocupa um volume maior e força o deslocamento do ar. Já no período em que a água migra para a zona saturada, ou durante a evapotranspiração, o volume da fase gasosa aumenta (NIELSEN, 2006). A quantidade de vapores depende da pressão de vapor do líquido e temperatura do meio.

### **2.2.4 Propriedades da zona vadosa**

A molhabilidade é uma importante propriedade da zona vadosa, que relaciona a fase líquida com a fase sólida. Ela é caracterizada pela força interfacial relativa entre dois fluidos (líquido-líquido ou líquido-

gás) em um limite sólido. Por exemplo, em um sistema água-sólido-ar, a água tende a molhar preferencialmente o sólido. Portanto, na zona vadosa, a água que infiltra tende a ficar nos grãos do poro e o ar irá ocupar os maiores espaços vazios do solo (NIELSEN, 2006).

A capilaridade é uma força responsável pela existência da franja capilar e está diretamente ligada à tensão interfacial dos fluidos. Esta tensão representa a tendência das moléculas do fluido saírem da interface em direção a outras moléculas. Em um fluido esta tendência é medida através da tensão superficial. Em presença de um fluido imiscível, a tensão superficial na interface age como uma membrana, como ocorre, por exemplo, em uma gota de chuva presente no ar. Em um tubo, esta força que une as partículas faz com que o fluido se eleve, até que ocorra o equilíbrio entre a tensão superficial e o peso do líquido, em função do raio do tubo (quanto maior o raio, menos o líquido subirá). Combinando a capilaridade com a molhabilidade, obtém-se o equilíbrio que ocorre na zona vadosa. Os poros agem como o tubo e, próximo ao nível do lençol, a água subirá por capilaridade, formando uma região conhecida por franja capilar.

A determinação da altura da franja capilar em campo não é algo facilmente calculado. Devido à heterogeneidade do solo, o tamanho dos poros pode variar significativamente, em que um raio médio não representará bem o tamanho dos poros no cálculo. Em casos que o tamanho dos grãos é homogêneo (solos com curvas granulométricas verticais), pode-se utilizar a Equação 1 para determinar a altura da franja capilar, a partir do equilíbrio da força capilar de sucção e da tensão superficial da água.

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (1)$$

Em que  $h$  representa a altura da franja capilar,  $\sigma$  a tensão superficial da água,  $\cos \alpha$  o ângulo de contato,  $\rho$  a massa específica da água,  $g$  a aceleração da gravidade e  $r$  o raio do tubo. Para a água, sabe-se que  $\cos \alpha$  é aproximadamente igual a 1. A partir desta fórmula, pode-se concluir que a presença de um fluido que diminua a tensão superficial da água poderá reduzir a altura da franja capilar. Em campo, o valor do raio é substituído pelo tamanho representativo de poro ( $d_n$ ). A determinação de  $d_n$  é complicada, devido à heterogeneidade do solo. Entretanto, este valor pode ser estimado, estando entre  $0,155 \cdot d_{50}$  e  $0,414 \cdot d_{50}$  (IWATA, TABUCHI e WARKENTIN, 1995), lembrando que  $d_{50}$  é obtido através da análise granulométrica do solo (diâmetro médio da partícula).

Outra maneira de determinar a altura da franja capilar é através de medições de pressão de sucção. A água da franja capilar acima do nível do lençol assume pressões negativas, com valores inferiores à pressão atmosférica. A partir desta propriedade, é possível utilizar tensiômetros para determinar a altura da franja capilar, através da medição das pressões da subsuperfície.

A porosidade é uma propriedade do solo que quantifica a porção relativa de vazios, conhecida também como porosidade total (Equação 2). Ela depende do tamanho dos grãos de solo e a maneira como estão dispostos, estando ou não interligados.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (2)$$

Em que  $n$  é a porosidade total,  $V_v$  é o volume de vazios e  $V_t$  é o volume total da amostra. No solo natural, considerando a heterogeneidade, os grãos menores do solo tendem a ocupar os espaços vazios entre os grãos maiores. A porosidade efetiva ( $n_e$ ) representa o volume de poros efetivamente disponível para ser ocupado por fluidos, excluindo os poros não conectados e a água de constituição do solo, pode ser determinada através de ensaios com amostras de solo em mesa de tensão.

## 2.3 TRANSPORTE DOS CONTAMINANTES NA SUBSUPERFÍCIE

### 2.3.1 Gasolina

Em caso de acidentes com gasolina na zona não saturada, o transporte de contaminantes pode ser descrito através do modelo conceitual mostrado pela Figura 2, que representa o vazamento de um tanque combustível instalado na zona não saturada do solo.

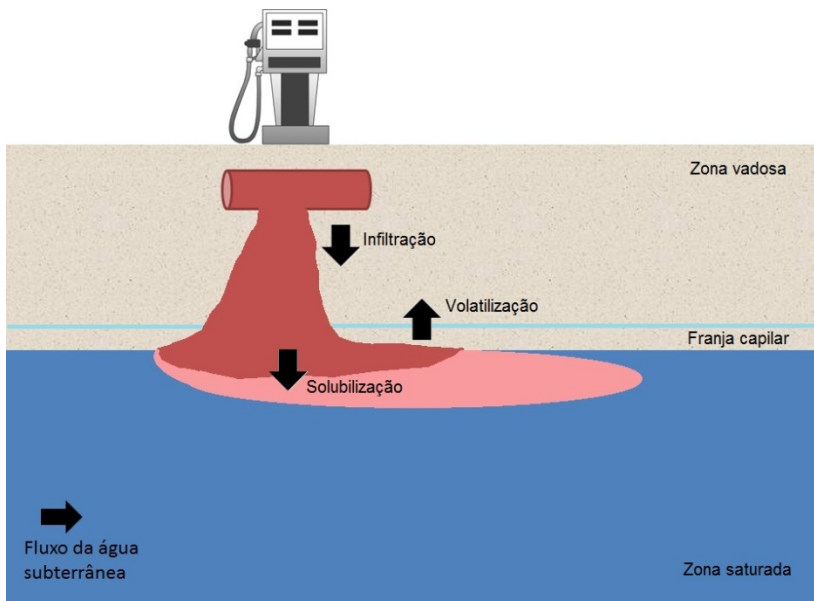


Figura 2 - Modelo conceitual do transporte dos contaminantes na subsuperfície

A migração do contaminante se dá predominantemente pela atuação da força gravitacional, com influência das forças capilares e viscosas, em que as propriedades dos fluidos e do meio poroso determinam como ocorrerá o transporte até o nível do lençol. Outros fatores que não podem ser descartados na análise da migração dessas misturas são o volume e proporção de gasolina e etanol derramados, a área de derramamento, a umidade e heterogeneidade do solo, bem como a taxa de infiltração e profundidade do lençol freático (FREITAS, 2009). Caso um pequeno volume de combustível seja derramado na zona vadosa, ele poderá ficar retido e não chegar ao aquífero, devido à ação da capilaridade. A heterogeneidade do solo (como a presença de uma lente de argila, por exemplo) pode causar o espalhamento do contaminante e até mesmo impedir a chegada ao nível do lençol, avançando através de caminhos preferenciais pelos poros. A viscosidade do fluido afeta a migração do contaminante no meio poroso, pois é a medida de resistência do fluido ao fluxo, portanto quanto menor a viscosidade, mais facilmente ele poderá migrar até a zona saturada. Os contaminantes migrarão pela zona vadosa predominantemente pela força da gravidade, em oposição à viscosidade do fluido, até chegar à zona saturada (HUNT, SITAR e UDELL, 1988). O contaminante que chegar

à zona saturada sofrerá um espalhamento ao nível da franja capilar, pois a densidade dos compostos que compõem a mistura gasolina e etanol são inferiores à densidade da água (PARKER, 1989; PANTAZIDOU e SITAR, 1993).

### **2.3.2 A influência do etanol**

Em presença de etanol, o comportamento da migração da gasolina poderá ser alterado, pois os álcoois diminuem a tensão superficial e a força capilar (BEAR, 1988). O etanol é completamente solúvel em água e gasolina, e sua composição de fases depende do volume de cada constituinte na mistura, como pode ser observado através do diagrama ternário (Figura 3) entre água, álcool e gasolina. Vale ressaltar que misturas que possuam volume superior a 70% de etanol constituem uma única fase. Na migração de misturas de gasolina e etanol na zona vadosa, o etanol pode se particionar da mistura e migrar para a água do poro (OLIVEIRA, 1997; MCDOWELL, BUSCHECK e POWERS, 2003). Este comportamento pode facilitar a migração dos compostos da gasolina em direção à água subterrânea, devido à redução da tensão superficial da água (HENRY e SMITH, 2003). O etanol também pode causar redução na altura da franja capilar (HENRY e SMITH, 2002; MCDOWELL, BUSCHECK e POWERS, 2003; SMITH, HENRY e BASHIR, 2011) e ficar retido na zona não saturada (MCDOWELL e POWERS, 2003; CAPIRO *et al.*, 2007; UNGER *et al.*, 2009; FREITAS *et al.*, 2011). O monitoramento da zona vadosa é fundamental para se avaliar o impacto causado em casos de acidentes com misturas de gasolina e etanol, devido à interferência do etanol na migração da gasolina e, além de ficar retido na zona vadosa (MCDOWELL, BUSCHECK e POWERS, 2003; CAPIRO *et al.*, 2007), o etanol pode migrar lateralmente dentro da franja capilar (SILLIMAN *et al.*, 2002; ABIT *et al.*, 2008).

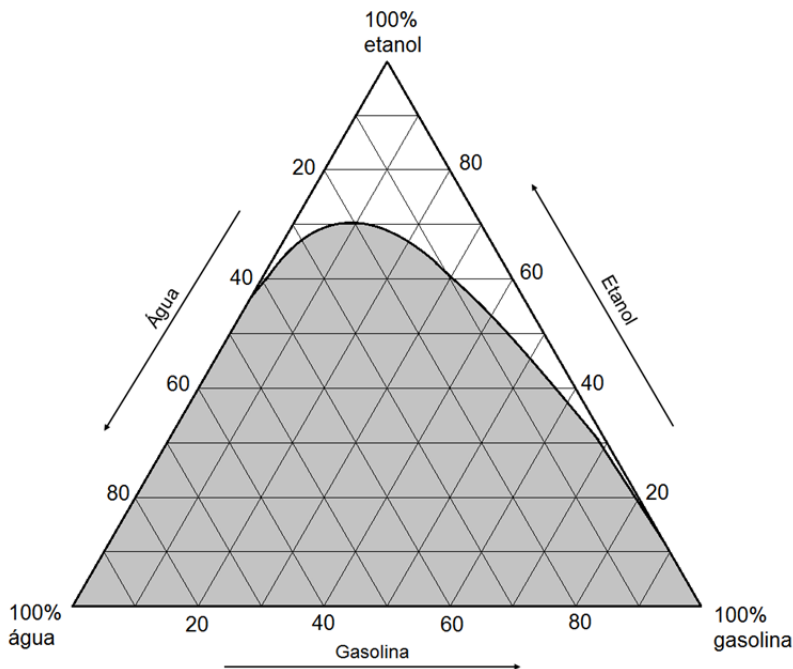


Figura 3 - Diagrama ternário para o sistema gasolina-etanol-água, a 21°C  
 Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (1997).

A partir do diagrama ternário do sistema água-gasolina-etanol (Figura 3), pode-se determinar de quantas fases é composta a mistura. A parte destacada em cinza no gráfico representa as porcentagens em que a mistura gasolina-água-etanol estão separadas em duas fases, uma formada pela gasolina e outra formada pela mistura água-etanol. Quando uma mistura de gasolina e etanol anidro entra no solo, ela é composta por uma única fase. Conforme ela avança na zona vadosa, a proporção de água da mistura aumenta, devido à umidade do solo. Dependendo dos volumes de água, gasolina e etanol, à medida que a mistura migra em direção à zona saturada, poderá ocorrer uma separação de fases, em que o etanol formará uma fase com a água do poro e a gasolina continuará a migrar em direção à zona saturada. Este equilíbrio está diretamente ligado ao volume de etanol e gasolina derramados e água disponível do solo (umidade e distância ao nível do lençol).

## 2.4 MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

O ambiente de campo é um meio dinâmico que pode mudar rapidamente suas condições (devido à precipitação, por exemplo). Na zona vadosa estas mudanças podem ser ainda mais evidentes, com a variação do nível do lençol, que pode mudar não apenas o valor da umidade do solo, mas também transformar a zona vadosa em saturada. Baseado nas rápidas alterações do meio utilizou-se um método de monitoramento em tempo real para que se pudesse melhor entender o comportamento de misturas de etanol e gasolina, simulando condições reais. Para esse monitoramento optou-se por utilizar o método TDR (*Time Domain Reflectometry* – Reflectometria no Domínio do Tempo). Este método indireto foi escolhido por fornecer dados em tempo real, não ser destrutivo, possuir grande exatidão, fácil calibração, não oferecer riscos radioativos e por ser fácil de manusear (CALDERÓN, 2010). O método TDR tem sido amplamente utilizado para determinação da umidade volumétrica do solo a partir da leitura do tempo de trânsito de uma onda eletromagnética, em que um pulso gerado pela sonda é convertido em constante dielétrica do meio e umidade volumétrica do solo (TOPP, DAVIS e ANNAN, 1980; DALTON *et al.*, 1984; TOPP, DAVIS e ANNAN, 2003).

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética é função da constante dielétrica do meio em que se propaga (Equação 3). A constante dielétrica, também conhecida por permissividade, é uma propriedade dos materiais não condutores (dielétricos), a qual afeta como uma onda eletromagnética se move através do meio. Como cada material não condutor possui um valor único de constante dielétrica, é possível utilizar esta propriedade para identificar qual composto está presente no meio estudado. Sabe-se que  $c$  representa a velocidade de propagação da onda no meio,  $c_0$  a velocidade de propagação da onda no vácuo,  $\varepsilon$  a constante dielétrica do meio (adimensional) e  $\mu$  a permeabilidade magnética do meio (adimensional), em que, para materiais dielétricos,  $\mu = 1$ .

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (3)$$

O método TDR baseia-se na velocidade de propagação de uma onda eletromagnética na amostra de estudo, a partir da determinação do tempo de propagação da onda em uma distância conhecida (Equação 4).

$$c = \frac{2L}{t} \quad (4)$$

Em que  $L$  representa o comprimento da haste da sonda e  $t$  o tempo de trânsito pela haste.

A cada leitura, a sonda emite um pulso eletromagnético que se propaga através de sua haste, e é então detectado o tempo que leva para percorrer o meio de interesse. Sabendo que a velocidade de propagação da onda no meio é determinada através da relação entre o espaço percorrido (entre as duas hastes da sonda) e o tempo de trânsito da onda (medido pela sonda), é possível determinar a constante dielétrica através da combinação das equações de velocidade de propagação da onda no meio (Equação 5).

$$\varepsilon = \frac{c_0^2 \cdot t^2}{4 \cdot L^2} \quad (5)$$

Baseado na diferença de valores da constante dielétrica entre os materiais e no princípio do método das sondas TDR, em 1975 este método também passou a ser utilizado para a determinação da umidade volumétrica do solo (DAVIS e CHUDOBIK, 1975). Através de uma série de experimentos, como uma forma de validação do trabalho de DAVIS e CHUDOBIK (1975), foi encontrada uma relação que correlacionou o valor de umidade volumétrica do solo com a constante dielétrica do meio, conhecida como Equação de Topp (TOPP, DAVIS e ANNAN, 1980). A Equação 6 mostra a Equação de Topp, em que  $\varepsilon$  representa a constante dielétrica do meio e  $\theta$  a umidade volumétrica.

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^3 \quad (6)$$

A utilização da equação de Topp é um método consolidado de determinação da umidade volumétrica com sondas TDR, em que é necessária a calibração para diferentes tipos de solo, visto que os solos possuem composições químicas diferentes e podem alterar o valor da constante dielétrica (JONES, WRAITH e OR, 2002; CATALDO *et al.*, 2010; KAISER *et al.*, 2010), consequentemente um valor de umidade que não expressa o valor real. Os principais fatores que afetam o valor da constante dielétrica do solo são a granulometria, a composição do solo (tipo de minerais), o teor de matéria orgânica, o comprimento do cabo da sonda, sua posição (horizontal ou vertical) (CALDERÓN, 2010) e o fluido presente no meio. Baseado nesta teoria é possível detectar a fração volumétrica de outros líquidos no solo, que não seja a água.



Estudos mostram que o método TDR para detecção da fração volumétrica de LNAPL (*Light non-aqueous phase liquids* – Líquidos leves de fase não aquosa) em solos tem sido cada vez mais utilizado. Persson e Berndtsson (2002) e Haridy, Persson e Berndtsson (2004) utilizaram a metodologia em tempo real para detectar a fração de biodiesel, através da leitura da constante dielétrica do meio, em experimentos de laboratório. Mohamed e Said (2005) utilizaram as sondas TDR em laboratório para a detecção de óleo de motor, diesel, etanol e metanol no solo através da interpretação do pulso emitido pela sonda com a técnica eigen. Esta técnica permitiu a detecção dos fluidos no solo, entretanto a metodologia utilizada não permitiu a determinação da fração dos compostos, devido à sensibilidade desta técnica à presença de água. Utilizando esta mesma técnica, Mohamed e Said (2004) detectaram a presença de acetona, benzeno, heptano, tricloroetileno e xilenos, mas também não determinaram a sua fração, devido à metodologia empregada. A detecção da fração de gasolina no solo, em experimentos de laboratório, com o foco na sua migração na zona vadosa foi estudada por Oliveira (1997), Gomez (1998) e Bicalho (1997). Nestes estudos, a metodologia TDR para detecção de gasolina foi utilizada em experimentos de laboratório como uma adaptação da equação de Topp, apenas qualitativamente, sem determinação do valor das frações. Entretanto, o foco do estudo feito por estes pesquisadores foi na migração da gasolina, pois o volume de etanol liberado foi muito pequeno, devido à utilização da mistura E20 em pequeno volume. Apesar de existirem inúmeros estudos utilizando a metodologia TDR para detecção de LNAPLs e etanol no solo, não foi encontrado um estudo que mostrasse a determinação da fração volumétrica de etanol para o solo com as características encontradas no experimento de campo. Portanto, neste trabalho, foi efetuada uma calibração das sondas TDR para determinação da fração de etanol a partir da constante dielétrica do meio, com o solo da área experimental.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo utilizado nos experimentos em laboratório foi coletado na mesma área em que foi realizado o experimento de campo, portanto a caracterização do solo teve a finalidade de auxiliar tanto a parte laboratorial, quanto experimental.

Para análises físico-químicas do solo foram coletadas 6 amostras, na região da fonte do experimento de campo, no momento da instalação das sondas de monitoramento (antes do início do experimento de campo), nas seguintes profundidades: 30 cm, 60 cm, 75 cm, 85 cm, 95 cm e 125 cm. A análise foi efetuada pela Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina (CIDASC).

Para a análise granulométrica, foram coletadas três amostras de solo, no mesmo momento e local de coleta da análise físico-química. As profundidades coletadas foram: 60 cm, 90 cm e 180 cm. A análise granulométrica foi efetuada no Laboratório de Mecânica dos Solos do departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina. Os diâmetros médios das partículas ( $d_{50}$ ) podem ser determinados a partir da curva granulométrica, em que é obtido o valor do diâmetro com 50% passante.

A densidade aparente do solo foi obtida a partir do método da proveta, em que uma massa solo seco (em estufa, a 105°C, por 24 h) é pesado e colocado e compactado (batendo 10 vezes) em uma proveta, até que o nível da amostra atinja o traço de aferimento da proveta. A densidade é obtida a partir da divisão entre a massa de solo pelo volume aferido na proveta. A densidade real foi obtida através do método do balão volumétrico, em que uma massa conhecida de solo seco é adicionada a um balão volumétrico de 50 mL, em que é adicionado álcool até o volume de aferição. A partir da densidade do álcool, massa do balão, massa do balão + solo, massa do balão + solo + álcool, pode-se determinar a densidade real do solo.

#### 3.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA

A umidade volumétrica ( $\theta$ ) foi obtida a partir da umidade gravimétrica ( $\theta_g$ ), determinada em laboratório. Sabe-se que a massa de água presente em uma amostra de solo seco é chamada umidade gravimétrica, expressa em porcentagem (Equação 7).

$$\theta_g = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{solo}}} \cdot 100 \quad (7)$$

A umidade gravimétrica foi obtida pesando uma amostra de solo úmida, em seguida esta amostra foi secada em estufa (a 105°C, por 24 h), deixada no dessecador, para que entrasse em equilíbrio com a temperatura ambiente, e pesada. A massa de água foi obtida pela diferença entre as massas de solo seco e solo úmido, em que a umidade gravimétrica foi calculada com a Equação 7.

Sabendo que a densidade é a relação entre massa e volume, pode-se calcular a umidade volumétrica a partir da densidade gravimétrica, densidade do solo seco e densidade da água, como mostra a Equação 8.

$$\theta = \theta_g \cdot \frac{\rho_{\text{solo}}}{\rho_{\text{água}}} \quad (8)$$

Em que  $\theta$  representa a umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $\rho_s$  a densidade do solo seco ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) e  $\rho_a$  a densidade da água ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Os valores utilizados para a densidade do solo seco foi de  $1.600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (determinada em laboratório) e a densidade da água foi  $996 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (OLIVEIRA, 1997).

### 3.3 SONDAS TDR

As sondas TDR utilizadas no experimento de laboratório e de campo são da marca Imko, modelo TRIME-EZ (Figura 4).

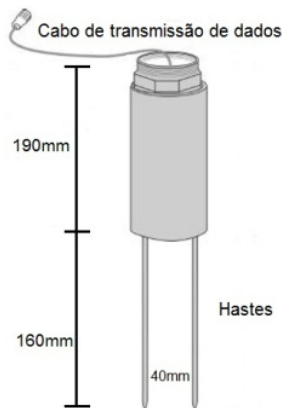


Figura 4 - Esquema da sonda TDR modelo TRIME-EZ (Imko)

Após a instalação das sondas (seja em coluna ou em campo), o cabo de transmissão de dados deve ser conectado a um módulo de distribuição, o qual é conectado com o cabo RS232 ao computador para leitura e armazenamento dos dados. O módulo de distribuição é o responsável pela comunicação entre sonda e computador, em que os dados são lidos através de programas do próprio fabricante (*Trime WinMonitor* e *Trime WinCal*). Estes programas possibilitam a calibração da sonda (para diferentes tipos de solo, materiais e comprimento de cabos), além de fornecer dados de umidade volumétrica ( $\theta$ ) e tempo de trânsito ( $t$ ).

Os softwares *Trime WinMonitor* e *Trime WinCal* utilizam a equação de Topp para a determinação da umidade volumétrica do solo. Portanto, para obter valores de constante dielétrica do meio, pode-se utilizar os valores de tempo de trânsito, com a Equação 5, ou o valor da umidade volumétrica lida pela sonda, com o inverso da equação de Topp (Equação 9), fornecido e recomendado pelo próprio fabricante.

$$\varepsilon = 3,03 + 9,3 \cdot \theta + 146 \cdot \theta^2 - 76,7 \cdot \theta^3 \quad (9)$$

### 3.4 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO

#### 3.4.1 Calibração das sondas TDR para determinação da saturação

A calibração das sondas TDR para determinação da umidade volumétrica foi efetuada em laboratório, com experimentos em colunas com o solo da área experimental, coletado a 1 m de profundidade ao lado de onde foi realizado o experimento de campo.

Foram utilizadas colunas de vidro, com 40 cm de altura e 10 cm de diâmetro, preenchidas completamente com o solo preparado, em que foi inserida uma sonda no centro, distante 5 cm do fundo. O solo foi seco em estufa, por 24 h, a 105°C e armazenado em recipiente fechado. Foram realizadas nove leituras, em que a cada leitura foi adicionada certa quantidade de água ao solo, visando obter valores de umidade diferentes. O solo úmido foi colocado na coluna de vidro, com a sonda já preparada no centro, em que foi deixado descansar por 24 h a cada preparação de coluna, para leitura da sonda.

#### 3.4.1 Determinação da fração de etanol em tempo real

Para a determinação da fração de etanol em tempo real foi necessário calibrar as sondas TDR para o solo da área experimental em

presença de etanol. A determinação foi efetuada em laboratório, com colunas de vidro, utilizando a mesma configuração da calibração das sondas TDR para a saturação (Figura 5). O solo utilizado também passou pelo processo de secagem em estufa a 105°C por 24 h, para evitar qualquer interferência da água na determinação da constante dielétrica das frações de etanol.



Figura 5 - Determinação da fração de etanol com o solo da área experimental

A determinação da fração de etanol foi realizada em duas etapas: permitindo a completa saturação do solo com o fluido (com o dreno elevado, impedindo a saída de fluido da coluna) e com a drenagem do fluido, simulando as condições encontradas na zona vadosa do experimento de campo. Foram preparadas misturas contendo água e etanol, com diferentes quantidades em volume: água pura (0% de etanol), 10%, 25%, 50%, 75% e 100% de etanol (etanol anidro). Para cada leitura de constante dielétrica da mistura foi utilizada uma coluna de solo, evitando interferências entre misturas.

Para a determinação da fração de etanol em saturação (simulando as leituras efetuadas na zona saturada), foi liberado 1 L da mistura água-etanol, em um pulso. As leituras de constante dielétrica foram efetuadas com intervalo de trinta segundos e seguiram continuamente até que os valores se mostrassem estabilizados.

O experimento para determinar a fração de etanol na zona vadosa foi efetuado dando continuidade ao experimento para a fração de etanol em saturação. Cada coluna saturada teve o dreno baixado para que toda a mistura presente no solo da coluna pudesse sair, restando apenas a fração que o solo retém naturalmente contra a ação da gravidade,

propriedade do solo conhecida como capacidade de campo (VEIHMEYER e HENDRICKSON, 1931). O experimento foi elaborado para obter os valores de fração de etanol em capacidade de campo, visando às condições encontradas na zona vadosa do solo. Cada coluna foi drenada por um período de 24 h, período em que houvesse tempo suficiente para que o solo adquirisse as condições da zona vadosa, mas sem ocorrer grandes perdas por evaporação. As perdas por evaporação foram minimizadas através da cobertura da boca do cilindro com um filme plástico, deixando apenas uma pequena abertura para a entrada de ar próximo ao cabo que conecta a sonda ao computador. As constantes dielétricas utilizadas foram as constantes lidas após o período de 24 h.

### 3.4.2 Verificação estatística dos dados

A verificação dos dados coletados a partir dos experimentos em laboratório para determinação da fração de etanol a um modelo de regressão linear simples foi efetuada através do ajuste da reta entre a variável dependente  $y$  (fração de etanol) e a variável regressora  $x$  (constante dielétrica), de acordo com o descrito por Montgomery e Runger (2010). Os modelos de regressão linear para determinação da fração de etanol, em saturação e capacidade de campo, foram verificados por meio de análise de variância (Teste de Fischer) com o software *Origin 8.0*. O teste de Fischer compara o valor de  $F$  (razão entre soma dos quadrados e média dos quadrados) do polinômio, com  $k$  de graus de liberdade, com o valor de  $F$  tabelado, com  $n-1$  graus de liberdade. A verificação da adequação do modelo foi efetuada através do valor  $p$  e do valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O valor de  $R^2$  mostra a qualidade da regressão linear. Valores próximos a 1 representam uma forte correlação entre  $x$  e  $y$ , em que é esperado um alto grau de confiança do modelo de regressão, a ser verificado através da análise do valor  $p$ . O valor  $p$  obtido na análise de variância deve ser inferior ao valor estabelecido  $\alpha$  (foram utilizados valores de confiança igual a 95%, ou seja,  $\alpha = 0,05$ ).

Para verificação do modelo de regressão polinomial utilizado para determinar a umidade volumétrica do solo, foi efetuada a análise do valor de  $R^2$  e do valor  $p$ , obtido através da análise de variância (Teste de Fischer) entre a variável dependente  $y$  (umidade volumétrica) e a variável regressora  $x$  (constante dielétrica), com o software *Origin 8.0* (MONTGOMERY e RUNGER, 2010). O teste de Fischer para a regressão exponencial compara o valor de  $F$  do polinômio, com  $k$  de

graus de liberdade, com o valor de  $F$  tabelado, com  $n-k$  graus de liberdade.

Como as equações para determinação da fração de etanol foram obtidas com solo da área experimental, não foi efetuada a calibração para a correção dos diferentes compostos que pudessem alterar a constante dielétrica do solo, como foi efetuada para a determinação da umidade. Vale lembrar que esta relação deve ser utilizada apenas para solos com as características semelhantes às encontradas na área experimental, pois em solos com outras propriedades podem ser obtidas constantes dielétricas diferentes, em que o modelo de regressão para a determinação da fração de etanol não poderá ser utilizado.

### 3.5 EXPERIMENTO EM CAMPO

O experimento realizado em campo foi conduzido na Fazenda da Ressacada, propriedade da Universidade Federal de Santa Catarina. A fazenda localiza-se no sul da cidade de Florianópolis, com latitude  $27^{\circ}40'S$  e longitude  $48^{\circ}32'O$  (Figura 6). O experimento é controlado por 41 poços de monitoramento da água subterrânea, com profundidades entre 2 e 6 m, com o objetivo de monitorar o fluxo dos contaminantes e dar continuidade a estudos futuros.



Figura 6 - Localização da área experimental

Fonte: Adaptado de Google.



A liberação da mistura de gasolina e etanol foi feita no dia 08 de setembro de 2010, em que houve monitoramento com as sondas TDR nos 30 dias subsequentes.

### **3.5.1 Caracterização da área experimental**

A condutividade hidráulica da área experimental foi determinada com o permeâmetro Guelph 2800K1, da marca SoilMoisture. O permeâmetro foi colocado a 80 cm de profundidade, preparado com o trado fornecido pelo próprio fabricante, em que apenas um reservatório foi preenchido por água subterrânea.

O aquífero presente na área experimental pode ser classificado como livre e com fluxo da água subterrânea variado, em função das águas superficiais e recarga do aquífero (SCHNEIDER, 2005). A área experimental conta com 28 poços para monitoramento do nível do lençol, dos quais 10 estão localizados em um raio de 100 m a partir da fonte, em que são monitorados duas vezes por semana.

A precipitação na área experimental influencia diretamente a altura do nível do lençol. A precipitação foi monitorada diariamente, com dados fornecidos pela Base Aérea de Florianópolis, região vizinha à área experimental. A precipitação média anual de Florianópolis é da ordem de 1.600 mm por ano (CORSEUIL *et al.*, 2011).

### **3.5.2 Fonte de contaminação**

Este trabalho possui foco na zona vadosa, na região da fonte, em que foram liberados 200 L de uma mistura contendo 170 L de etanol e 30 L de gasolina, em um único pulso. A fonte foi escavada na superfície do solo, com área de 1,5 m x 1,0 m e profundidade de 20 cm (Figura 7). No centro desta fonte foram instaladas quatro sondas de monitoramento em tempo real (TDR), nas profundidades 0,6 m, 0,9 m, 1,2 m e 1,5 m a partir da superfície do solo (Figura 8), uma semana antes da liberação. Após a liberação da mistura, a fonte foi coberta por uma lona até a completa infiltração, visando evitar grandes perdas por evaporação. Após este período, a fonte foi preenchida com o próprio solo da fonte, em que toda a área foi coberta por lona e brita, para evitar a recarga direta.

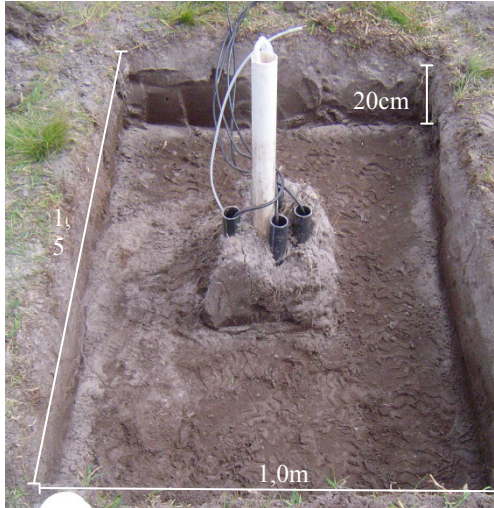


Figura 7 - Fonte da liberação de gasolina e etanol em campo

À montante da fonte foram instaladas quatro sondas de monitoramento em tempo real (TDR), nas mesmas profundidades das sondas instaladas no centro da fonte (Figura 8), para determinação da umidade volumétrica na zona vadosa, com o objetivo de monitorar as condições naturais do solo, em que não há presença de contaminantes.

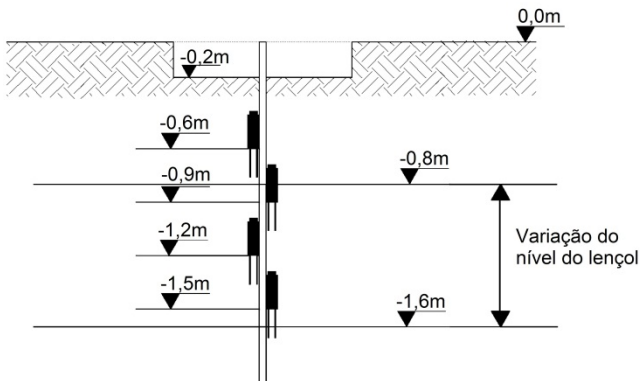


Figura 8 - Esquema de instalação das sondas TDR em campo

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A análise físico-química do solo da área experimental fornece uma base para identificação do solo e possível utilização das equações da fração de etanol e umidade volumétrica, pois mostram as características do solo que alteram os valores de constante dielétrica. As principais propriedades são mostradas na Tabela 4, em que os resultados das análises podem ser observados no Anexo 1. A porosidade efetiva do solo da área experimental foi determinada por Chiaranda (2011) e varia entre 18 e 20%.

Tabela 4 - Propriedades do solo coletado na área experimental

| <b>Profundidade/<br/>Propriedade</b> | <b>40<br/>cm</b> | <b>60<br/>cm</b> | <b>75<br/>cm</b> | <b>85<br/>cm</b> | <b>95<br/>cm</b> | <b>125<br/>cm</b> |
|--------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Ferro (%)                            | 0,03             | 0,02             | 0,04             | 0,05             | 0,04             | 0,03              |
| Zinco (ppm)                          | 0,56             | 0,40             | 1,52             | 1,80             | 1,20             | 0,56              |
| Manganês (ppm)                       | 1,00             | 1,12             | 0,68             | 1,48             | 2,60             | 3,68              |
| Fósforo (ppm)                        | 6,70             | 3,10             | 4,00             | 2,60             | 3,90             | 1,10              |
| Potássio (ppm)                       | 5,00             | 4,00             | 7,00             | 6,00             | 7,00             | 8,00              |
| Sódio (ppm)                          | 3,00             | 2,00             | 3,00             | 3,00             | 3,00             | 0,00              |
| Matéria orgânica (%)                 | 1,00             | 0,40             | 0,70             | 0,80             | 0,70             | 0,10              |

A análise granulométrica da área experimental mostrou que o solo é formado, em média, por 3,45% de argila, 3,50% de silte e 93,05% de areia. Baseado na granulometria do solo e no triângulo de classificação textural de solos (LEMOS e SANTOS, 1996), o solo da área experimental pode ser classificado como arenoso.

Em todas as profundidades analisadas (Figura 9, Figura 10 e Figura 11), o solo pode ser considerado relativamente homogêneo, devido à verticalidade da curva granulométrica. O diâmetro médio das partículas ( $d_{50}$ ) foi estimado como sendo 0,15 mm a 60 cm de profundidade (Figura 9), 0,12 mm a 90 cm (Figura 10) e 0,14 mm a 180 cm de profundidade (Figura 11).

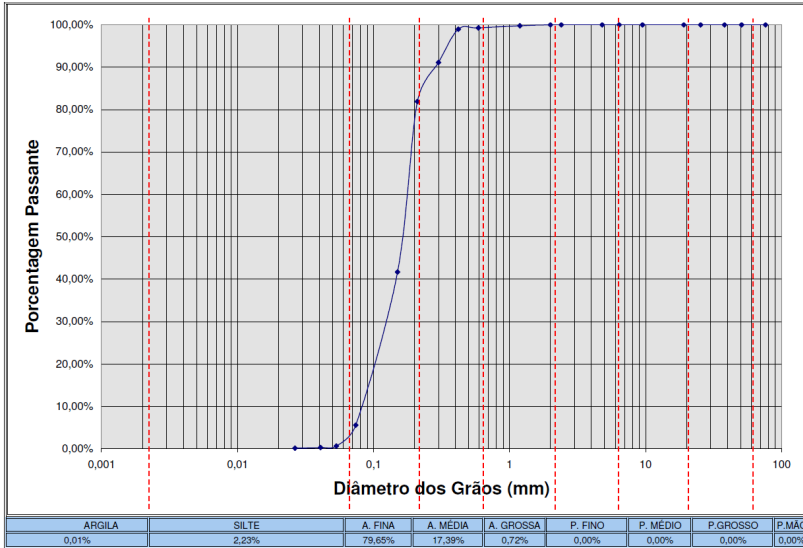


Figura 9 - Análise granulométrica do solo da área experimental - profundidade de 60 cm

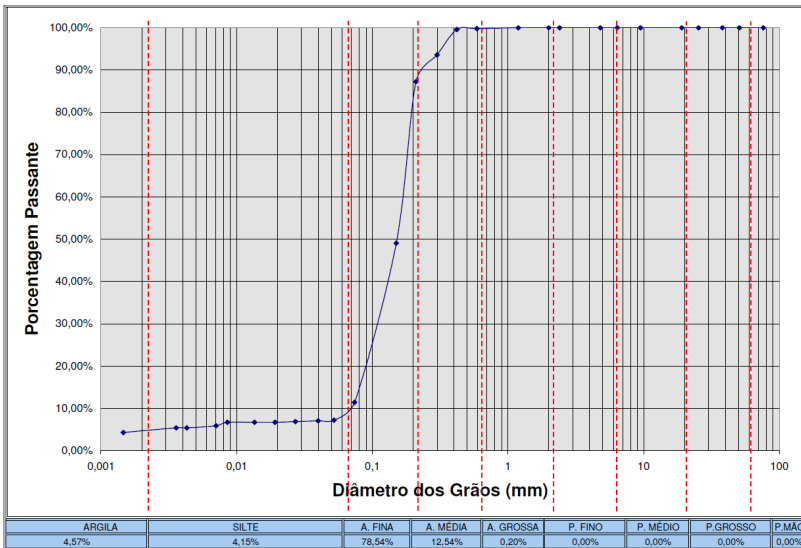


Figura 10 - Análise granulométrica do solo da área experimental - profundidade de 90 cm

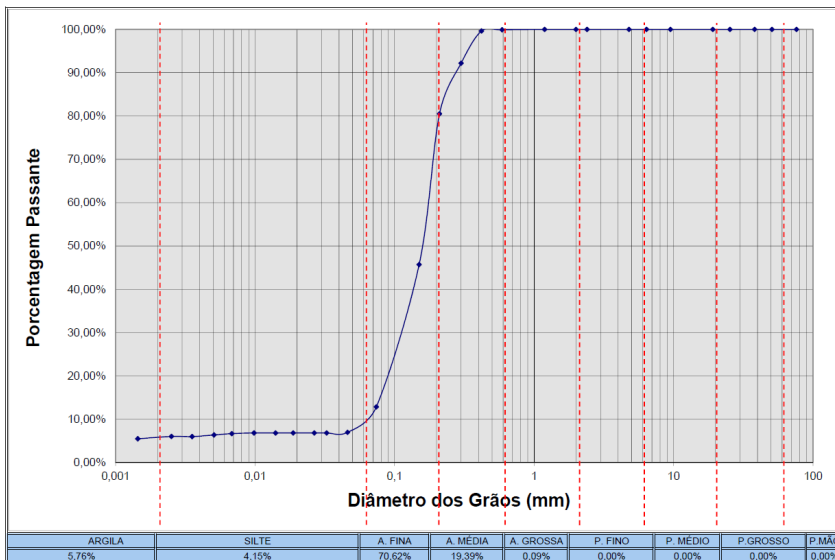


Figura 11 - Análise granulométrica do solo da área experimental - profundidade de 180 cm

O resultado completo da análise granulométrica pode ser observado no Anexo 2 deste trabalho.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA

A calibração da sonda TDR para determinação da umidade volumétrica em tempo real foi efetuada com valores de constante dielétrica (obtidos através de leituras da sonda) e valores de umidade determinados em laboratório. Com estes resultados foi construído um gráfico (Figura 12) para obter a relação entre constante dielétrica e umidade volumétrica do solo. Foi efetuada uma regressão polinomial de terceira ordem para efetuar o ajuste da curva, em virtude do estudo realizado por Topp, Davis e Annan (1980), que observaram que a umidade volumétrica do solo varia como um polinômio de grau três a partir da constante dielétrica do meio.

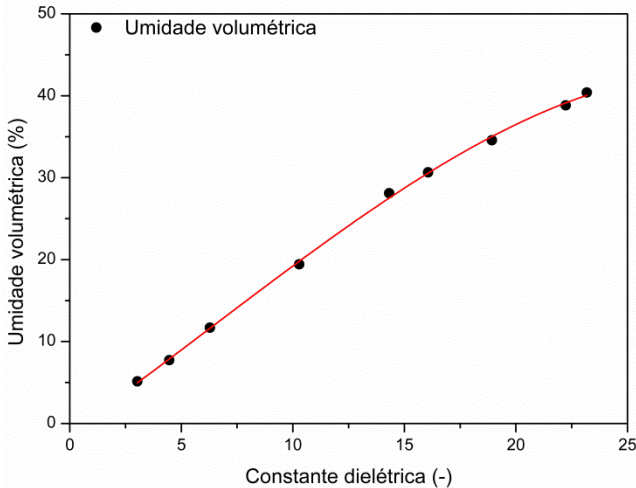


Figura 12 – Relação entre umidade volumétrica e constante dielétrica para o solo da área experimental

A equação do modelo de regressão polinomial está representada pela Equação 10, em que  $\theta$  representa a umidade volumétrica e  $\varepsilon$  a constante dielétrica do meio.

$$\theta = -9,8 \cdot 10^{-1} + 1,897 \cdot \varepsilon + 2,58 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2 - 1,35 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon^3 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,999$$

Observou-se que a equação obtida difere da Equação de Topp, o que era esperado baseado na análise físico-química do solo, visto que cada solo possui uma composição química distinta e estes valores podem alterar o valor da constante dielétrica do meio.

Foi construída a tabela de análise de variância com o software *Origin 8.0* (Tabela 5) para verificar se o modelo de regressão polinomial é uma boa representação da variação da umidade volumétrica com a constante dielétrica do solo.

Tabela 5 - Análise de variância da regressão polinomial para determinação da umidade volumétrica

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | Soma Quadrática | Média Quadrática | F      | Valor p   |
|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------|-----------|
| Regressão         | 3                  | 1692,9          | 564,3            | 3524,6 | 3,989E-10 |
| Resíduo           | 6                  | 0,9606          | 0,160            |        |           |
| Total             | 9                  | 1693,9          |                  |        |           |

Analisando o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), observou-se que o modelo tem uma forte relação entre a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e a constante dielétrica ( $\epsilon$ ), se mostrando adequado à determinação da umidade volumétrica, pois possui valor muito próximo de 1 ( $R^2 = 0,999$ ). O modelo também mostrou possuir alta confiança, em que o valor  $p$  é muito inferior ao valor  $\alpha$  (0,05), com uma diferença de oito ordens de grandeza. Com isso, é possível inferir que o modelo é uma boa representação do comportamento dos dados analisados, podendo ser utilizado na determinação da umidade volumétrica a partir da constante dielétrica do solo.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

Nos trinta dias em que a zona vadosa foi monitorada, ocorreu precipitação total de 170 mm. A temperatura ambiente manteve-se relativamente estável em todo o período (Figura 13), com temperatura média de 18,8°C, em que o dia zero representa o início do experimento em campo (liberação do combustível na fonte).

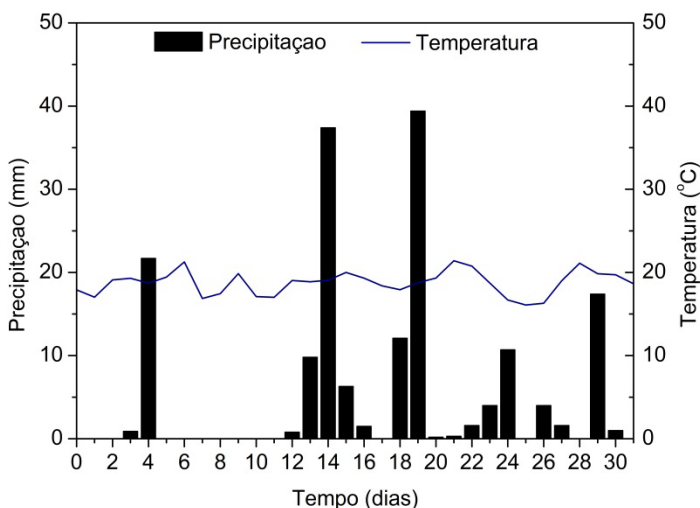


Figura 13 - Dados de temperatura e precipitação na área experimental

Durante este mesmo período, o nível do lençol variou de 0,8 m, devido a 107 mm de chuva em uma semana. A Figura 14 mostra como variou o nível do lençol na área experimental, em que o dia zero representa a data do início do experimento em campo (liberação do

combustível). Para a construção do gráfico foi considerado o piezômetro mais próximo da fonte de liberação, distante 6 m do centro da fonte.

A condutividade hidráulica saturada foi determinada em campo, com valor de  $9,25E-4 \text{ cm.s}^{-1}$ , em que os dados coletados e cálculos recomendados pelo fabricante encontram-se no Anexo 3 deste trabalho.

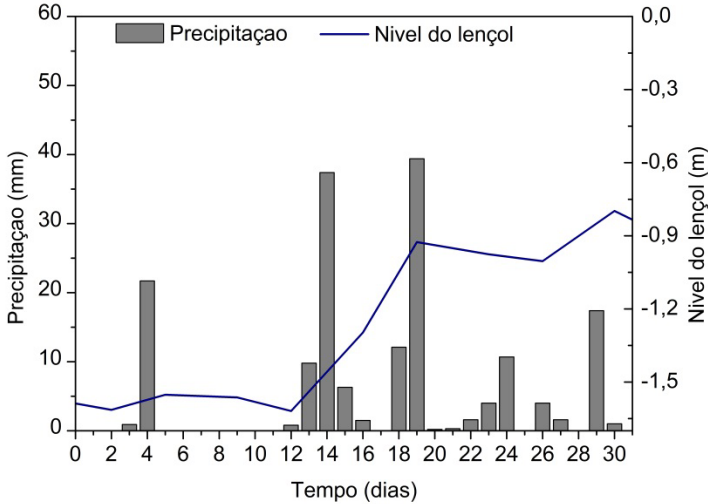


Figura 14 - Variação do nível do lençol e precipitação na área experimental

A partir da Figura 14, observou-se que o nível do lençol variou apenas alguns centímetros nos doze primeiros dias de experimento. Neste período, a umidade volumétrica do solo permaneceu constante ao longo da zona vadosa (Figura 15).



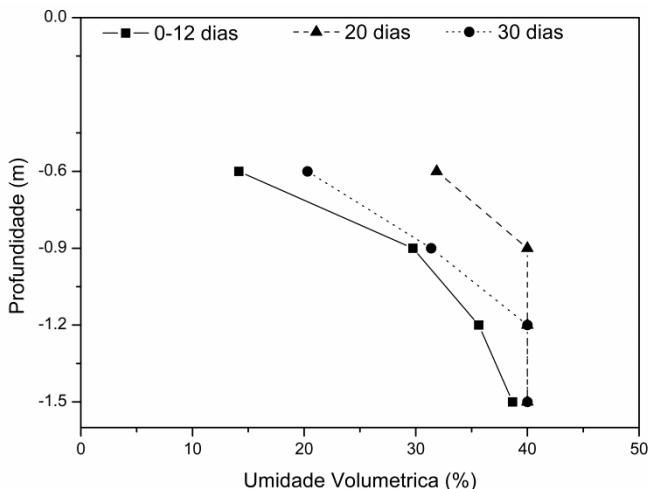


Figura 15 – Variação da umidade volumétrica na área experimental

Devido à grande elevação do nível do lençol entre o 12º e 20º dia (Figura 14), os valores de saturação se alteraram, em que os níveis 1,2 m e 1,5 m passaram a estar na zona saturada (Figura 15). No 30º dia, os três níveis inferiores de monitoramento (0,9 m a 1,5 m) estavam na zona saturada (Figura 15).

A altura da franja capilar foi estimada através da utilização da Equação 1, com os valores de diâmetro médio indicados por Iwata et al. (1995) e utilizando os valores de diâmetro médio da partícula. Como o diâmetro médio das partículas varia de acordo com a profundidade, os resultados da altura da franja capilar mínimo e máximo encontram-se na Tabela 6. Os cálculos detalhados encontram-se no Anexo 4.

Tabela 6 - Estimativa da altura da franja capilar ( $h$ ) a partir dos valores de  $r$

| Profundidade | $h_{d50}$ (cm) | $h_{0,155*d50}$ (cm) | $h_{0,414*d50}$ (cm) |
|--------------|----------------|----------------------|----------------------|
| 60 cm        | 9,82           | 63,36                | 23,72                |
| 90 cm        | 12,28          | 79,20                | 29,65                |
| 180 cm       | 10,52          | 67,89                | 25,42                |

Richardson (2006) efetuou um estudo sobre a estimativa da altura da franja capilar baseado nas propriedades do solo, como porcentagem de areia, silte e argila, em comparação a valores medidos de franja, através da pressão de sucção. Comparando os valores calculados da altura da franja capilar (Tabela 6) com os valores medidos por Freitas

(2009) e Richardson (2006), observou-se que a altura da franja capilar pode ser bem representada pelos valores inferiores ( $0,414*d_{50}$ ) calculados com a fórmula apresentada por Iwata, Tabuchi e Warkentin (1995).

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DE ETANOL EM TEMPO REAL

##### 4.4.1 Zona saturada

Para melhor visualizar a relação entre a fração volumétrica de etanol em condições de saturação e a constante dielétrica do meio, foi construído um gráfico (Figura 16) com o valor da fração volumétrica de etanol, preparada com água e etanol anidro em diferentes proporções, e a constante dielétrica lida pela sonda após atingir os valores de saturação (após os valores de constante dielétrica estabilizarem).

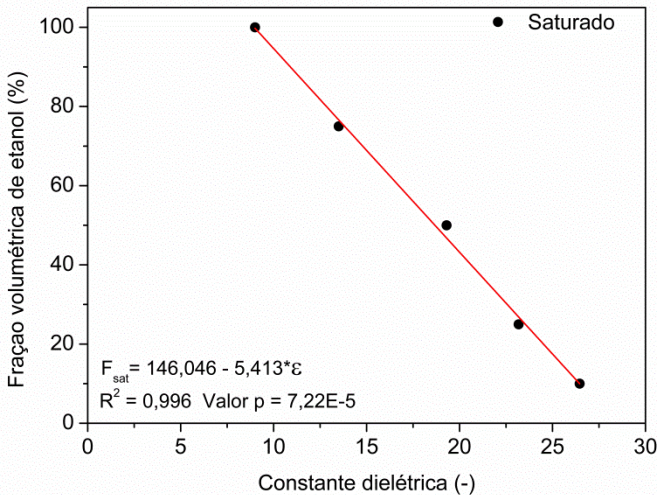


Figura 16 - Relação entre constante dielétrica e fração volumétrica de etanol em saturação com solo da área experimental

A Equação 11 representa o modelo de regressão linear para determinação da fração volumétrica de etanol na zona saturada a partir da constante dielétrica do meio, como pode ser observado na Figura 16.

$$F_{sat} = 146,046 - 5,143 \cdot \epsilon \quad (11)$$

$$R^2 = 0,996$$

Em que  $F_{sat}$  representa a fração de etanol no solo saturado e  $\varepsilon$  a constante dielétrica do meio.

Para verificar o ajuste da reta (Equação 11) entre a variável dependente  $y$  (fração de etanol) e a variável regressora  $x$  (constante dielétrica) a um modelo de regressão linear, foi efetuada uma análise de variância (Teste de Fischer), com o software *Origin 8.0* (Tabela 7).

Tabela 7 - Análise de variância da regressão linear para determinar a fração de etanol na zona saturada

| Fonte de Variação | Graus de liberdade | Soma Quadrática | Média Quadrática | F      | Valor p |
|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------|---------|
| Regressão         | 1                  | 5313,6          | 5313,6           | 974,89 | 7,22E-5 |
| Resíduo           | 3                  | 16,35           | 5,45             |        |         |
| Total             | 4                  | 5330            |                  |        |         |

A partir dos dados obtidos, observou-se que o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é muito próximo de 1 ( $R^2 = 0,996$ ), o que mostra uma forte correlação entre a constante dielétrica e a fração de etanol na zona saturada. O modelo se mostra uma boa equação para obter a fração de etanol a partir da constante dielétrica do solo, pois está dentro do valor de confiança adotado, com valor  $p$  muito inferior ao valor  $\alpha$  adotado (0,05), com diferença de três ordens de grandeza.

#### 4.4.2 Zona vadosa

Para obter a fração volumétrica de etanol na zona vadosa, foi construído um gráfico (Figura 17) com a fração volumétrica de etanol em capacidade de campo e a constante dielétrica obtida com a leitura da sonda, a partir do experimento de determinação da fração de etanol na zona saturada, drenado por 24 h.

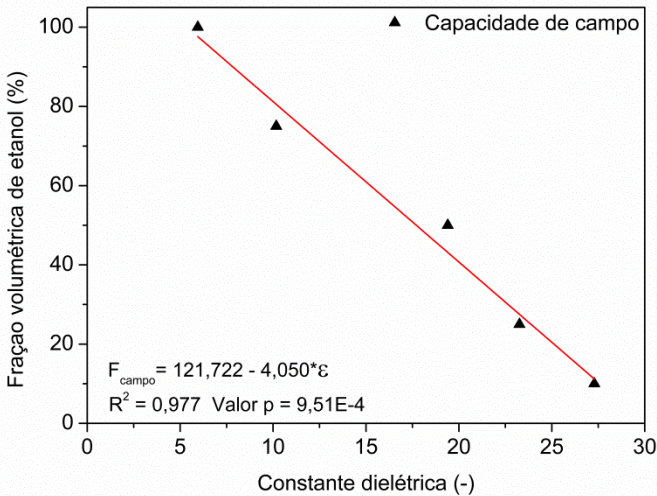


Figura 17 - Relação entre constante dielétrica e fração volumétrica de etanol em capacidade de campo com solo da área experimental

Foi utilizado um modelo de regressão linear para representar a variação da fração de etanol na zona vadosa a partir da constante dielétrica do meio, como pode ser observado na Figura 17.

$$F_{cc} = 121,722 - 4,050 \cdot \varepsilon \quad (12)$$

$$R^2 = 0,977$$

Em que  $F_{cc}$  representa a fração de etanol no solo em capacidade de campo e  $\varepsilon$  a constante dielétrica do meio.

O ajuste da reta (Equação 12) foi verificado com a análise de variância (Teste de Fischer), com o software *Origin 8.0*, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise de variância da regressão linear para determinação da fração volumétrica de etanol em capacidade de campo

| Fonte de Variação | Graus de liberdade | Soma Quadrática | Média Quadrática | F      | Valor p |
|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------|---------|
| Regressão         | 1                  | 5239,1          | 5239,1           | 172,84 | 9,51E-4 |
| Resíduo           | 3                  | 90,94           | 30,31            |        |         |
| Total             | 4                  | 5330            |                  |        |         |

O valor do coeficiente de determinação manteve-se muito próximo a 1 ( $R^2 = 0,977$ ), mostrando uma forte correlação entre a fração volumétrica de etanol em capacidade de campo e constante dielétrica do meio, indicando um bom ajuste da curva. O modelo também está dentro do intervalo de confiança adotado, em que o valor  $p$  ficou duas ordens de grandeza inferior ao valor  $\alpha$  (0,05). Portanto, o modelo de regressão linear se mostrou adequado para determinar a fração volumétrica de etanol na zona vadosa a partir da leitura dos valores de constante dielétrica em campo.

#### 4.5 MIGRAÇÃO DE ETANOL NA ZONA VADOSA EM EXPERIMENTO DE CAMPO

Em casos de acidentes com misturas de gasolina e etanol, o etanol pode ficar retido na zona vadosa, dependendo do volume de etanol derramado, volume de água disponível no solo (umidade e distância ao nível do lençol), tipo de solo e área derramada (MCDOWELL e POWERS, 2003; FREITAS, 2009; STAFFORD *et al.*, 2009). Para chegar até a zona saturada, deve haver volume de etanol suficiente para percorrer completamente a zona vadosa, em que a umidade do solo (bem como as proporções de gasolina e etanol) definirá a separação da mistura em duas fases, uma em que o etanol se une à água presente no poro do solo e outra em que a gasolina migra até atingir o nível do lençol, a partir do diagrama ternário água-gasolina-etanol. Nos doze primeiros dias de experimento em que o nível do lençol não sofreu grandes oscilações, mantendo a umidade volumétrica na zona vadosa constante, as frações de etanol na zona vadosa chegaram a mais de 90% nos níveis superiores de monitoramento (0,6 m e 0,9 m).

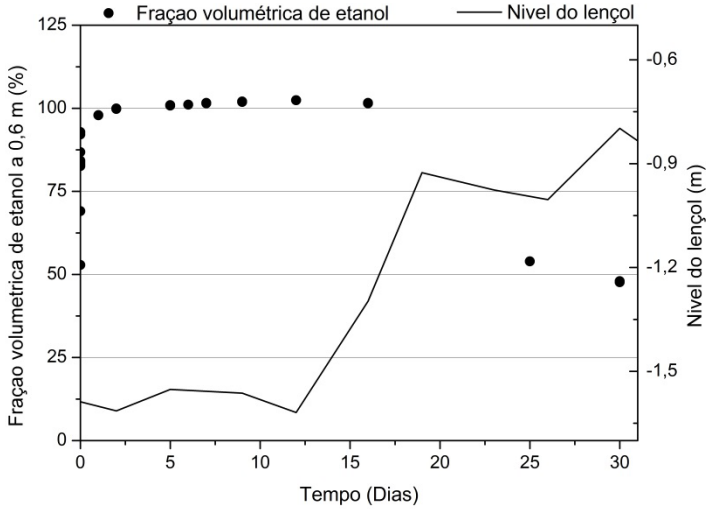


Figura 18 - Fração volumétrica de etanol no nível 0,6 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento

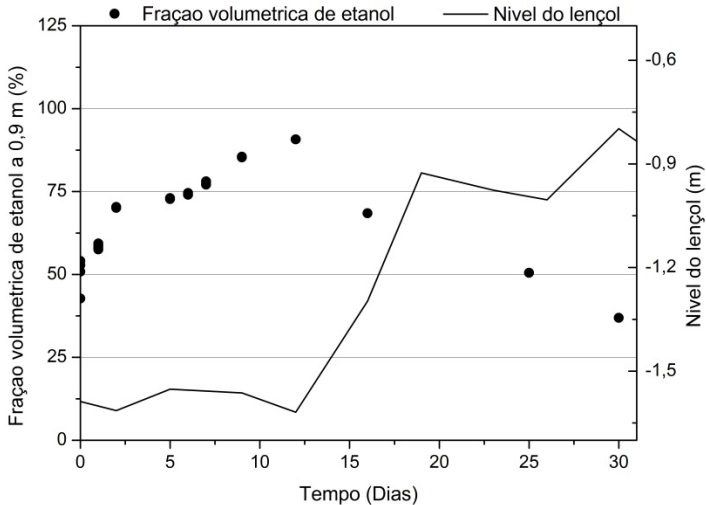


Figura 19 - Fração volumétrica de etanol no nível 0,9 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento

A partir da liberação, as frações volumétricas de etanol aumentaram em todos os níveis de monitoramento, migrando em direção à zona saturada, no período em que o lençol se manteve estático.

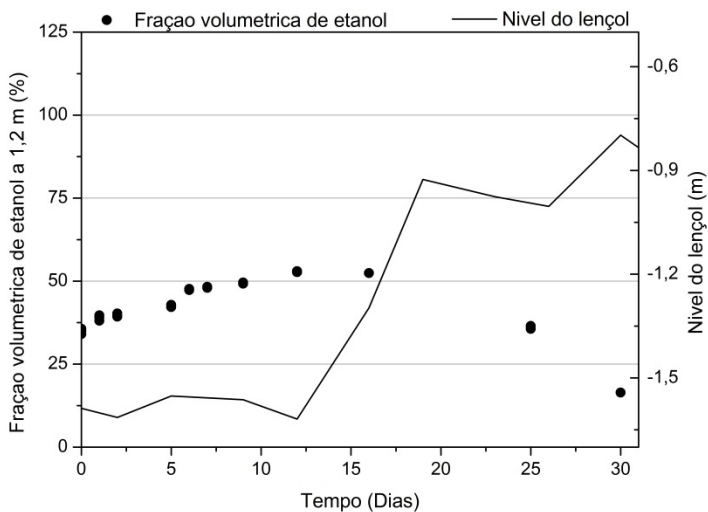


Figura 20 - Fração volumétrica de etanol no nível 1,2 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento

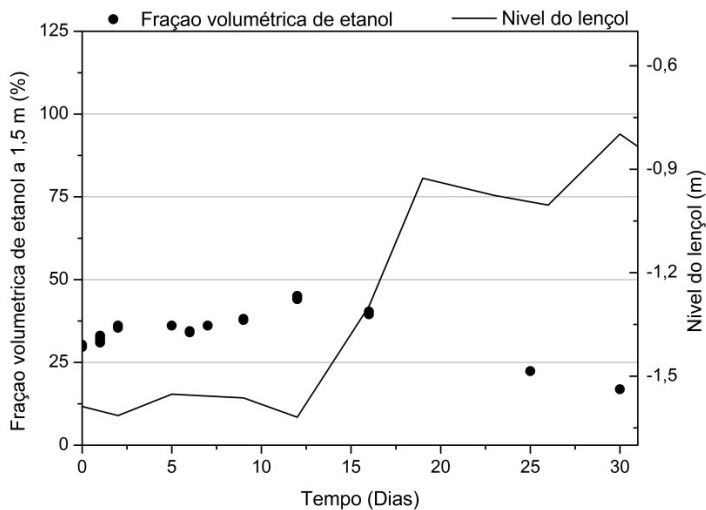


Figura 21 - Fração volumétrica de etanol no nível 1,5 m e variação do nível do lençol ao longo dos 30 dias de experimento

As altas frações de etanol encontradas nos níveis superiores de monitoramento (Figura 18 e Figura 19) e o grande volume de etanol liberado (170 L de etanol com 30 L de gasolina) indicam que houve um

ressecamento do solo, em que a água do poro passou a ser transferida para o etanol, enquanto migrava pela zona vadosa, diferente do comportamento com misturas contendo pequenas proporções de etanol (MCDOWELL e POWERS, 2003). Estes níveis estavam com um valor de umidade volumétrica no momento da liberação de 15% (0,6 m) e 30% (0,9 m), em que as frações volumétricas de etanol foram superiores a 90% nestes níveis, indicando que a água disponível no poro migrou com o etanol que avançava em direção à zona saturada. Nos níveis inferiores (Figura 20 e Figura 21) o etanol não chegou a ocupar totalmente o volume do poro, pois o etanol que chegou dos níveis superiores veio em forma de mistura com a água do poro, além de haver mais água disponível devido à proximidade do lençol (umidade volumétrica de 35% em 1,2 m e 39% em 1,5 m). Os valores de frações de etanol para todos os níveis de monitoramento em campo encontram-se no Anexo 5.

A retenção do etanol na zona vadosa foi estudada em laboratório (MCDOWELL e POWERS, 2003; UNGER *et al.*, 2009), em experimentos com pilotos (CAPIRO *et al.*, 2007; STAFFORD e RIXEY, 2011) e em experimentos de campo (FREITAS e BARKER, 2011b; FREITAS *et al.*, 2011; SPALDING *et al.*, 2011). No período em que não houve variação do nível do lençol, o etanol migrou pela zona vadosa e ficou nela retido com frações que variaram ao longo da profundidade, entre 100%, no nível mais próximo à liberação do combustível, chegando a 45% na altura da franja capilar. Estes resultados mostram que o volume de etanol liberado e a umidade do solo possuem uma forte relação, a qual pode influenciar a maneira com que o etanol migra pela zona vadosa. O etanol ficará completamente retido na zona vadosa, sem alcançar a zona saturada, apenas se o volume de etanol liberado for pequeno, em que ficará retido com a água no poro, enquanto não houver grandes alterações de umidade.

Em casos reais, deve-se levar em consideração fatores como a pluviosidade, pois as oscilações do nível do lençol podem causar a migração do etanol retido na zona vadosa para a zona saturada (MCDOWELL e POWERS, 2003; FREITAS *et al.*, 2011; STAFFORD e RIXEY, 2011). No período em que o nível do lençol manteve-se constante a 1,6 m de profundidade, o etanol ficou retido na zona vadosa, como observado em estudos de laboratório (MCDOWELL e POWERS, 2003; CAPIRO *et al.*, 2007; STAFFORD e RIXEY, 2011) e campo (FREITAS e BARKER, 2011b; SPALDING *et al.*, 2011). Após uma chuva de 107 mm (Figura 14), distribuída em uma semana consecutiva, o nível do lençol subiu de 0,8 m, alterando completamente os valores de



umidade da zona vadosa (Figura 15). Após essa elevação, os níveis de 0,9 m a 1,5 m transformaram-se em zona saturada, e apenas o nível 0,6 m monitorava a zona vadosa, fazendo com que as frações de etanol fossem calculadas com a Equação 12, para o nível 0,6 m, e com a Equação 11, para os níveis 0,9 m a 1,5 m. Com a elevação do nível do lençol, observou-se uma diminuição das frações de etanol retidas na então zona vadosa, em todos os níveis de monitoramento. No 30º dia, as frações de etanol ficaram entre 20% e 30% na atual zona saturada (níveis 0,9 m a 1,5 m), indicando que o etanol foi transportado para a zona saturada, em que o decréscimo de suas concentrações deve-se à diluição do etanol devido à elevação do nível do lençol e migração na zona saturada. O etanol possui densidade de aproximadamente 98% da densidade da água (OLIVEIRA, 1997), nas frações em que se encontrava no 30º dia de monitoramento. Entretanto, mesmo possuindo densidade inferior à da água, o etanol não acompanhou a elevação do nível do lençol, indicando que houve solubilização e transporte na zona saturada. A fração de etanol presente na franja capilar no 30º dia ficou em torno de 50%, indicando que é necessária uma série de oscilações do nível do lençol ou recarga direta para remover completamente o etanol da zona vadosa.

Estudos mostram que os compostos dissolvidos na franja capilar podem ser transportados lateralmente (SILLIMAN *et al.*, 2002; ABIT *et al.*, 2008; FREITAS e BARKER, 2011a), podendo atingir longas distâncias sem serem transferidos para a zona saturada. Estudos de campo similares ao experimento efetuado na Fazenda Experimental da Ressacada (FREITAS e BARKER, 2011b; FREITAS *et al.*, 2011; SPALDING *et al.*, 2011) foram efetuados em regiões onde a precipitação anual é muito inferior à precipitação encontrada em regiões do sul do Brasil. Não foi observado o transporte lateral de etanol na região da franja capilar no experimento de campo na Fazenda Experimental da Ressacada, possivelmente pelo fato de que o etanol foi transferido para a zona saturada devido à grande variação do nível do lençol, em que aumentou de 0,8 m em uma semana. Portanto, em regiões de elevada precipitação anual, a migração do etanol para a zona saturada pode aumentar os efeitos negativos na degradação dos compostos BTEX na fase aquosa, resultando em plumas mais longas e aumentando a persistência destes compostos na água subterrânea (MOLSON *et al.*, 2002). A presença de etanol também pode diminuir a concentração dos receptores de elétrons disponíveis (MACKAY *et al.*, 2006; GOMEZ e ALVAREZ, 2009), pois é preferencialmente biodegradado em relação aos BTEX, em que a posição do etanol é um

ponto chave nos processos redutivos e oxidativos de degradação dos compostos BTEX.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a migração de etanol a partir da liberação controlada na zona vadosa de uma mistura contendo 170 L de etanol e 30 L de gasolina em experimento de campo e como a migração do etanol se altera em regiões com elevada pluviosidade. As conclusões obtidas neste trabalho foram baseadas no monitoramento em tempo real das frações de etanol na zona vadosa na região da fonte de contaminação, no monitoramento da pluviosidade, da variação do nível do lençol e da umidade volumétrica do solo na área experimental.

Após a liberação controlada, o etanol migrou por 1,5 m da zona vadosa, atingindo a franja capilar em apenas um dia. O grande volume de etanol liberado causou a transferência da água presente no poro do solo para o fluido que migrava pela zona vadosa, ressecando o primeiro metro da zona não saturada. Mesmo chegando rapidamente à água subterrânea, parte do etanol permaneceu retido na zona vadosa, no período em que não houve grande variação do nível do lençol. Em casos em que grande volume de etanol é liberado, o etanol pode ficar retido na zona saturada e o volume restante de etanol pode migrar para a zona saturada com a gasolina, em que os efeitos negativos do etanol sobre a degradação dos compostos BTEX estarão presentes.

Após 0,8 m de elevação do nível do lençol devido a 107 mm de precipitação em uma semana, as frações de etanol diminuíram em todos os níveis de monitoramento devido à diluição e migração para a zona saturada. Estes resultados indicam que o particionamento do etanol da gasolina para a água do poro na zona vadosa e sua acumulação na franja capilar está diretamente relacionado ao volume de etanol liberado e à umidade do solo, enquanto não houver variação do nível do lençol. Entretanto, a migração de etanol para a zona saturada é preferencialmente governada pela flutuação do lençol.

A Reflectometria no domínio do tempo se mostrou uma boa metodologia para avaliar a migração do etanol na zona vadosa em tempo real. As equações do modelo de regressão linear se mostraram adequadas para fornecer a fração volumétrica de etanol a partir da leitura da constante dielétrica do solo, a partir da análise de variância das equações. No entanto, a ferramenta deve ser calibrada para diferentes tipos de solo, pois pode fornecer valores irreais de fração volumétrica. Esta ferramenta é indicada para locais em que se conheça o fluido contaminante e que se possam fazer análises de solo na área para calibração do equipamento.

Em casos de liberação em regiões com alta pluviosidade, como é o caso de Florianópolis (1.600 mm por ano), pode ocorrer o transporte de etanol para a zona saturada, devido a grandes oscilações do lençol ou devido à proximidade do lençol da superfície. A principal consequência desta maior migração está relacionada com a degradação dos compostos BTEX presentes em misturas de gasolina com etanol. Caso o etanol seja transferido para a água subterrânea, ele poderá retardar a degradação dos BTEX, resultando em plumas mais longas. Este estudo indica a importância das alterações do lençol freático na partição de combustíveis em casos de derramamentos subsuperficiais.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Com base nas conclusões deste trabalho, recomenda-se:

- A continuidade do monitoramento da área experimental, para acompanhar a migração de etanol na água subterrânea e sua atenuação natural, por ser um caso com liberação de grande volume de etanol.
- Aprofundar o estudo da determinação da fração de etanol a partir da constante dielétrica, com sondas TDR, para determinação das frações também nas condições de franja capilar.
- Incluir nos modelos matemáticos de migração a retenção do etanol na zona vadosa e a influência da variação do nível do lençol no transporte para a zona saturada.
- Monitorar o nível do lençol em casos de derramamentos com misturas que contenham etanol, pois o etanol poderá migrar mais rapidamente para a zona saturada em regiões de grandes precipitações.
- Estudar o transporte lateral de etanol e BTEX na zona saturada, com base no monitoramento da água subterrânea do experimento de campo.
- Incluir o estudo da flutuação do nível do lençol na recuperação de gasolina, em casos de derramamentos, pois o transporte de etanol para a zona saturada pode dificultar sua recuperação.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIT, S. M. et al. Solute Transport in the Capillary Fringe and Shallow Groundwater: Field Evaluation. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 3, p. 890-898, August 2008 2008.

ALBRECHT, K. A. et al. Excavation of an Instrumented Earthen Liner - Inspection of Dyed Flow Paths and Morphology. **Hazardous Waste & Hazardous Materials**, v. 6, n. 3, p. 269-279, Sum 1989. ISSN 0882-5696. Disponível em: <<Go to ISI>://A1989AT01700005 >.

ANNABLE, M. D.; JAWITZ, J. W.; RAO, P. S. C. Miscible fluid displacement stability in unconfined porous media: Two-dimensional flow experiments and simulations. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 31, n. 3-4, p. 211-230, Jun 1998. ISSN 0169-7722. Disponível em: <<Go to ISI>://000074408700001 >.

ANP. **Resolução ANP nº 6, de 24/2/2005**: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2005.

\_\_\_\_\_. **Biocombustíveis**: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2010.

\_\_\_\_\_. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2011**: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2011a.

\_\_\_\_\_. **Resolução ANP nº 7, de 09/02/2011**: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2011b.

\_\_\_\_\_. **Resolução ANP nº 57, de 20/10/2011**: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2011c.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. Editora Dover Publications, 1988. 784p. ISBN 9780486656755.

BICALHO, K. V. **Dissolução de gasolina em presença de água e etanol**. 1997. 118 (Doutor em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

CALDERÓN, V. J. V. **Interpretação dos resultados de ensaios TDR para a determinação do teor de umidade dos solos**. 2010. 118 (Mestre em geotecnia). Departamento de Geotecnia, Universidade de São Carlos

CAPIRO, N. L. et al. Fuel-grade ethanol transport and impacts to groundwater in a pilot-scale aquifer tank. **Water Research**, v. 41, n. 3, p. 656-664, Feb 2007. ISSN 0043-1354. Disponível em: <<Go to ISI>://000244512600015 >.

CATALDO, A. et al. Improvement and Metrological Validation of TDR Methods for the Estimation of Static Electrical Conductivity. **Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 59, n. 5, p. 1207-1215, May 2010. ISSN 0018-9456. Disponível em: <<Go to ISI>://000276416100026 >.

CETESB. **Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo**. p.14. 2010

CHIARANDA, H. S. **Alterações biogeoquímicas em águas subterrâneas impactadas por biodiesel de soja e misturas de diesel/biodiesel (B20)**. 2011. 221 (Doutor em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Resolução nº 396 2008.

\_\_\_\_\_. **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**. Resolução nº 420 2009.

COREY, A. T. **Mechanics of heterogeneous fluids in porous media**. Fort Collins: 1977.

CORSEUIL, H. X. et al. The influence of the gasoline oxygenate ethanol on aerobic and anaerobic BTX biodegradation. **Water Research**, v. 32, n. 7, p. 2065-2072, Jul 1998. ISSN 0043-1354. Disponível em: <<Go to ISI>://000074735800010 >.

CORSEUIL, H. X.; KAIPPER, B. I. A.; FERNANDES, M. Cosolvency effect in subsurface systems contaminated with petroleum hydrocarbons and ethanol. **Water Research**, v. 38, n. 6, p. 1449-1456, Mar 2004. ISSN 0043-1354. Disponível em: <<Go to ISI>://000220462200009 >.

CORSEUIL, H. X. et al. BTEX Plume Dynamics Following an Ethanol Blend Release: Geochemical Footprint and Thermodynamic Constraints on Natural Attenuation. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 8, p. 3422-3429, Apr 15 2011. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<Go to ISI>://000289341300034 >.

DALTON, F. N. et al. Time-Domain Reflectometry - Simultaneous Measurement of Soil-Water Content and Electrical-Conductivity with a Single Probe. **Science**, v. 224, n. 4652, p. 989-990, 1984. ISSN 0036-8075. Disponível em: <<Go to ISI>://A1984SS83300032 >.

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In-situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geology Survey of Canada**, v. 75, n. 1A, p. 4, 1975.



EPA. **Drinking water advisory: Consumer acceptability advice and health effects analysis on methyl tertiary-butyl ether (MtBE)**. EPA-822-F-97-009. AGENCY, U. S. E. P.: 48 p. 1997.

\_\_\_\_\_. **Carcinogenic effects of benzene: an update**. AGENCY, U. S. E. P. Washington, DC: National Center for Environmental Assessment–Washington Office: 69 p. 1998.

EUA. **Senate bill 2095** 2004.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome and Earthscan, London. 2011

FERIS, K. et al. Effect of ethanol on microbial community structure and function during natural attenuation of benzene, toluene, and o-xylene in a sulfate-reducing aquifer. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 7, p. 2289-2294, Apr 1 2008. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<Go to ISI>://000254492800015 >.

FREITAS, J. G. **Impacts of ethanol in gasoline on subsurface contamination**. 2009. 269 (Doctor of Philosophy). Earth Sciences, University of Waterloo

FREITAS, J. G.; BARKER, J. F. Monitoring Lateral Transport of Ethanol and Dissolved Gasoline Compounds in the Capillary Fringe. **Ground Water Monitoring and Remediation**, v. 31, n. 3, p. 95-102, Sum 2011a. ISSN 1069-3629. Disponível em: <<Go to ISI>://000294041900009 >.

FREITAS, J. G.; BARKER, J. F. Oxygenated gasoline release in the unsaturated zone - Part 1: Source zone behaviour. **J Contam Hydrol**, 2011b. ISSN 01697722.

FREITAS, J. G. et al. Oxygenated gasoline release in the unsaturated zone, Part 2: Downgradient transport of ethanol and hydrocarbons. **J Contam Hydrol**, May 18 2011. ISSN 1873-6009 (Electronic) 0169-7722 (Linking).

GOMEZ, D. E.; ALVAREZ, P. J. J. Modeling the natural attenuation of benzene in groundwater impacted by ethanol-blended fuels: Effect of ethanol content on the lifespan and maximum length of benzene plumes. **Water Resour. Res.**, v. 45, n. 3, p. W03409, 2009. ISSN 0043-1397.

GOMEZ, D. E. et al. Modeling benzene plume elongation mechanisms exerted by ethanol using RT3D with a general substrate interaction module. **Water Resour. Res.**, v. 44, n. 5, p. W05405, 2008. ISSN 0043-1397.

GOMEZ, J. B., T.; CHAN, N. **An overview of the use of oxygenates in gasoline**. California Environmental Protection Agency September, p.34. 1998

HARIDY, S. A.; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R. Estimation of LNAPL saturation in fine sand using time-domain reflectometry. **Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques**, v. 49, n. 6, p. 987-1000, Dec 2004. ISSN 0262-6667. Disponível em: <<Go to ISI>://000225364500005 >.

HEERMANN, S. E.; POWERS, S. E. Modeling the partitioning of BTEX in water-reformulated gasoline systems containing ethanol. **J Contam Hydrol**, v. 34, n. 4, p. 315-341, Nov 15 1998. ISSN 0169-7722. Disponível em: <<Go to ISI>://000077497600002 >.

HENRY, E. J.; SMITH, J. E. The effect of surface-active solutes on water flow and contaminant transport in variably saturated porous media with capillary fringe effects. **J Contam Hydrol**, v. 56, n. 3-4, p. 247-270, Jun 2002. ISSN 0169-7722. Disponível em: <<Go to ISI>://000176075700006 >.

\_\_\_\_\_. Surfactant-Induced Flow Phenomena in the Vadose Zone: A Review of Data and Numerical Modeling. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 2, p. 154-167, May 2003. ISSN 1539-1663. Disponível em: <<Go to ISI>://000207557800005 >.

HUNT, J. R.; SITAR, N.; UDELL, K. S. Nonaqueous Phase Liquid Transport and Cleanup .1. Analysis of Mechanisms. **Water Resources Research**, v. 24, n. 8, p. 1247-1258, Aug 1988. ISSN 0043-1397. Disponível em: <<Go to ISI>://A1988P677200003 >.

IWATA, S.; TABUCHI, T.; WARKENTIN, B. P. **Soil-water interactions: mechanisms and applications**. M. Dekker, 1995. ISBN 9780824792930.

JONES, S. B.; WRAITH, J. M.; OR, D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 1, p. 141-153, Jan 2002. ISSN 0885-6087. Disponível em: <<Go to ISI>://000173603900009 >.

KAISER, D. R. et al. Dielectric Constant Obtained from Tdr and Volumetric Moisture of Soils in Southern Brazil. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 34, n. 3, p. 649-658, May-Jun 2010. ISSN 0100-0683. Disponível em: <<Go to ISI>://000280481000006 >.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3ª edição. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

LOVANH, N.; HUNT, C. S.; ALVAREZ, P. J. J. Effect of ethanol on BTEX biodegradation kinetics: aerobic continuous culture experiments. **Water Research**, v. 36, n. 15, p. 3739-3746, 2002. ISSN 0043-1354.

MACKAY, D. M. et al. Impact of ethanol on the natural attenuation of benzene, toluene, and o-xylene in a normally sulfate-reducing aquifer. **Environmental**

**Science & Technology**, v. 40, n. 19, p. 6123-6130, Oct 1 2006. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<Go to ISI>://000240826000052 >.

MCDOWELL, C. J.; BUSCHECK, T.; POWERS, S. E. Behavior of gasoline pools following a denatured ethanol spill. **Ground Water**, v. 41, n. 6, p. 746-757, Nov-Dec 2003. ISSN 0017-467X. Disponível em: <<Go to ISI>://000186412600009 >.

MCDOWELL, C. J.; POWERS, S. E. Mechanisms affecting the infiltration and distribution of ethanol-blended gasoline in the vadose zone. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 9, p. 1803-1810, May 1 2003. ISSN 0013-936X. Disponível em: <<Go to ISI>://000182635200033 >.

MOHAMED, A. M. O.; SAID, R. A. TDR detection of nonaqueous phase liquids in sandy soils using the eigendecomposition method. **Environmental Geology**, v. 47, n. 1, p. 30-37, Dec 2004. ISSN 0943-0105. Disponível em: <<Go to ISI>://000226205500004 >.

\_\_\_\_\_. Detection of organic pollutants in sandy soils via TDR and eigendecomposition. **J Contam Hydrol**, v. 76, n. 3-4, p. 235-249, Feb 2005. ISSN 0169-7722. Disponível em: <<Go to ISI>://000227189100004 >.

MOLSON, J. W. et al. Modeling the impact of ethanol on the persistence of benzene in gasoline-contaminated groundwater. **Water Resources Research**, v. 38, n. 1, Jan 2002. ISSN 0043-1397. Disponível em: <<Go to ISI>://000176039700004 >.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470053041.

NEWELL, C. J. et al. Light nonaqueous phase liquids. **EPA Ground Water Issue**, p. 28, 1995.

NIELSEN, D. M. **Practical handbook of environmental site characterization and ground-water monitoring**. Segunda edição. CRC/Taylor & Francis, 2006. ISBN 9781566705899.

OLIVEIRA, E. D. **Ethanol flushing of gasoline residuals - Microscale and field scale experiments**. 1997. 311 (Doctor pf Philosophy in Earth Sciences). University of Waterloo, Ontario, Canada.

OLIVEIRA, J. C. S. **Contaminação de sedimentos argilosos por combustíveis automotivos. Problema de avaliação da permeabilidade**. 2001. 102 (Doutor em geologia). Instituto de geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

PANTAZIDOU, M.; SITAR, N. Emplacement of Nonaqueous Liquids in the Vadose Zone. **Water Resources Research**, v. 29, n. 3, p. 705-722, Mar 1993. ISSN 0043-1397. Disponível em: <<Go to ISI>://A1993KP94300013 >.

PARKER, J. C. Multiphase Flow and Transport in Porous-Media. **Reviews of Geophysics**, v. 27, n. 3, p. 311-328, Aug 1989. ISSN 8755-1209. Disponível em: <Go to ISI>://A1989CB90200002 >.

PERSSON, M.; BERNDTSSON, R. Measuring nonaqueous phase liquid saturation in soil using time domain reflectometry. **Water Resources Research**, v. 38, n. 5, May 2002. ISSN 0043-1397. Disponível em: <Go to ISI>://000178935000001 >.

PETROBRAS. Composição da gasolina. Petrobras distribuidora, 2011. Disponível em: <  
<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/gasolina> >.  
Acesso em: 20 de janeiro de 2011.

RICHARDSON, T. C. **RELATIONSHIPS OF FLORIDA SANDHILL LAKE SOIL PARAMETERS WITH THE CAPILLARY FRINGE, OXIDATION-REDUCTION POTENTIAL, AND AIR ENTRY VALUES**. 2006. 161 (Mestre). University of Florida

SCHNEIDER, M. R. **Intemperismo de fontes de contaminação em aquíferos impactados por derramamentos de gasolina e álcool e a influência sobre o risco à saúde humana**. 2005. 192 (Doutor em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina

SCHWARZENBACH, R. P.; GSCHWEND, P. M.; IMBODEN, D. M. **Environmental organic chemistry**. Wiley, 2003. ISBN 9780471357506.

SILLIMAN, S. E. et al. Fluid flow and solute migration within the capillary fringe. **Ground Water**, v. 40, n. 1, p. 76-84, Jan-Feb 2002. ISSN 0017-467X. Disponível em: <Go to ISI>://000173266000010 >.

SMITH, J. E.; HENRY, E. J.; BASHIR, R. Solute-Dependent Capillarity-Induced Focused Flow during Infiltration into Alcohol-Contaminated Soil. **Vadose Zone Journal**, v. 10, n. 1, p. 403-411, Feb 2011. ISSN 1539-1663. Disponível em: <Go to ISI>://000287573300035 >.

SPALDING, R. F. et al. Long-Term Groundwater Monitoring Results at Large, Sudden Denatured Ethanol Releases. **Ground Water Monitoring and Remediation**, v. 31, n. 3, p. 69-81, Sum 2011. ISSN 1069-3629. Disponível em: <Go to ISI>://000294041900007 >.

STAFFORD, B. P. et al. Pore Water Characteristics Following a Release of Neat Ethanol onto Pre-existing NAPL. **Ground Water Monitoring and Remediation**, v. 29, n. 3, p. 93-104, Sum 2009. ISSN 1069-3629. Disponível em: <Go to ISI>://000268655500010 >.

STAFFORD, B. P.; RIXEY, W. G. Distribution of Fuel-Grade Ethanol near a Dynamic Water Table. **Ground Water Monitoring and Remediation**, v. 31, n. 3, p. 55-60, Sum 2011. ISSN 1069-3629. Disponivel em: <<Go to ISI>://000294041900005 >.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic Determination of Soil-Water Content - Measurements in Coaxial Transmission-Lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980. ISSN 0043-1397. Disponivel em: <<Go to ISI>://A1980JY13400015 >.

\_\_\_\_\_. The Early Development of TDR for Soil Measurements. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 4, p. 492-499, Nov 2003. ISSN 1539-1663. Disponivel em: <<Go to ISI>://000207558000004 >.

UNGER, A. J. A. et al. Simulating the evolution of an ethanol and gasoline source zone within the capillary fringe. **J Contam Hydrol**, v. 105, n. 1-2, p. 1-17, Feb 27 2009. ISSN 0169-7722. Disponivel em: <<Go to ISI>://000264302100001 >.

USDE. Ethanol. U.S. Department of Energy, 18 de janeiro de 2011 2011. Disponivel em: < <http://www.afdc.energy.gov> >.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a mesure of the field capacity of soil. **Soil Science**, v. 32, p. 12, 1931.



## **ANEXO 1 – ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO**





As análises correspondem às seguintes profundidades:

- D – 3050 = 40 cm
- D – 5070 = 60 cm
- D – 8090 = 85 cm
- D – 7080 = 60 cm
- D – 90100 = 95 cm
- D = 030 = 15 cm
- E – 80 = 80 cm
- E – 5060 = 55 cm
- E – 6080 = 70 cm
- F – 85100 = 93 cm
- F – 100130 = 115 cm
- F – 7085 = 78 cm





ESTADO DE SANTA CATARINA  
SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO RURAL E DA AGRICULTURA  
COMPANHIA INTEGRADA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SANTA CATARINA  
GERÊNCIA DE APOIO LABORATORIAL  
LABORATÓRIO FÍSICO QUÍMICO E BIOLÓGICO

### RELATÓRIO DE ENSAIO

|              |  |
|--------------|--|
| INTERESSADO  | : REMAS – UFSC                             |
| REMETENTE    | : REMAS – UFSC                             |
| ENDEREÇO     | : em mãos                                  |
| MUNICÍPIO    | : FLORIANÓPOLIS UF : SC                    |
| MATERIAL     | : SOLO                                     |
| DATA ENTRADA | : 30 / 07 / 2010 DATA SAÍDA : 17 08 / 2010 |

|                         |          |          |          |          |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|
| N ° LABORATÓRIO         | 2705     | 2706     | 2707     | 2708     |
| P. OUTRAS DETERMINAÇÕES | 189      | 190      | 191      | 192      |
| CÓDIGO DA AMOSTRA       | D – 3050 | D – 5070 | D – 8090 | D – 7080 |

| ENSAIOS  | RESULTADOS |       |       |       | UNIDADES |
|----------|------------|-------|-------|-------|----------|
| FERRO    | 0,025      | 0,018 | 0,049 | 0,038 | %        |
| ZINCO    | 0,56       | 0,40  | 1,80  | 1,52  | ppm      |
| MANGANÊS | 1,00       | 1,12  | 1,48  | 0,68  | ppm      |
| BORO     | 0,03       | 0,02  | 0,05  | 0,10  | ppm      |
| COBRE    | 0,35       | 0,15  | 0,25  | 0,16  | ppm      |

A amostra foi coletada pelo interessado.

  
José Maximiliano Muller Netto  
Eng. Químico CRQ 133.00002



ESTADO DE SANTA CATARINA  
SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO RURAL E DA AGRICULTURA  
COMPANHIA INTEGRADA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SANTA CATARINA  
GERÊNCIA DE APOIO LABORATORIAL  
LABORATÓRIO FÍSICO QUÍMICO E BIOLÓGICO

### RELATÓRIO DE ENSAIO

|              |  |
|--------------|--|
| INTERESSADO  | : REMAS – UFSC                             |
| REMETENTE    | : REMAS – UFSC                             |
| ENDEREÇO     | : em mãos                                  |
| MUNICÍPIO    | : FLORIANÓPOLIS UF : SC                    |
| MATERIAL     | : SOLO                                     |
| DATA ENTRADA | : 30 / 07 / 2010 DATA SAÍDA : 17 08 / 2010 |

|                         |           |         |        |          |  |
|-------------------------|-----------|---------|--------|----------|--|
| N° LABORATÓRIO          | 2709      | 2710    | 2711   | 2712     |  |
| P. OUTRAS DETERMINAÇÕES | 193       | 194     | 195    | 196      |  |
| CÓDIGO DA AMOSTRA       | D – 90100 | D – 030 | E – 80 | E – 5060 |  |

| ENSAIOS  | RESULTADOS |       |       |       | UNIDADES |
|----------|------------|-------|-------|-------|----------|
| FERRO    | 0,043      | 0,039 | 0,068 | 0,044 | %        |
| ZINCO    | 1,20       | 0,56  | 0,36  | 0,32  | ppm      |
| MANGANÉS | 2,60       | 1,96  | 0,40  | 1,08  | ppm      |
| BORO     | 0,05       | 0,10  | 0,05  | 0,06  | ppm      |
| COBRE    | 0,23       | 0,83  | 0,23  | 0,13  | ppm      |

A amostra foi coletada pelo interessado.

José Maximiliano Muller Netto  
Eng. Químico CRQ 133.00002



ESTADO DE SANTA CATARINA  
SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO RURAL E DA AGRICULTURA  
COMPANHIA INTEGRADA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SANTA CATARINA  
GERÊNCIA DE APOIO LABORATORIAL  
LABORATÓRIO FÍSICO QUÍMICO E BIOLÓGICO

## RELATÓRIO DE ENSAIO

|              |  |
|--------------|--|
| INTERESSADO  | : REMAS – UFSC                             |
| REMETENTE    | : REMAS – UFSC                             |
| ENDEREÇO     | : em mãos                                  |
| MUNICÍPIO    | : FLORIANÓPOLIS UF : SC                    |
| MATERIAL     | : SOLO                                     |
| DATA ENTRADA | : 30 / 07 / 2010 DATA SAÍDA : 17 08 / 2010 |

|                         |          |           |            |          |  |
|-------------------------|----------|-----------|------------|----------|--|
| N ° LABORATÓRIO         | 2713     | 2714      | 2715       | 2716     |  |
| P. OUTRAS DETERMINAÇÕES | 197      | 198       | 199        | 200      |  |
| CÓDIGO DA AMOSTRA       | E – 6080 | F – 85100 | F – 100130 | F – 7085 |  |

| ENSAIOS  | RESULTADOS |       |       |       | UNIDADES |
|----------|------------|-------|-------|-------|----------|
| FERRO    | 0,034      | 0,064 | 0,035 | 0,045 | %        |
| ZINCO    | 0,08       | 0,40  | 0,56  | 0,36  | ppm      |
| MANGANÊS | 2,60       | 2,20  | 3,68  | 1,08  | ppm      |
| BORO     | 0,03       | 0,07  | 0,04  | 0,07  | ppm      |
| COBRE    | 0,13       | 0,25  | 0,38  | 0,22  | ppm      |

A amostra foi coletada pelo interessado.

  
Jose Maximiliano Muller Netto  
Eng. Químico CRQ 133.00002



ESTADO DE SANTA CATARINA  
SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO RURAL E DA AGRICULTURA  
COMPANHIA INTEGRADA DE DESENVOLVIMENTO AGRÍCOLA DE SANTA CATARINA  
GERÊNCIA DE APOIO LABORATORIAL  
LABORATÓRIO FÍSICO QUÍMICO E BIOLÓGICO

### RELATÓRIO DE ENSAIO

|              |                 |      |        |            |                |
|--------------|-----------------|------|--------|------------|----------------|
| INTERESSADO  | : REMAS - UFSC  |      |        |            |                |
| REMETENTE    | : REMAS - UFSC  |      |        |            |                |
| ENDEREÇO     | : em mãos       |      |        |            |                |
| MUNICÍPIO    | : FLORIANÓPOLIS |      |        | UF         | : SC           |
| MATERIAL     | : SOLO          |      |        |            |                |
| DATA ENTRADA | : 30            | / 07 | / 2010 | DATA SAÍDA | : 17 08 / 2010 |

|                         |          |            |          |  |  |
|-------------------------|----------|------------|----------|--|--|
| N° LABORATÓRIO          | 2717     | 2718       | 2719     |  |  |
| P. OUTRAS DETERMINAÇÕES | 201      | 202        | 203      |  |  |
| CÓDIGO DA AMOSTRA       | F - 3070 | F - SUPERF | E - 1050 |  |  |

| ENSAIOS  | RESULTADOS |       |        | UNIDADES |
|----------|------------|-------|--------|----------|
| FERRO    | 0,035      | 0,022 | 0,028  | %        |
| ZINCO    | 0,40       | 0,76  | 0,28   | ppm      |
| MANGANÊS | 1,24       | 1,40  | 1,72   | ppm      |
| BORO     | 0,09       | 0,08  | TRAÇOS | ppm      |
| COBRE    | 0,45       | 0,23  | 0,11   | ppm      |

A amostra foi coletada pelo interessado.

  
Jose Maximiliano Muller Netto  
Eng. Químico CRQ 133.00002



RELATÓRIO DE ENSAIO

SOLO

Nº 1876/2010

Interessado.....: REMAS - FEESC  
Município interessado: FLORIANOPOLIS  
Remetente.....: EM MÃOS  
Localidade.....: UFSC  
Município remetente..: FLORIANOPOLIS  
Endereço remetente ..:  
Material.....: Solos  
Recebimento.....: 29/7/2010

| Determinação      | 2705/D3050 |             | 2706/D5070 |             | 2707/D8090 |             | 2708/D7080 |             | Unidade  |
|-------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|----------|
|                   | Res        | Ref         | Res        | Ref         | Res        | Ref         | Res        | Ref         |          |
| Textura           | 13.00      | Classe 4    | 12.00      | Classe 4    | 15.00      | Classe 4    | 14.00      | Classe 4    | % Argila |
| pH                | 5.20       | Baixo       | 5.70       | Medio       | 5.40       | Baixo       | 5.20       | Baixo       |          |
| Índice SMP        | 5.90       |             | 6.70       |             | 6.20       |             | 6.00       |             |          |
| Fósforo           | 6.70       | Muito Baixo | 3.10       | Muito Baixo | 2.60       | Muito Baixo | 4.00       | Muito Baixo | ppm      |
| Potássio          | 5.00       |             | 4.00       |             | 6.00       |             | 7.00       |             | ppm      |
| Mat.Orgânica      | 1.00       | Baixo       | 0.40       | Baixo       | 0.80       | Baixo       | 0.70       | Baixo       | %(m/v)   |
| Alumínio          | 0.70       |             | 0.00       |             | 0.70       |             | 0.60       |             | cmolc/l  |
| Cálcio            | 0.50       | Baixo       | 0.20       | Baixo       | 0.20       | Baixo       | 0.30       | Baixo       | cmolc/l  |
| Magnésio          | 0.40       | Baixo       | 0.00       | Baixo       | 0.10       | Baixo       | 0.10       | Baixo       | cmolc/l  |
| Sódio             | 3.00       |             | 2.00       |             | 3.00       |             | 3.00       |             | ppm      |
| H + Al            | 4.89       |             | 1.95       |             | 3.47       |             | 4.36       |             | cmolc/l  |
| Soma Bases-S      | 0.93       | Baixa       | 0.22       | Baixa       | 0.33       | Baixa       | 0.43       | Baixa       | cmolc/l  |
| CTC               | 5.82       | Média       | 2.17       | Baixa       | 3.80       | Baixa       | 4.79       | Baixa       | cmolc/l  |
| Saturação Bases-V | 15.98      | Muito Baixa | 10.14      | Muito Baixa | 8.68       | Muito Baixa | 8.98       | Muito Baixa | %        |

Obs: Interpretação conforme recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, SBCS - Núcleo Regional Sul / EMBRAPA-CNPQ, 2004.

FLORIANOPOLIS, 13 de agosto de 2010

*Jose Maximiliano Muller Netto*

Responsável pela análise  
CRQ-13-1330/002

*Luiz Carlos Xavier de Souza*  
Gerente de Apoio Laboratorial



RELATÓRIO DE ENSAIO

SOLO

Nº 1876/ 2010

Interessado.....: REMAS - FEESC  
Município interessado: FLORIANOPOLIS  
Remetente.....: EM MÃOS  
Localidade.....: UFSC  
Município remetente..: FLORIANOPOLIS  
Endereço remetente ..:  
Material.....: Solos  
Recebimento.....: 29/7/2010

| Determinação      | 2709/D90100 |             | 2710/D030 |             | 2711/E80 |             | 2712/E5060 |             | Unidade  |
|-------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|----------|-------------|------------|-------------|----------|
|                   | Res         | Ref         | Res       | Ref         | Res      | Ref         | Res        | Ref         |          |
| Textura           | 14.00       | Classe 4    | 12.00     | Classe 4    | 16.00    | Classe 4    | 12.00      | Classe 4    | % Argila |
| pH                | 5.20        | Baixo       | 5.10      | Baixo       | 5.00     | Muito baixo | 5.00       | Muito baixo |          |
| Índice SMP        | 6.00        |             | 5.60      |             | 6.00     |             | 6.00       |             |          |
| Fósforo           | 3.90        | Muito Baixo | 7.30      | Baixo       | 11.00    | Baixo       | 4.30       | Muito Baixo | ppm      |
| Potássio          | 7.00        |             | 7.00      |             | 6.00     |             | 5.00       |             | ppm      |
| Mat.Orgânica      | 0.70        | Baixo       | 1.70      | Baixo       | 0.40     | Baixo       | 1.10       | Baixo       | %(m/v)   |
| Alumínio          | 0.80        |             | 1.00      |             | 1.20     |             | 0.80       |             | cmolc/l  |
| Cálcio            | 0.40        | Baixo       | 0.40      | Baixo       | 0.00     | Baixo       | 0.10       | Baixo       | cmolc/l  |
| Magnésio          | 0.20        | Baixo       | 0.20      | Baixo       | 0.00     | Baixo       | 0.00       | Baixo       | cmolc/l  |
| Sódio             | 3.00        |             | 3.00      |             | 4.00     |             | 2.00       |             | ppm      |
| H + Al            | 4.36        |             | 6.90      |             | 4.36     |             | 4.36       |             | cmolc/l  |
| Soma Bases-S      | 0.63        | Baixa       | 0.63      | Baixa       | 0.03     | Baixa       | 0.12       | Baixa       | cmolc/l  |
| CTC               | 4.99        | Baixa       | 7.53      | Média       | 4.39     | Baixa       | 4.48       | Baixa       | cmolc/l  |
| Saturação Bases-V | 12.63       | Muito Baixa | 8.37      | Muito Baixa | 0.68     | Muito Baixa | 2.68       | Muito Baixa | %        |

Obs: Interpretação conforme recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, SBRS - Núcleo Regional Sul / EMBRAPA-CNPT, 2004.

FLORIANOPOLIS, 13 de agosto de 2010

*Jose Maximiliano Muller Netto*  
Responsável pela análise  
CRQ-13-13300002

*Luiz Carlos Xavier de Souza*  
Gerente de Apoio Laboratorial





RELATÓRIO DE ENSAIO

SOLO

Nº 1876/2010

Interessado.....: REMAS - FEESC  
Município interessado: FLORIANOPOLIS  
Remetente.....: EM MÃOS  
Localidade.....: UFSC  
Município remetente..: FLORIANOPOLIS  
Endereço remetente ..:  
Material.....: Solos  
Recebimento.....: 29/7/2010

| Determinação      | 2713/E6080 |             | 2714/F85100 |             | 2715/F100130 |             | 2716/F7085 |             | Unidade  |
|-------------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|----------|
|                   | Res        | Ref         | Res         | Ref         | Res          | Ref         | Res        | Ref         |          |
| Textura           | 9.00       | Classe 4    | 12.00       | Classe 4    | 20.00        | Classe 4    | 14.00      | Classe 4    | % Argila |
| pH                | 5.10       | Baixo       | 5.00        | Muito baixo | 5.10         | Baixo       | 5.00       | Muito baixo |          |
| Índice SMP        | 6.70       |             | 6.30        |             | 5.70         |             | 5.70       |             |          |
| Fósforo           | 2.20       | Muito Baixo | 2.60        | Muito Baixo | 1.10         | Muito Baixo | 1.60       | Muito Baixo | ppm      |
| Potássio          | 5.00       |             | 6.00        |             | 8.00         |             | 2.00       |             | ppm      |
| Mat.Orgânica      | 0.50       | Baixo       | 0.50        | Baixo       | 0.10         | Baixo       | 0.60       | Baixo       | %(m/v)   |
| Alumínio          | 0.40       |             | 0.70        |             | 1.50         |             | 0.50       |             | cmolc/l  |
| Cálcio            | 0.10       | Baixo       | 0.20        | Baixo       | 0.00         | Baixo       | 0.00       | Baixo       | cmolc/l  |
| Magnésio          | 0.00       | Baixo       | 0.00        | Baixo       | 0.00         | Baixo       | 0.00       | Baixo       | cmolc/l  |
| Sódio             | 2.00       |             | 3.00        |             | 0.00         |             | 0.00       |             | ppm      |
| H + Al            | 1.95       |             | 3.09        |             | 6.15         |             | 6.15       |             | cmolc/l  |
| Soma Bases-S      | 0.12       | Baixa       | 0.23        | Baixa       | 0.02         | Baixa       | 0.01       | Baixa       | cmolc/l  |
| CTC               | 2.07       | Baixa       | 3.32        | Baixa       | 6.17         | Média       | 6.16       | Média       | cmolc/l  |
| Saturação Bases-V | 5.80       | Muito Baixa | 6.93        | Muito Baixa | 0.32         | Muito Baixa | 0.16       | Muito Baixa | %        |

Obs: Interpretação conforme recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, SBSC - Núcleo Regional Sul / EMBRAPA-CNPQ, 2004.

FLORIANOPOLIS, 13 de agosto de 2010

Jose Maximiliano Muller Netto  
Responsável pela análise  
CRQ-13-1330002

Luiz Carlos Xavier de Souza  
Gerente de Apoio Laboratorial



RELATÓRIO DE ENSAIO

SOLO

Nº 1876/2010

Interessado.....: REMAS - FEESC  
Município interessado: FLORIANOPOLIS  
Remetente.....: EM MÃOS  
Localidade.....: UFSC  
Município remetente..: FLORIANOPOLIS  
Endereço remetente ..:  
Material.....: Solos  
Recebimento.....: 29/7/2010

| Determinação      | 2717/F3070 |             | 2718/FSUPGRF |             | 2719/E1050 |             | Res | Ref | Unidade  |
|-------------------|------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-----|-----|----------|
|                   | Res        | Ref         | Res          | Ref         | Res        | Ref         |     |     |          |
| Textura           | 13.00      | Classe 4    | 14.00        | Classe 4    | 15.00      | Classe 4    |     |     | % Argila |
| pH                | 4.90       | Muito baixo | 4.90         | Muito baixo | 4.80       | Muito baixo |     |     |          |
| Índice SMP        | 6.00       |             | 5.50         |             | 5.70       |             |     |     |          |
| Fósforo           | 2.80       | Muito Baixo | 4.30         | Muito Baixo | 3.70       | Muito Baixo |     |     | ppm      |
| Potássio          | 4.00       |             | 8.00         |             | 5.00       |             |     |     | ppm      |
| Mat.Orgânica      | 1.30       | Baixo       | 2.30         | Baixo       | 2.20       | Baixo       |     |     | %(m/v)   |
| Alumínio          | 0.80       |             | 1.10         |             | 1.00       |             |     |     | cmolc/l  |
| Cálcio            | 0.00       | Baixo       | 0.00         | Baixo       | 0.00       | Baixo       |     |     | cmolc/l  |
| Magnésio          | 0.00       | Baixo       | 0.00         | Baixo       | 0.00       | Baixo       |     |     | cmolc/l  |
| Sódio             | 0.00       |             | 5.00         |             | 3.00       |             |     |     | ppm      |
| H + Al            | 4.36       |             | 7.74         |             | 6.15       |             |     |     | cmolc/l  |
| Soma Bases-S      | 0.01       | Baixa       | 0.04         | Baixa       | 0.03       | Baixa       |     |     | cmolc/l  |
| CTC               | 4.37       | Baixa       | 7.78         | Média       | 6.18       | Média       |     |     | cmolc/l  |
| Saturação Bases-V | 0.23       | Muito Baixa | 0.51         | Muito Baixa | 0.49       | Muito Baixa |     |     | %        |

Obs: Interpretação conforme recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, SBSC - Núcleo Regional Sul / EMBRAPA-CNPT, 2004.

FLORIANOPOLIS, 13 de agosto de 2010

*Jose Maximiliano Muller Netto*  
Responsável pela análise  
CRQ-13-13300002

*Luiz Carlos Xavier de Souza*  
Gerente de Apoio Laboratorial

## **ANEXO 2 – ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO**





## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

Departamento de Engenharia Civil

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS

## ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Amostra: 2(D90 COD amostra 100)  
Interessado: REMAS-ENS  
Profundidade: 90 cm

Laboratorista: Carolina Iris  
Responsável: Marciano Maccarini  
Data: set-10

Ass. Responsável

## UMIDADE HIGROSCÓPICA

| AMOSTRA 1                 |        |        | AMOSTRA 2 |  |  | AMOSTRA TOTAL SECA (g) |                    |                                       |
|---------------------------|--------|--------|-----------|--|--|------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| CÁPSULA nº                | A08    | A08    |           |  |  |                        | AMOSTRA ÚMIDA      | 98,9 Mt (massa da amostra seca ao ar) |
| CÁPSULA + SOLOS ÚMIDO (g) | 127,90 | 127,90 |           |  |  |                        | Ps RETIDO #10      | 0                                     |
| CÁPSULA + SOLO SECO (g)   | 126,99 | 126,99 |           |  |  |                        | PASSANTE #10 ÚMIDA | 98,9                                  |
| ÁGUA                      | 0,91   | 0,91   |           |  |  |                        | PASSANTE #10 SECA  | 98,12                                 |
| CÁPSULA (g)               | 12,00  | 12,00  |           |  |  |                        | PESO DA ÁGUA       | 0,78                                  |
| SOLO SECO                 | 114,99 | 114,99 |           |  |  |                        | AMOSTRA TOTAL SECA | 98,12                                 |
| TEOR DE UMIDADE h         | 0,79%  | 0,79%  |           |  |  |                        | Mh (sedimentação)  | 98,9                                  |
| UMIDADE MÉDIA             | 0,79%  |        |           |  |  |                        |                    |                                       |

| PENEIRAMENTO | GROSSO | PENEIRAS |       | PESO PEN.<br>(g) | PE + MATE<br>(g) | MAT. RET.<br>(g) | PORCENTAGEM RETIDA |          |         | PORCENTAGEM PAS. |          |
|--------------|--------|----------|-------|------------------|------------------|------------------|--------------------|----------|---------|------------------|----------|
|              |        | Nº       | mm    |                  |                  |                  | AMOS. PAR          | AMOS. TO | ACUMUL. | AMOS. PAR.       | AMOS. TO |
|              |        | FINO     | 3"    | 76,2             |                  |                  |                    | 0        |         | 0,00%            | 0,00%    |
| 2"           | 50,8   |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 1,5"         | 38,1   |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 1"           | 25,4   |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 3/4"         | 19,1   |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 3/8"         | 9,5    |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 1/4"         | 6,4    |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 4            | 4,8    |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 8            | 2,4    |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 10           | 2      |          |       |                  |                  | 0                |                    | 0,00%    | 0,00%   |                  | 100,00%  |
| 16           | 1,19   |          | 431,5 | 431,5            | 0                | 0,00%            |                    | 0,00%    | 100,00% | 100,00%          |          |
| 30           | 0,59   |          | 358,5 | 358,7            | 0,2              | 0,20%            |                    | 0,20%    | 99,80%  | 99,80%           |          |
| 40           | 0,42   |          | 345,1 | 345,3            | 0,2              | 0,20%            |                    | 0,41%    | 99,59%  | 99,59%           |          |
| 50           | 0,3    | 356,6    | 362,5 | 5,9              | 6,01%            |                  | 6,42%              | 93,58%   | 93,58%  |                  |          |
| 70           | 0,21   | 451,8    | 458   | 6,2              | 6,32%            |                  | 12,74%             | 87,26%   | 87,26%  |                  |          |
| 100          | 0,15   | 338,9    | 376,4 | 37,5             | 38,22%           |                  | 50,96%             | 49,04%   | 49,04%  |                  |          |
| 200          | 0,074  | 328      | 364,9 | 36,9             | 37,61%           |                  | 88,56%             | 11,44%   | 11,44%  |                  |          |

## SEDIMENTAÇÃO

|   |            |   |      |
|---|------------|---|------|
| DESÍMETRO Nº  | 1          | MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DO SOLO (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,65 |
| MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS   |            | MASSA ESPECÍFICA DO MEIO DISPERSOR                      |      |
| PESO DA AMOSTRA ÚMIDA (Ph)  | 98,9       | NA TEMPERATURA DE ENSAIO POR g/cm <sup>3</sup>          | 1    |
| PESO DA AMOSTRA SECA (Ps)   | 98,12      | VOLUME DA SUSPENSÃO (cm <sup>3</sup> )                  | 1000 |
| h(COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DO MEIO DISPERSOR NA TEMPERATURA DE ENSAIO (g.s/cm <sup>2</sup> )) | 0,00000945 | MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA NA TEMPERATURA DO ENSAIO       | 1,00 |

| DATA   | HORA  | TEMPO (s) | TEMP. | LEIT. DESÍM. | ALT. QUEDA + MENISCO(cm) | COR. DO MENISCO(cm) | ALTURA DE QUEDA(cm) | LEIT. DES+COR TEMP. DEF. | «          | DIÂMETRO GRÃOS(mm) | %AMOS.COM DIAM.<D |
|--------|-------|-----------|-------|--------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|------------|--------------------|-------------------|
|        |       |           | T     | Rr           | HR + Rm                  | Rm                  | HR                  | Rc                       | Rr - Rc    | D                  | P                 |
| 22/set | 10:07 | 70        | 19,9  | 1,0100       | 18,64                    | 0,15                | 18,49               | 1,0056                   | 0,00493939 | 0,0523             | 7,22%             |
|        |       | 120       | 19,9  | 1,0099       | 18,66                    | 0,15                | 18,51               | 1,0056                   | 0,00429393 | 0,0399             | 7,05%             |
|        |       | 260       | 19,9  | 1,0098       | 18,68                    | 0,15                | 18,53               | 1,0056                   | 0,00419393 | 0,0271             | 6,89%             |
|        |       | 490       | 19,9  | 1,0097       | 17,55                    | 0,15                | 17,40               | 1,0056                   | 0,00409393 | 0,0192             | 6,72%             |
|        |       | 980       | 19,9  | 1,0097       | 17,55                    | 0,15                | 17,40               | 1,0056                   | 0,00409393 | 0,0136             | 6,72%             |
|        |       | 2462      | 19,9  | 1,0097       | 17,55                    | 0,15                | 17,40               | 1,0056                   | 0,00409393 | 0,0085             | 6,72%             |
|        |       | 3640      | 19,9  | 1,0092       | 17,64                    | 0,15                | 17,49               | 1,0056                   | 0,00359393 | 0,0071             | 5,90%             |
|        |       | 9877      | 19,9  | 1,0089       | 17,70                    | 0,15                | 17,55               | 1,0056                   | 0,00329393 | 0,0043             | 5,41%             |
|        |       | 14130     | 19,9  | 1,0089       | 17,70                    | 0,15                | 17,55               | 1,0056                   | 0,00329393 | 0,0036             | 5,41%             |
|        |       | 85287     | 20    | 1,0082       | 17,83                    | 0,15                | 17,68               | 1,0056                   | 0,00261058 | 0,0015             | 4,29%             |

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
Departamento de Engenharia Civil  
LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS

## ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Amostra: E85 Prof 1,8  
Interessado: REMAS  
Profundidade: 180 cm

Laboratorista: Carolina Iris  
Responsável: Marciano Maccarini  
Data: out-10

Ass. Responsável

## UMIDADE HIGROSCÓPICA

| AMOSTRA 1                 |        | AMOSTRA 2 |  | AMOSTRA TOTAL SECA (g) |                                      |
|---------------------------|--------|-----------|--|------------------------|--------------------------------------|
| CÁPSULA nº                | 25     | 25        |  | AMOSTRA ÚMIDA          | 109 Mt (massa da amostra seca ao ar) |
| CÁPSULA + SOLOS ÚMIDO (g) | 111,10 | 111,10    |  | Ps RETIDO #10          | 0                                    |
| CÁPSULA + SOLO SECO (g)   | 108,69 | 108,69    |  | PASSANTE #10 ÚMIDA     | 109                                  |
| ÁGUA                      | 2,41   | 2,41      |  | PASSANTE #10 SECA      | 106,25                               |
| CÁPSULA (g)               | 15,60  | 15,60     |  | PESO DA ÁGUA           | 2,75                                 |
| SOLO SECO                 | 93,09  | 93,09     |  | AMOSTRA TOTAL SECA     | 106,25                               |
| TEOR DE UMIDADE h         | 2,59%  | 2,59%     |  | Mh (sedimentação)      | 109                                  |
| UMIDADE MÉDIA             | 2,59%  |           |  |                        |                                      |

| PENEIRAMENTO | GROSSO | PENEIRAS |       | PESO PEN. (g) | PE + MATE (g) | MAT. RET. (g) | PORCENTAGEM RETIDA |          |         | PORCENTAGEM PAS. |          |
|--------------|--------|----------|-------|---------------|---------------|---------------|--------------------|----------|---------|------------------|----------|
|              |        | Nº       | mm    |               |               |               | AMOS. PAR          | AMOS.TO. | ACUMUL. | AMOS.PAR.        | AMOS.TO. |
|              |        | FINO     |       | 16            | 1,19          | 431,6         | 431,6              | 0        | 0,00%   |                  | 0,00%    |
|              |        | 30       | 0,59  | 358,5         | 358,6         | 0,1           | 0,09%              |          | 0,09%   | 99,91%           | 99,91%   |
|              |        | 40       | 0,42  | 390,6         | 390,9         | 0,3           | 0,28%              |          | 0,38%   | 99,62%           | 99,62%   |
|              |        | 50       | 0,3   | 356,5         | 364,4         | 7,9           | 7,44%              |          | 7,81%   | 92,19%           | 92,19%   |
|              |        | 70       | 0,21  | 295,5         | 307,9         | 12,4          | 11,67%             |          | 19,48%  | 80,52%           | 80,52%   |
|              |        | 100      | 0,15  | 339           | 376           | 37            | 34,82%             |          | 54,31%  | 45,69%           | 45,69%   |
|              |        | 200      | 0,074 | 328           | 362,9         | 34,9          | 32,85%             |          | 87,15%  | 12,85%           | 12,85%   |

## SEDIMENTAÇÃO

|  |            |  |   |      |
|--|------------|--|---|------|
| DESÍMETRO Nº   | 1          |  | MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS DO SOLO (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,65 |
| MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS  |            |  |   |      |
| PESO DA AMOSTRA ÚMIDA (Ph)   | 109        |  | MASSA ESPECÍFICA DO MEIO DISPERSOR                      |      |
| PESO DA AMOSTRA SECA (Ps)  | 106,25     |  | NA TEMPERATURA DO MEIO POR g/cm <sup>3</sup>            | 1    |
| μ (COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DO MEIO DISPERSOR NA TEMPERATURA DE ENSAIO (g.s/cm <sup>2</sup> )) | 0,00000945 |  | VOLUME DA SUSPENSÃO (cm <sup>3</sup> )                  | 1000 |
|  |            |  | MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA NA TEMPERATURA DO ENSAIO       | 1,00 |

| DATA   | HORA  | TEMPO (s) | TEMP. (T) | LEIT. DESÍM. (Rr) | ALT. QUEDA + MENISCO (cm) (HR + Rm) | COR. DO MENISCO (cm) (Rm) | ALTURA DE QUEDA (cm) (HR) | LEIT. DES.+COR. TEMP. DEF. (Rr - Rc) | α          | DIÂMETRO GRÃOS (mm) (D) | % AMOS. COM DIAM. < D (P) |
|--------|-------|-----------|-----------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------|-------------------------|---------------------------|
| 13/out | 10:10 | 90        | 19,9      | 1,0102            | 18,60                               | 0,15                      | 18,45                     | 1,0056                               | 0,00459393 | 0,0461                  | 6,97%                     |
|        |       | 180       | 19,9      | 1,0101            | 18,62                               | 0,15                      | 18,47                     | 1,0056                               | 0,00449393 | 0,0326                  | 6,82%                     |
|        |       | 270       | 19,9      | 1,0101            | 18,62                               | 0,15                      | 18,47                     | 1,0056                               | 0,00449393 | 0,0266                  | 6,82%                     |
|        |       | 510       | 19,9      | 1,0101            | 17,47                               | 0,15                      | 17,32                     | 1,0056                               | 0,00449393 | 0,0187                  | 6,82%                     |
|        |       | 910       | 19,9      | 1,0101            | 17,47                               | 0,15                      | 17,32                     | 1,0056                               | 0,00449393 | 0,0140                  | 6,82%                     |
|        |       | 1855      | 19,9      | 1,0101            | 17,47                               | 0,15                      | 17,32                     | 1,0056                               | 0,00449393 | 0,0098                  | 6,82%                     |
|        |       | 3869      | 19,9      | 1,0100            | 17,49                               | 0,15                      | 17,34                     | 1,0056                               | 0,00439393 | 0,0068                  | 6,66%                     |
|        |       | 6960      | 19,9      | 1,0098            | 17,53                               | 0,15                      | 17,38                     | 1,0056                               | 0,00419393 | 0,0051                  | 6,36%                     |
|        |       | 14400     | 20,2      | 1,0095            | 17,59                               | 0,15                      | 17,44                     | 1,0056                               | 0,00394422 | 0,0035                  | 5,98%                     |
|        |       | 28560     | 22        | 1,0092            | 17,64                               | 0,15                      | 17,49                     | 1,0052                               | 0,00396713 | 0,0025                  | 6,02%                     |
|        |       | 86820     | 20        | 1,0092            | 17,64                               | 0,15                      | 17,49                     | 1,0056                               | 0,00361058 | 0,0014                  | 5,48%                     |





**ANEXO 3 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE  
HIDRÁULICA DA ÁREA EXPERIMENTAL**



| <b>H1 = 5 cm</b>     |                    |   |                                       |                    |
|----------------------|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------|
| <b>N° da leitura</b> | <b>Tempo (min)</b> | <b>Nível de água no reservatório (cm)</b> | <b>Variação do nível de água (cm)</b> | <b>R1 (cm/min)</b> |
| 1                    | 0                  | 0,9                                       |                                       | 0                  |
| 2                    | 2                  | 3,5                                       | 2,6                                   | 1,30               |
| 3                    | 4                  | 4,4                                       | 0,9                                   | 0,45               |
| 4                    | 6                  | 5,6                                       | 1,2                                   | 0,60               |
| 5                    | 8                  | 7,2                                       | 1,6                                   | 0,8                |
| 6                    | 10                 | 8,3                                       | 1,1                                   | 0,55               |
| 7                    | 12                 | 9,6                                       | 1,3                                   | 0,65               |
| 8                    | 14                 | 10,9                                      | 1,3                                   | 0,65               |
| 9                    | 16                 | 12,1                                      | 1,2                                   | 0,60               |
| 10                   | 18                 | 13,3                                      | 1,2                                   | 0,60               |
| 11                   | 20                 | 14,8                                      | 1,5                                   | 0,75               |
| 12                   | 22                 | 16,0                                      | 1,2                                   | 0,60               |
| 13                   |                    |   | -                                     |                    |
| 14                   |                    |   | -                                     |                    |

|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| <b>Profundidade do poço (cm)</b>      | 79,2     |
| <b>X (cm<sup>2</sup>)</b>             | 35,22    |
| <b>R1<sub>Médio</sub> (cm/min)</b>    | 0,63     |
| <b>R2<sub>Médio</sub> (cm/min)</b>    | 7,12     |
| <b>R1<sub>Médio</sub> (cm/s)</b>      | 1,04E-02 |
| <b>R2<sub>Médio</sub> (cm/s)</b>      | 1,19E-01 |
| <b>N° de reservatórios utilizados</b> | 1        |
| <b>Ks (cm/s)</b>                      | 9,25E-04 |

| <b>H2 = 10 cm</b>    |                    |   |                                      |                    |
|----------------------|--------------------|---|--------------------------------------|--------------------|
| <b>Nº da leitura</b> | <b>Tempo (min)</b> | <b>Nível de água no reservatório (cm)</b> | <b>Varição do nível de água (cm)</b> | <b>R2 (cm/min)</b> |
| <b>1</b>             | 0                  | 9,3                                       |                                      | 0,00               |
| <b>2</b>             | 2                  | 21,6                                      | 12,3                                 | 6,15               |
| <b>3</b>             | 4                  | 35,4                                      | 13,8                                 | 6,90               |
| <b>4</b>             | 6                  | 50,0                                      | 14,6                                 | 7,30               |
| <b>5</b>             | 8                  | 64,3                                      | 14,3                                 | 7,15               |
| <b>6</b>             |                    |   | -                                    |                    |
| <b>7</b>             |                    |   | -                                    |                    |
| <b>8</b>             |                    |   | -                                    |                    |
| <b>9</b>             |                    |   | -                                    |                    |
| <b>10</b>            |                    |   | -                                    |                    |
| <b>11</b>            |                    |   | -                                    |                    |
| <b>12</b>            |                    |   | -                                    |                    |
| <b>13</b>            |                    |   | -                                    |                    |
| <b>14</b>            |                    |   | -                                    |                    |

R1 – Velocidade da água no reservatório 1

R2 – Velocidade da água no reservatório 2

Ks – Condutividade hidráulica saturada

X – Constante de reservatório, fornecida pelo fabricante

De acordo com o manual do equipamento, a condutividade hidráulica saturada é dada por:

$$K_s = 0,0041 \cdot X \cdot \overline{R2} - 0,0054 \cdot X \cdot \overline{R1}$$

## **ANEXO 4 – ESTIMATIVA DA ALTURA DA FRANJA CAPILAR**



A partir da Equação 1, com os dados de tensão superficial da água ( $\sigma = 0,07197$  N/m), massa específica da água ( $\rho = 996$  kg/m<sup>3</sup>) e aceleração da gravidade ( $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>), tem-se:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot r} = \frac{1,4732 \cdot 10^{-5}}{r}$$

Como em campo o solo é heterogêneo e o tubo capilar pode variar de diâmetro, optou-se por utilizar os seguintes valores de  $r$ :

| <b>Profundidade</b> | <b><math>d_{50}</math> (m)</b> | <b><math>0,155 * d_{50}</math> (m)</b> | <b><math>0,414 * d_{50}</math> (m)</b> |
|---------------------|--------------------------------|--|--|
| 60 cm               | 0,00015                        | 0,000023                               | 0,0000621                              |
| 90 cm               | 0,00012                        | 0,000019                               | 0,0000497                              |
| 180 cm              | 0,00014                        | 0,000021                               | 0,0000580                              |

A partir destes valores de  $r$ , substituiu-se na Equação 1 para encontrar o valor da franja capilar:

| <b>Profundidade</b> | <b><math>h_{d50}</math> (m)</b> | <b><math>h_{0,155*d50}</math> (m)</b> | <b><math>h_{0,414*d50}</math> (m)</b> |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 60 cm               | 0,0982                          | 0,6336                                | 0,2372                                |
| 90 cm               | 0,1228                          | 0,7920                                | 0,2965                                |
| 180 cm              | 0,1052                          | 0,6789                                | 0,2542                                |





**ANEXO 5 – MONITORAMENTO DAS FRAÇÕES DE ETANOL  
EM CAMPO**



| <b>Tempo<br/>(dias)</b> | <b>Nível<br/>(m)</b> | <b>Constante<br/>dielétrica (-)</b> | <b>Fração de<br/>etanol (%)</b> |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 0                       | 0,6                  | 16,999                              | 52,87                           |
| 0                       | 0,6                  | 12,998                              | 69,07                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,655                               | 82,62                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,655                               | 82,62                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,542                               | 83,08                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,542                               | 83,08                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,542                               | 83,08                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,542                               | 83,08                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,429                               | 83,53                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,429                               | 83,53                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,373                               | 83,76                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,373                               | 83,76                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,373                               | 83,76                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,373                               | 83,76                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,317                               | 83,98                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,317                               | 83,98                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,317                               | 83,98                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,262                               | 84,21                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,262                               | 84,21                           |
| 0                       | 0,6                  | 9,262                               | 84,21                           |
| 0                       | 0,6                  | 8,611                               | 86,84                           |
| 0                       | 0,6                  | 7,308                               | 92,12                           |
| 0                       | 0,6                  | 7,121                               | 92,88                           |
| 1                       | 0,6                  | 5,874                               | 97,93                           |
| 1                       | 0,6                  | 5,874                               | 97,93                           |
| 1                       | 0,6                  | 5,874                               | 97,93                           |
| 1                       | 0,6                  | 5,874                               | 97,93                           |
| 1                       | 0,6                  | 5,874                               | 97,93                           |
| 2                       | 0,6                  | 5,416                               | 99,79                           |
| 2                       | 0,6                  | 5,416                               | 99,79                           |
| 2                       | 0,6                  | 5,416                               | 99,79                           |

| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 2                   | 0,6              | 5,416                           | 99,79                       |
| 2                   | 0,6              | 5,380                           | 99,93                       |
| 2                   | 0,6              | 5,416                           | 99,79                       |
| 2                   | 0,6              | 5,380                           | 99,93                       |
| 5                   | 0,6              | 5,131                           | 100,94                      |
| 5                   | 0,6              | 5,165                           | 100,80                      |
| 5                   | 0,6              | 5,131                           | 100,94                      |
| 6                   | 0,6              | 5,096                           | 101,08                      |
| 6                   | 0,6              | 5,096                           | 101,08                      |
| 6                   | 0,6              | 5,096                           | 101,08                      |
| 6                   | 0,6              | 5,096                           | 101,08                      |
| 6                   | 0,6              | 5,096                           | 101,08                      |
| 7                   | 0,6              | 4,960                           | 101,63                      |
| 7                   | 0,6              | 4,994                           | 101,50                      |
| 7                   | 0,6              | 4,960                           | 101,63                      |
| 9                   | 0,6              | 4,861                           | 102,03                      |
| 9                   | 0,6              | 4,894                           | 101,90                      |
| 9                   | 0,6              | 4,894                           | 101,90                      |
| 12                  | 0,6              | 4,764                           | 102,43                      |
| 12                  | 0,6              | 4,764                           | 102,43                      |
| 12                  | 0,6              | 4,764                           | 102,43                      |
| 16                  | 0,6              | 4,994                           | 101,50                      |
| 16                  | 0,6              | 4,994                           | 101,50                      |
| 16                  | 0,6              | 4,960                           | 101,63                      |
| 25                  | 0,6              | 16,737                          | 53,93                       |
| 25                  | 0,6              | 16,737                          | 53,93                       |
| 25                  | 0,6              | 16,737                          | 53,93                       |
| 30                  | 0,6              | 18,206                          | 47,98                       |
| 30                  | 0,6              | 18,285                          | 47,66                       |
| 30                  | 0,6              | 18,206                          | 47,98                       |
| 0                   | 0,9              | 19,501                          | 42,74                       |

| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 0                   | 0,9              | 17,501                          | 50,84                       |
| 0                   | 0,9              | 17,001                          | 52,86                       |
| 0                   | 0,9              | 17,001                          | 52,86                       |
| 0                   | 0,9              | 16,701                          | 54,08                       |
| 0                   | 0,9              | 16,701                          | 54,08                       |
| 0                   | 0,9              | 16,701                          | 54,08                       |
| 0                   | 0,9              | 16,701                          | 54,08                       |
| 0                   | 0,9              | 16,701                          | 54,08                       |
| 0                   | 0,9              | 16,701                          | 54,08                       |
| 1                   | 0,9              | 15,690                          | 58,17                       |
| 1                   | 0,9              | 15,838                          | 57,57                       |
| 1                   | 0,9              | 15,690                          | 58,17                       |
| 1                   | 0,9              | 15,543                          | 58,77                       |
| 1                   | 0,9              | 15,690                          | 58,17                       |
| 1                   | 0,9              | 15,690                          | 58,17                       |
| 1                   | 0,9              | 15,616                          | 58,47                       |
| 1                   | 0,9              | 15,616                          | 58,47                       |
| 1                   | 0,9              | 15,616                          | 58,47                       |
| 1                   | 0,9              | 15,616                          | 58,47                       |
| 1                   | 0,9              | 15,616                          | 58,47                       |
| 1                   | 0,9              | 15,543                          | 58,77                       |
| 1                   | 0,9              | 15,543                          | 58,77                       |
| 1                   | 0,9              | 15,397                          | 59,36                       |
| 1                   | 0,9              | 15,397                          | 59,36                       |
| 1                   | 0,9              | 15,397                          | 59,36                       |
| 1                   | 0,9              | 15,397                          | 59,36                       |
| 2                   | 0,9              | 12,744                          | 70,11                       |
| 2                   | 0,9              | 12,744                          | 70,11                       |
| 2                   | 0,9              | 12,744                          | 70,11                       |
| 2                   | 0,9              | 12,744                          | 70,11                       |
| 2                   | 0,9              | 12,744                          | 70,11                       |

| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 2                   | 0,9              | 12,678                          | 70,37                       |
| 2                   | 0,9              | 12,744                          | 70,11                       |
| 2                   | 0,9              | 12,678                          | 70,37                       |
| 2                   | 0,9              | 12,678                          | 70,37                       |
| 2                   | 0,9              | 12,678                          | 70,37                       |
| 2                   | 0,9              | 12,678                          | 70,37                       |
| 5                   | 0,9              | 12,024                          | 73,02                       |
| 5                   | 0,9              | 12,088                          | 72,76                       |
| 5                   | 0,9              | 12,088                          | 72,76                       |
| 6                   | 0,9              | 11,767                          | 74,06                       |
| 6                   | 0,9              | 11,767                          | 74,06                       |
| 6                   | 0,9              | 11,767                          | 74,06                       |
| 6                   | 0,9              | 11,704                          | 74,32                       |
| 6                   | 0,9              | 11,640                          | 74,58                       |
| 7                   | 0,9              | 10,955                          | 77,35                       |
| 7                   | 0,9              | 11,016                          | 77,10                       |
| 7                   | 0,9              | 10,772                          | 78,09                       |
| 7                   | 0,9              | 10,772                          | 78,09                       |
| 9                   | 0,9              | 8,933                           | 85,54                       |
| 9                   | 0,9              | 8,987                           | 85,32                       |
| 9                   | 0,9              | 8,933                           | 85,54                       |
| 12                  | 0,9              | 7,645                           | 90,76                       |
| 12                  | 0,9              | 7,645                           | 90,76                       |
| 12                  | 0,9              | 7,645                           | 90,76                       |
| 12                  | 0,9              | 7,645                           | 90,76                       |
| 12                  | 0,9              | 7,645                           | 90,76                       |
| 16                  | 0,9              | 13,146                          | 68,48                       |
| 16                  | 0,9              | 13,146                          | 68,48                       |
| 16                  | 0,9              | 13,079                          | 68,48                       |
| 25                  | 0,9              | 17,581                          | 50,51                       |
| 25                  | 0,9              | 17,581                          | 50,51                       |

| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 25                  | 0,9              | 17,581                          | 50,51                       |
| 30                  | 0,9              | 20,157                          | 36,94                       |
| 30                  | 0,9              | 20,157                          | 36,94                       |
| 30                  | 0,9              | 20,157                          | 36,94                       |
| 0                   | 1,2              | 21,650                          | 34,04                       |
| 0                   | 1,2              | 21,410                          | 35,01                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,331                          | 35,33                       |
| 0                   | 1,2              | 21,252                          | 35,65                       |
| 0                   | 1,2              | 21,252                          | 35,65                       |
| 0                   | 1,2              | 21,252                          | 35,65                       |
| 0                   | 1,2              | 21,252                          | 35,65                       |
| 1                   | 1,2              | 20,650                          | 38,09                       |
| 1                   | 1,2              | 20,410                          | 39,06                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |

| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,331                          | 39,38                       |
| 1                   | 1,2              | 20,252                          | 39,70                       |
| 1                   | 1,2              | 20,252                          | 39,70                       |
| 1                   | 1,2              | 20,252                          | 39,70                       |
| 1                   | 1,2              | 20,252                          | 39,70                       |
| 2                   | 1,2              | 20,351                          | 39,30                       |
| 2                   | 1,2              | 20,351                          | 39,30                       |
| 2                   | 1,2              | 20,351                          | 39,30                       |
| 2                   | 1,2              | 20,341                          | 39,34                       |
| 2                   | 1,2              | 20,341                          | 39,34                       |
| 2                   | 1,2              | 20,341                          | 39,34                       |
| 2                   | 1,2              | 20,272                          | 39,62                       |
| 2                   | 1,2              | 20,272                          | 39,62                       |
| 2                   | 1,2              | 20,272                          | 39,62                       |
| 2                   | 1,2              | 20,262                          | 39,66                       |
| 2                   | 1,2              | 20,262                          | 39,66                       |
| 2                   | 1,2              | 20,262                          | 39,66                       |
| 2                   | 1,2              | 20,193                          | 39,94                       |



| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 2                   | 1,2              | 20,193                          | 39,94                       |
| 2                   | 1,2              | 20,183                          | 39,98                       |
| 2                   | 1,2              | 20,117                          | 40,25                       |
| 5                   | 1,2              | 19,635                          | 42,20                       |
| 5                   | 1,2              | 19,467                          | 42,88                       |
| 5                   | 1,2              | 19,467                          | 42,88                       |
| 6                   | 1,2              | 18,364                          | 47,34                       |
| 6                   | 1,2              | 18,364                          | 47,34                       |
| 6                   | 1,2              | 18,364                          | 47,34                       |
| 6                   | 1,2              | 18,285                          | 47,66                       |
| 6                   | 1,2              | 18,285                          | 47,66                       |
| 7                   | 1,2              | 18,206                          | 47,98                       |
| 7                   | 1,2              | 18,128                          | 48,30                       |
| 7                   | 1,2              | 18,128                          | 48,30                       |
| 7                   | 1,2              | 18,128                          | 48,30                       |
| 9                   | 1,2              | 17,892                          | 49,25                       |
| 9                   | 1,2              | 17,814                          | 49,57                       |
| 9                   | 1,2              | 17,814                          | 49,57                       |
| 12                  | 1,2              | 16,965                          | 53,01                       |
| 12                  | 1,2              | 17,042                          | 52,70                       |
| 12                  | 1,2              | 17,299                          | 53,01                       |
| 16                  | 1,2              | 17,299                          | 52,42                       |
| 16                  | 1,2              | 17,299                          | 52,42                       |
| 16                  | 1,2              | 20,395                          | 52,42                       |
| 25                  | 1,2              | 20,235                          | 35,65                       |
| 25                  | 1,2              | 20,395                          | 36,51                       |
| 25                  | 1,2              | 23,941                          | 35,65                       |
| 30                  | 1,2              | 23,941                          | 16,45                       |
| 30                  | 1,2              | 23,941                          | 16,45                       |
| 30                  | 1,2              | 17,299                          | 16,45                       |
| 0                   | 1,5              | 22,731                          | 29,65                       |

| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 0                   | 1,5              | 22,616                          | 30,12                       |
| 0                   | 1,5              | 22,560                          | 30,34                       |
| 0                   | 1,5              | 22,560                          | 30,34                       |
| 1                   | 1,5              | 22,402                          | 30,99                       |
| 1                   | 1,5              | 22,316                          | 31,33                       |
| 1                   | 1,5              | 22,316                          | 31,33                       |
| 1                   | 1,5              | 22,231                          | 31,68                       |
| 1                   | 1,5              | 22,231                          | 31,68                       |
| 1                   | 1,5              | 22,231                          | 31,68                       |
| 1                   | 1,5              | 22,146                          | 32,03                       |
| 1                   | 1,5              | 22,060                          | 32,37                       |
| 1                   | 1,5              | 22,060                          | 32,37                       |
| 1                   | 1,5              | 21,975                          | 32,71                       |
| 1                   | 1,5              | 21,975                          | 32,71                       |
| 1                   | 1,5              | 21,891                          | 33,06                       |
| 2                   | 1,5              | 20,798                          | 35,45                       |
| 2                   | 1,5              | 20,715                          | 35,45                       |
| 2                   | 1,5              | 21,300                          | 35,45                       |
| 2                   | 1,5              | 21,300                          | 35,45                       |
| 2                   | 1,5              | 21,300                          | 35,45                       |
| 2                   | 1,5              | 21,216                          | 35,79                       |
| 2                   | 1,5              | 21,216                          | 35,79                       |
| 2                   | 1,5              | 21,216                          | 35,79                       |
| 2                   | 1,5              | 21,216                          | 35,79                       |
| 2                   | 1,5              | 21,216                          | 35,79                       |
| 2                   | 1,5              | 21,216                          | 35,79                       |
| 2                   | 1,5              | 21,132                          | 36,13                       |
| 5                   | 1,5              | 21,135                          | 36,13                       |
| 5                   | 1,5              | 21,135                          | 36,13                       |
| 5                   | 1,5              | 21,135                          | 36,13                       |
| 6                   | 1,5              | 21,552                          | 34,43                       |

| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Nível (m)</b> | <b>Constante dielétrica (-)</b> | <b>Fração de etanol (%)</b> |
|---------------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 6                   | 1,5              | 21,552                          | 34,43                       |
| 6                   | 1,5              | 21,637                          | 34,09                       |
| 6                   | 1,5              | 21,552                          | 34,43                       |
| 6                   | 1,5              | 21,552                          | 34,43                       |
| 7                   | 1,5              | 21,132                          | 36,13                       |
| 7                   | 1,5              | 21,132                          | 36,13                       |
| 7                   | 1,5              | 21,132                          | 36,13                       |
| 7                   | 1,5              | 21,132                          | 36,13                       |
| 9                   | 1,5              | 20,632                          | 38,16                       |
| 9                   | 1,5              | 20,715                          | 37,82                       |
| 9                   | 1,5              | 20,715                          | 37,82                       |
| 12                  | 1,5              | 19,001                          | 44,76                       |
| 12                  | 1,5              | 18,921                          | 45,09                       |
| 12                  | 1,5              | 19,162                          | 44,11                       |
| 16                  | 1,5              | 20,549                          | 40,37                       |
| 16                  | 1,5              | 19,601                          | 39,95                       |
| 16                  | 1,5              | 19,601                          | 39,52                       |
| 16                  | 1,5              | 19,601                          | 39,95                       |
| 25                  | 1,5              | 22,848                          | 22,37                       |
| 25                  | 1,5              | 22,848                          | 22,37                       |
| 25                  | 1,5              | 22,848                          | 22,37                       |
| 30                  | 1,5              | 23,856                          | 16,91                       |
| 30                  | 1,5              | 23,856                          | 16,91                       |
| 30                  | 1,5              | 23,856                          | 16,91                       |