

RISCO AMBIENTAL DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM UM DEPÓSITO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL, DO TIPO 7A, NO SOLO

Celso de Oliveira Loureiro¹; Eduardo Chapadeiro² & Helio Alexandre Lazarim³

Resumo - Apresenta-se neste trabalho uma avaliação sobre o risco ambiental de poluição das águas subterrâneas devido a um depósito de óleo combustível do tipo 7A, instalado em uma trincheira escavada no solo, a baixa profundidade e sem nenhuma medida de impermeabilização e drenagem, onde foram enterrados cerca de 1.100 tambores metálicos, com um total de aproximadamente 220.000 litros do material poluente. O material depositado é formado por uma mistura contendo principalmente os rejeitos do óleo combustível 7A, misturados com impurezas diversas. O estudo teve, como objetivo, fazer um diagnóstico do problema, a fim de se selecionar, de uma maneira racional e conservativa, as medidas mitigadoras, corretivas e de controle mais adequadas a serem adotadas no local, com o propósito de reduzir os riscos à saúde e ao meio ambiente. O trabalho foi realizado em duas partes: inicialmente foi desenvolvido um modelo hidrogeológico computacional preliminar sobre o escoamento das águas subterrâneas no local, utilizando-se do pacote de simulação VisualMODFLOW; em seguida, tomando-se como base um cenário conservativo de utilização futura da área, foi feita uma análise do respectivo risco ambiental, utilizando-se da metodologia RBCA ("*Risk Based Corrective Action*").

Palavras-chave - RBCA, risco ambiental, óleo combustível

¹ Ph.D., Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

e-mail: celso@desa.ufmg.br - endereço: DESA - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Escola de Engenharia da UFMG - Av. do Contorno, 842 Centro – 7º Andar - Belo Horizonte - MG 30.110-060 - tel. (31) 238-1884 - Fax. (31) 238-1879

² M.Sc., Geólogo - e-mail: ECHAPADEIRO@brandt.com.br - endereço: Brandt Meio Ambiente - Av. Uruguaí, 13 / 8º e 9º andar - Belo Horizonte, MG 30.310-300 - Tel.: (31) 281-2258 - Fax.: (31) 225-6929

1. INTRODUÇÃO

De uma maneira geral, a remediação definitiva de locais poluídos com produtos derivados de petróleo, nos casos envolvendo a contaminação do solo e das águas subterrâneas, implica em grandes dificuldades técnicas e operacionais, com custos financeiros quase sempre extremamente altos. De fato, as dificuldades e os custos encontrados nestes procedimentos podem ser de tal monta que venham a impor tremendas barreiras à sua realização, podendo até mesmo inviabilizá-los. Assim sendo, uma questão decisória importante que se coloca nestes cenários é determinar os limites dos procedimentos de remediação a serem adotados, que podem variar desde a ação nula, em um extremo, até a remediação completa do sítio afetado.

Neste contexto, o conceito do risco ambiental se constitui em um dos parâmetros determinantes no processo de tomada de decisões, onde se busca estabelecer um conjunto de providências e procedimentos de remediação, de tal modo a atingir uma situação na qual o risco ao meio ambiente e à saúde humana esteja abaixo dos limites considerados aceitáveis pela população.

Com o propósito de auxiliar na definição dos procedimentos de remediação de um caso específico de poluição do solo, desenvolveu-se, neste trabalho, uma avaliação sobre o risco ambiental devido a um depósito de óleo combustível do tipo 7A, instalado, no primeiro semestre de 1997, em uma trincheira de cerca de 340 m², escavada no solo, a baixa profundidade e sem nenhuma medida de impermeabilização e drenagem. No local foram enterrados cerca de 1.100 tambores metálicos, de 200 litros cada, com um total de aproximadamente 220.000 litros do material poluente. O material depositado é formado por uma mistura contendo principalmente os rejeitos do óleo combustível 7A, misturados com impurezas diversas. Trata-se de um material pastoso, com densidade maior do que a da água e de elevada viscosidade à temperatura ambiente.

O estudo teve, como objetivo, fazer um diagnóstico do problema, seguido de uma análise de risco ambiental com a aplicação do método RBCA (Risk Based Corrective Action), a fim de se selecionar, de uma maneira racional e conservativa, as medidas mitigadoras, corretivas e de controle mais adequadas a serem adotadas no local, de modo a reduzir os riscos à saúde e ao meio ambiente. O trabalho foi dividido em duas partes: inicialmente foi desenvolvido um modelo hidrogeológico computacional preliminar sobre o escoamento das águas subterrâneas no local, utilizando-se do pacote de

³ M.Sc., Geólogo Engenheiro - e-mail: gab@golder.com.br - endereço: Golder Associates Brasil Ltda. - Rua Gonçalves Dias, 3.172 – 3º - Belo Horizonte, MG 30.140-093 - Tel.: (31) 275-2417 - Fax.: (31) 291-9649

simulação VisualMODFLOW (Franz e Guiguer, 1997); em seguida, tomando-se como base um cenário conservativo de utilização futura da área, foi feita uma análise do respectivo risco ambiental, utilizando-se da metodologia RBCA.

2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO PROBLEMA

2.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL DO DEPÓSITO

A área objeto deste estudo está localizada em região cárstica com a presença marcante de dolinas, afloramentos calcários, paredões, sumidouros e surgências. Mais especificamente, em termos hidrológicos, a área em estudo é definida por uma micro-bacia hidrográfica delimitada conforme a Figura 2.1, com uma superfície total de aproximadamente 3,7 Km².

O local escolhido para a deposição dos tambores com o óleo combustível 7A está situado no extremo norte da área de estudo, em um segmento do terreno com declividade média de 20%, no sentido norte-sul, e a uma cota média aproximada de 807 metros (Figura 2.1). Neste local, foi escavada uma trincheira retangular, orientada na direção norte-sul, com cerca de 340 m² de área (17×20 metros) e com uma profundidade variável, estimada em torno de 3 metros, no limite sul, e em torno de 7 metros no limite norte do enclave.

De acordo com informações verbais, a vala não foi impermeabilizada e nem foram instalados sistemas de drenagem superficial e de fundo. Os 1.100 tambores, com um total de 220.000 litros do óleo, foram depositados no fundo desta vala e cobertos com o material original do solo, resultando em uma camada de cobertura com uma espessura também variável, mas estimada em torno de 1 metro, no limite sul, e em torno 4 metros no limite norte do enclave.

Não se tem uma informação precisa sobre o estado físico de conservação dos tambores, nem de sua estanqueidade, na época em que foram depositados. Neste contexto, desconhece-se tanto o nível de corrosão das paredes dos tambores quanto a existência de eventuais furos e vazamentos e, até mesmo, se eles foram depositados fechados com suas respectivas tampas ou não. Desta maneira, não se pode dizer com certeza sobre as condições atuais em que se encontra o óleo depositado. Acredita-se, no entanto, que pelo menos uma parte do óleo tenha vazado e derramado diretamente no fundo da vala, misturando-se com o material do solo utilizado na cobertura do enclave, formando aí uma zona de contaminação com a fase livre do produto.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DEPOSITADO

O material orgânico oleoso presente nos tambores depositados no local é proveniente de uma fábrica localizada nas imediações da área de estudo e se constitui em um rejeito formado ao longo do tempo devido ao recolhimento das perdas do óleo combustível 7A, derramado eventualmente durante os procedimentos normais da fábrica. O óleo, assim misturado com terra e outros materiais encontrados no piso da fábrica resulta em um material pastoso escuro, denso e muito viscoso.

No seu estado puro, o óleo combustível 7A se apresenta com uma densidade maior do que a da água, $\rho_o = 1,0211$ kg/L, e com uma altíssima viscosidade dinâmica, $\mu_o = 429.456,0$ cP, a 50 °C. Em condições de temperatura ambiente e com a presença das impurezas e dos demais materiais estranhos existentes na mistura, o produto orgânico contaminante presente nos tambores deve se apresentar com uma viscosidade ainda maior. Desta maneira, pode-se estimar que a mobilidade da fase livre do produto contaminante em qualquer material do solo é cerca de, pelo menos, $4,3 \times 10^5$ menor do que a mobilidade da água, o que implica, para todos os efeitos práticos, em uma total imobilidade da fase livre do produto no meio poroso do solo.

Não se tem uma informação detalhada sobre a composição química do óleo combustível 7A. Sabe-se, no entanto, que na sua composição predominam os hidrocarbonetos de cadeia longa, variando entre C19 a C25. Tipicamente estes compostos contêm cerca de 15 a 40% de hidrocarbonetos aromáticos pesados, dominados pelos fenantrenos alquilados e naftalinas [ASTM-95]. A presença dos hidrocarbonetos aromáticos leves, tais como os compostos BTEX, ou seja, benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos, normalmente é muito pequena.

De acordo com a metodologia RBCA, aplicável aos casos de contaminação ambiental com produtos derivados de petróleo, os indicadores adequados para a avaliação do risco ambiental incluem os produtos BTEX, mais a naftalina e o benzo-a-pireno. Assim, para efeito deste estudo, e na falta de uma informação mais detalhada, será assumida a presença dos compostos BTEX no óleo combustível 7A, com uma fração molar de 1% para cada um dos produtos. Para o caso dos aromáticos pesados, será assumida uma fração molar de 5% para a naftalina e para o benzo-a-pireno.

3. MODELO HIDROGEOLÓGICO

3.1. MODELO CONCEITUAL

A área de estudo localiza-se em planalto cárstico, próximo do contato de rochas carbonáticas com rochas do embasamento cristalino (granito-gnaisses). As altitudes variam entre 890 e 700 metros aproximadamente. O embasamento cristalino ocorre abaixo da cota 730 metros, estando sotoposto às rochas carbonáticas na porção centro norte da área de estudo. Coberturas sedimentares de provável idade fanerozóica recobrem discordantemente os litótipos citados acima. Trata-se de depósitos aluvionários (planície de inundação do ribeirão situado ao sul) e coluvionários (materiais siltsosos contendo porções argilosas), cujas espessuras atingem 25 metros.

Na área de estudo são definidas três unidades hidroestratigráficas coincidentes aos litótipos e depósitos sedimentares existentes. A unidade hidroestratigráfica relacionada às rochas do embasamento cristalino apresenta, em geral, caráter aquífero. Porém, são encontradas zonas aquíferas condicionadas às regiões onde a densidade de fraturamento dessas rochas é mais elevada, por conseqüência estão em estreita relação com as principais direções de drenagens da área, quais sejam: N-S, E-W e NE-SW.

A unidade hidroestratigráfica relacionada às rochas carbonáticas apresenta caráter cárstico, bem marcado pela presença de dolinas e de uma surgência de água subterrânea posicionada na cota de 736 metros. A presença de condutos subterrâneos proporciona uma alta permeabilidade neste material.

A unidade hidroestratigráfica coincidente aos depósitos sedimentares fanerozóicos estão na porção centro-sul da área de estudo, acima da zona saturada de água subterrânea, servindo, neste caso, como via de recarga do sistema de fluxo existente. Junto à bacia hidrográfica do ribeirão, os depósitos aluvionários apresentam elevados valores de condutividade hidráulica.

3.2. MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL

O modelo conceitual sobre a hidrogeologia local, conforme descrito acima, foi adaptado em um modelo matemático computacional, utilizando-se do pacote de simulação VisualMODFLOW [FRANZ e GUIGER, 1997]. Para tal, foi elaborado um modelo estacionário, interpretativo, em um domínio de cálculo tridimensional com 4 camadas horizontais distintas, de espessuras variáveis entre as cotas de 670 e 890 metros.

Os resultados previstos pelo modelo hidrogeológico preliminar da área de estudo estão apresentados nas Figuras 3.1 a 3.3. Como pode ser observado na Figura 3.1, a distribuição potenciométrica do aquífero freático se apresenta com gradientes hidráulicos

suaves em quase toda a sua extensão, exceto na sua parte mais ao sul da bacia de drenagem. Sob o local do depósito, o nível d'água se encontra a uma cota de aproximadamente 744,5 metros, ou seja, a cerca de 62,5 metros abaixo do nível médio do terreno (807 metros).

O escoamento da água subterrânea tem uma direção preferencial de norte para sul, com variações locais relacionadas à heterogeneidade dos materiais litológicos (Figura 3.2). Sob o depósito, o gradiente hidráulico é de $2,53E-3$ m/m, o que resulta em uma velocidade de escoamento de 0,0097 m/dia direcionada de noroeste para sudeste.

O caminamento e o tempo de transporte de um poluente dissolvido na água, a partir de um ponto no lençol freático localizado exatamente sob o depósito do óleo, desconsiderando qualquer interação de retardo com o meio, estão representados na Figura 3.3. De acordo com estas estimativas, uma partícula poluente lançada no lençol freático no ponto sob o depósito tem o seu caminamento direcionado para o local das surgências, com um tempo de transporte de aproximadamente 20 anos.

Um resumo dos resultados previstos pelo modelo hidrogeológico, no segmento do aquífero próximo ao local do depósito, é apresentado na Tabela 3.1.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO RBCA - AÇÃO CORRETIVA COM BASE NO RISCO

4.1 - APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA

O conceito de quantificação do risco à espécie humana, devido à exposição aos compostos derivados do petróleo, e a sua aplicação nos processos de tomada de decisão relativos à remediação de locais contaminados foram sistematizados através de um princípio analítico/operacional denominado "Risk Based Corrective Action", ou Ação Corretiva com Base no Risco. Mais conhecido pela abreviatura RBCA (pronuncia-se "Rebeca"), o princípio da ação corretiva com base no risco foi implantado pela ASTM - American Society for Testing and Materials, em um conjunto de normas [ASTM 94, 95, 96, 98a, 98b] tendo como motivação principal a necessidade de racionalizar o problema da remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos derivados de petróleo, principalmente combustíveis.

A norma americana ASTM E1739-95, intitulada "Guia Padrão para a Ação Corretiva, com Base no Risco, Aplicada em Locais Contaminados com Derivados de Petróleo" (*Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*), apresenta a base da metodologia RBCA, conforme será apresentada resumidamente a seguir.

O método da RBCA consiste em uma série progressiva de etapas de coletas de dados e de avaliações de risco, com cada etapa referindo-se a um diferente nível de complexidade. As análises variam de simples a complexas na medida em que se tornam necessárias. As aproximações e as hipóteses adotadas nas etapas anteriores são substituídas por novas informações e dados específicos sobre o local. Após a avaliação de cada etapa, os resultados e recomendações anteriores são revistos e uma nova decisão é tomada no sentido de iniciar as eventuais ações corretivas ou mitigadoras, ou de se avançar para um novo nível de complexidade na análise do problema, buscando-se novas informações sobre o local e novos métodos de análise.

A seqüência das principais linhas de ação e de tomadas de decisões associadas com a metodologia da RBCA está representada no fluxograma mostrado na Figura 4.1 e pode ser resumida nos seguintes estágios:

1. avaliação inicial do local;
2. classificação do local e implementação de uma ação corretiva inicial;
3. primeira etapa de avaliação;
4. segunda etapa de avaliação;
5. terceira etapa de avaliação; e,
6. programa de ação corretiva.

4.2. AVALIAÇÃO INICIAL DO LOCAL

As informações colhidas sobre o local, junto com as observações feitas in loco e as medidas de laboratório efetuadas indicam claramente que a extensão da contaminação ambiental, naquele sítio, está confinada aos limites imediatos da área de depósito. Não são observados odores específicos dos produtos hidrocarbonetos na área.

Nas condições atuais, não há nenhuma evidência da presença de atividades humanas rotineiras nas imediações do local do depósito. A presença humana mais próxima está localizada fazenda vizinha, a cerca de 1000 metros a sudeste do local. No entanto, com o propósito de dar continuidade a esta análise de risco, com um **enfoque essencialmente conservativo**, será aqui assumido um cenário hipotético de utilização futura da área, definido como sendo o de uma **família residente no local** com as seguintes características:

- casa construída sobre a área;

- consumo de água subterrânea local (poço perfurado no local);
- consumo de produtos hortifrutigranjeiros obtidos no local;
- crianças brincando na área (ingestão de partículas do solo); e,
- submetida a potenciais caminhos críticos de contaminação.

4.3. CLASSIFICAÇÃO DO LOCAL - IMPLEMENTAÇÃO DE AÇÃO CORRETIVA INICIAL

De acordo com a avaliação feita, o local do depósito não apresenta nenhum risco imediato, nem à saúde humana, nem à segurança física das pessoas e instalações em geral, e nem ao meio ambiente. Consequentemente, não há a necessidade de implementação de uma ação corretiva de emergência, podendo qualquer decisão neste sentido aguardar os resultados de uma avaliação dos cenários futuros de utilização do terreno.

Com base no cenário hipotético de utilização futura da área, e considerando as condições existentes no local do depósito, o caminho crítico mais significativo de exposição dos membros da família à contaminação ambiental seria aquele relativo à ingestão de água subterrânea contaminada.

4.4. PRIMEIRA ETAPA DE AVALIAÇÃO DO RISCO

4.4.1 - HIPÓTESES BÁSICAS:

1. devido à sua alta viscosidade, a fase livre do produto não se move significativamente além dos limites inferiores do local do depósito;
2. a região contaminada está restrita ao local original do depósito;
3. a água da chuva infiltra através da zona contaminada em um movimento descendente essencialmente vertical;
4. a água infiltrada, em contato com a fase livre do óleo presente no meio poroso do solo, se encontra em uma condição de equilíbrio termodinâmico com o material contaminante; nesta condição, as concentrações dos componentes solúveis na água são determinadas pelo limite de solubilidade efetiva de cada componente, definido pelo produto da solubilidade do componente puro e a sua fração molar na mistura do óleo;

5. a diluição das concentrações dos componentes na água, causada pela contribuição lateral das águas do aquífero, após a chegada dos contaminantes no lençol freático, não é considerada;
6. os componentes adotados como indicadores da contaminação são os compostos BTEX, a naftalina e o benzo-a-pireno.

4.4.2 – ROTEIRO:

1. determinação da máxima concentração na água, na região de contaminação, na zona vadosa, considerando os componentes indicadores da mistura, quais sejam: BTEX, naftalina e benzo-a-pireno;
2. determinação do tempo de transporte dos componentes, devido à infiltração vertical, desde o local do depósito até o lençol d'água situado sob a zona contaminada;
3. determinação do fator de atenuação da concentração dos componentes durante o transporte vertical desde a zona contaminada até o lençol d'água; cálculo da concentração dos componentes na água, no momento de chegada no lençol subterrâneo;
4. comparação dos valores obtidos nas concentrações de chegada com os valores definidos como os Níveis de Triagem com Base no Risco - RBSL ("Risk-Based Screening Level"); e,
5. determinação do índice de risco denominado Índice Segura, representando a relação entre o tempo de redução natural da concentração dos componentes aos limites de potabilidade (Valor Máximo Permitido) e o tempo de chegada dos contaminantes ao lençol subterrâneo.

4.4.3 - DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO RISCO

1. Concentração máxima dos componentes, de ordem i, na fase aquosa da zona vadosa em contato com a região contaminada

Em condição de equilíbrio termodinâmico, a concentração máxima de um componente de ordem i na fase aquosa é dada por:

$$C_{a,i} = S_{e,i} = \gamma_i S_i \quad (4.1)$$

onde, $C_{a,i}$ = concentração máxima do componente i na água, na zona contaminada, em [mg/L]; $S_{e,i}$ = solubilidade efetiva do componente i na água, em [mg/L]; S_i = solubilidade do

componente i na água, em [mg/L]; γ_i = fração molar do componente i na mistura do óleo, [adimensional].

Na ausência de informações específicas sobre a composição química do óleo combustível 7A, será assumido um valor da fração molar de 1% para os compostos BTEX e de 5% para a naftalina e o benzo-a-benzeno. Assim, os resultados da avaliação das concentrações máximas dos componentes em questão, na água em contato com a fase livre do óleo, são apresentados na Tabela 4.1.

2. Determinação do tempo de transporte (chegada) dos componentes, devido à lixiviação pelas águas da chuva e a infiltração vertical, desde o local do depósito até o lençol d'água situado sob a zona contaminada.

O tempo de transporte, ou o tempo total de chegada, do componente i até o lençol subterrâneo pode ser representado pela seguinte expressão:

$$t_{c,i} = \frac{1}{I} \sum_{k=1}^3 Z_k \theta_k R_{k,i} \quad (4.2)$$

onde, $t_{c,i}$ = tempo total de chegada do componente i até o lençol subterrâneo, passando através das três camadas, de índice k , do terreno, em [dias]; Z_k = espessura da camada de índice k do terreno, em [m]; θ_k = conteúdo volumétrico médio de água na camada de índice k do terreno, [adimensional]; $R_{k,i}$ = fator de retardamento do componente de ordem i , na camada de ordem k , [adimensional]; I = infiltração média diária de água, em [m/dia].

Os resultados das avaliações hidrogeológicas indicaram que, sob o local do depósito, situado na cota média de 807 metros, o nível da água do lençol freático está na cota de 744,5 metros, ou seja, a uma profundidade de cerca de 62,50 metros abaixo da superfície de terreno. Considerando que a base da área do depósito esteja situada a uma profundidade de três metros da superfície, os contaminantes lixiviados pela água de infiltração, na zona contaminada, terão de percorrer uma distância vertical de cerca de 58,5 metros até atingirem o lençol freático.

Neste segmento da zona não saturada do solo a ser percorrido pelos contaminantes, desde a base do depósito até o nível d'água subterrânea, foram identificados três trechos distintos correspondendo às respectivas camadas litológicas e com as seguintes espessuras: o primeiro segmento, inserido na camada superficial de colúvio, com 1 metro de espessura; o segundo segmento, no interior da camada inferior do colúvio, com 15 metros de espessura; e, finalmente, o último segmento de 42,5 metros de espessura, dentro da camada de calcário (Figura 4.3).

A recarga média anual de água especificamente sobre a área de localização do depósito foi estimada através do modelo hidrogeológico em cerca de 260 mm, o que corresponde a uma infiltração média de $7,12 \times 10^{-4}$ m/d. Em condições de equilíbrio, com uma infiltração média constante, o conteúdo volumétrico da água nas camadas litológicas da zona não saturada pode ser avaliado pela seguinte expressão:

$$q_k = n_k \left(\frac{I}{K_{\text{sat}_k}} \right)^{\frac{1}{2b_k + 3}} \quad (4.3)$$

onde, θ_k = conteúdo volumétrico de água na camada de índice k do terreno, [adimensional]; K_{sat_k} = condutividade hidráulica saturada, na camada de índice k do terreno, em [m/d]; I = infiltração média, em [m/d]; n_k = porosidade total, na camada de índice k do terreno, [adimensional]; e, b_k = coeficiente característico da camada de índice k do terreno, [adimensional]. Os valores do conteúdo volumétrico médio de água, nas diversas camadas litológicas, avaliados de acordo com a expressão anterior são apresentados na Tabela 4.2.

Os valores de $R_{k,i}$, ou seja do fator de retardamento do componente de ordem i , na camada de ordem k , são determinados pela seguinte expressão:

$$R_{k,i} = 1 + \frac{\rho_{b_k} K_{d_{k,i}}}{\theta_k} \quad (4.4)$$

sendo que o coeficiente de distribuição, $K_{d_{k,i}}$, é dado por [Segura, 1997]:

$$K_{d_{k,i}} = \frac{0,58 \times f_{\text{mo}_k} \times K_{\text{oc}_i}}{\rho_w} \quad (4.5)$$

onde, $R_{k,i}$ = fator de retardamento do transporte do componente i na camada k , [adimensional]; $K_{d_{k,i}}$ = coeficiente de partição sólido-água, do componente i na camada k , em [L/kg]; ρ_{b_k} = densidade seca do material da camada k , em [L/kg]; K_{oc_i} = coeficiente de partição água-carbono orgânico no solo, relativo ao componente i , [adimensional]; f_{mo_k} = fração em peso da matéria orgânica na camada k , [adimensional]; θ_k = conteúdo volumétrico de água na camada de índice k do terreno, [adimensional]; e, ρ_a = densidade da água, em [L/kg]. Os valores dos parâmetros especificamente relacionados aos materiais do solo, quais sejam, ρ_{b_k} , f_{mo_k} e θ_k , são apresentados na Tabela 4.3. Por outro lado, os valores do parâmetro especificamente relacionado aos componentes contaminantes, qual seja, K_{oc_i} , coeficiente de partição água-carbono orgânico, são apresentados na Tabela 4.4.

Desta maneira, os valores do coeficiente de distribuição, $K_{d-k,i}$, e do fator de retardamento, $R_{k,i}$, relativos aos diversos componentes do óleo e às três camadas do meio, foram calculados pelas expressões anteriores e são apresentados na Tabela 4.5.

Finalmente, conhecendo-se os valores das espessuras das camadas, Z_k , do conteúdo volumétrico, θ_k , da taxa de infiltração, I , e do fator de retardamento, $R_{k,i}$, os tempos de chegada até o lençol freático, $t_{c,i}$, de cada componente i , podem ser avaliados (Equação 4.2); os seus respectivos valores são apresentados na Tabela 4.6.

3. Determinação do fator de atenuação, $F_{at,i}$; cálculo da concentração dos componentes, no momento de chegada no lençol freático, $C_{c,i}$.

O fator de atenuação do componente i , $F_{at,i}$, é dado pela seguinte expressão:

$$F_{at,i} = \frac{C_{c,i}}{C_{a,i}} = \left(-\frac{0,693 \times t_{c,i}}{t_{1/2,i}} \right) \quad (4.6)$$

onde, $C_{a,i}$ = concentração máxima do componente i na água, na zona contaminada, em [mg/L]; $C_{c,i}$ = concentração do componente i , no momento de chegada junto ao lençol freático, em [mg/L]; $t_{c,i}$ = tempo total de chegada do componente i até o lençol subterrâneo, em [dias]; e, $t_{1/2,i}$ = meia vida do componente i no solo, em [dias]. Os resultados da avaliação das concentrações máximas dos componentes na água, em contato com a fase livre do óleo, são apresentados na Tabela 4.7.

4. Comparação dos valores obtidos nas concentrações de chegada com os valores definidos como os Níveis de Triagem com Base no Risco - RBSL (“Risk-Based Screening Level”).

Os valores do RBSL - Níveis de Triagem com Base no Risco, relativos ao consumo de água subterrânea podem ser avaliados com as seguintes expressões [ASTM-95]:

para os compostos carcinogênicos (benzeno e benzo-a-pireno):

$$RBSL_w = \frac{TR \times BW \times AT_c \times 365}{SF_o \times IR_w \times EF \times ED} \quad (4.7)$$

e, para os compostos não carcinogênicos (TEX - tolueno, etil-benzeno e xilenos):

$$RBSL_w = \frac{THQ \times R_f \times D_o \times BW \times AT_n \times 365}{IR_w \times EF \times ED} \quad (4.8)$$

onde, $RBSL_w$ = nível básico de concentração na água, ou nível de triagem com base no risco, em [mg/L-água]; TR = risco adicional individual de câncer, [adimensional]; BW = peso do corpo de um adulto, em [Kg]; AT_c = tempo de distribuição do risco (“averaging

time”) para os compostos carcinogênicos, em [ano]; AT_n = tempo de distribuição do risco (“averaging time”) para os compostos não-carcinogênicos, em [ano]; SF_o = fator de proporcionalidade (“slope factor”) para câncer por via oral, em [kg-dia/mg]; IR_w = taxa de ingestão diária de água, em [L/dia]; EF = frequência de exposição, em [dias/ano]; ED = duração de exposição, em [anos]; THQ = coeficiente de perigo para os constituintes individuais não-carcinogênicos, [adimensional]; e, RfD_o = dose crônica de referência por via oral, em [mg/kg-dia].

Desta maneira, os valores dos RBSL calculados com base nas expressões acima são apresentados na Tabela 4.8. Finalmente, a comparação dos valores das concentrações de chegada com os valores dos RBSLw pode ser feita com os resultados apresentados, em resumo, na Tabela 4.9.

5. Determinação do índice de risco denominado Índice Segura.

O índice de risco denominado **Índice Segura**, IS_i , é definido como a relação entre o tempo de redução natural da concentração do componente i ao limite de potabilidade (valor máximo permitido), VMP_i , e o seu respectivo tempo de chegada ao lençol freático. Assim, o IS_i é representado pela seguinte expressão [Segura, 1997]:

$$IS_i = \frac{t_{f,i}}{t_{c,i}} \quad (4.9)$$

onde, $t_{f,i}$ = tempo de atenuação natural da concentração do componente i ao limite de potabilidade (valor máximo permitido), em [dias]; e, $t_{c,i}$ = tempo total de chegada do componente i até o lençol subterrâneo, em [dias].

Com base nesta definição, a avaliação do Índice Segura é feita de acordo com o seguinte critério:

$$IS \begin{cases} > 1 \rightarrow \text{alto risco} \\ \approx 1 \rightarrow \text{risco médio ; e,} \\ < 1 \rightarrow \text{pequeno risco .} \end{cases} \quad (4.10)$$

A atenuação da concentração do componente i na água, até o valor máximo permitido, VMP , pode ser representado pela expressão [Segura, 1997]:

$$VMP_i = C_{a,i} \times \exp\left(-\frac{0,693 \times t_{f,i}}{t_{1/2,i}}\right) \quad (4.11)$$

Conseqüentemente, o tempo de atenuação natural da concentração do componente i ao limite de potabilidade, $t_{f,i}$, é dado por:

$$t_{f,i} = \frac{t_{1/2,i}}{0,693} \ln \left(\frac{C_{a,i}}{VMP_i} \right) \quad (4.12)$$

Os resultados obtidos na avaliação do Índice Segura são apresentados na Tabela 4.10.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre o risco ambiental de poluição das águas subterrâneas devido a um depósito de óleo combustível do tipo 7A, enterrado no solo. Os resultados obtidos com a análise do problema permitem chegar às seguintes conclusões:

- 1- para o caso dos compostos tolueno, etil-benzeno e xilenos, os valores estimados de RBSLw; , apresentados na Tabela 4.9, são maiores do que os limites máximos de concentração representados pela solubilidade efetiva, não podendo assim serem atingidos;
- 2- as concentrações de chegada de todos os componentes, no ponto de consumo junto ao nível do lençol freático, são muito menores do que os valores de triagem representados pelos RBSLw;
- 3- os resultados obtidos na avaliação do Índice Segura, apresentados na Tabela 4.10, são muito menores do que 1,0, para todos os componentes avaliados, o que implica em um risco desprezível de contaminação do lençol freático;
- 4- conseqüentemente, o cenário mais rigoroso (conservativo) concebido para o local, qual seja, aquele relativo a um consumo direto da água subterrânea obtida exatamente abaixo do local do depósito, apresenta um risco muito pequeno de impacto à saúde humana;
- 5- de acordo com os critérios RBCA, o risco envolvido neste cenário está abaixo dos limites normalmente aceitáveis pela sociedade e pode ser considerado desprezível; e,
- 6- ainda de acordo com os critérios RBCA, e assumindo que o risco envolvido neste cenário rigoroso de utilização do terreno seja aceitável, torna-se desnecessário avançar para uma etapa mais exigente do processo de análise, ficando apenas a questão de verificar a necessidade de estabelecer um programa de monitoramento e de medidas de controle institucional sobre o local do depósito.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM - E1599-94, *Guide for Corrective Action for Petroleum Releases*, American Society for Testing and Materials, EUA, 1995.
- ASTM - E1739-95, *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*, American Society for Testing and Materials, EUA, 1995.
- ASTM - PS85-96, *Standard Provisional Guide for Expedited Site Characterization of Hazardous Waste Contaminated Sites*, American Society for Testing and Materials, EUA, 1995.
- ASTM - PS104-98, *Standard Provisional Guide for Risk-Based Corrective Action*, American Society for Testing and Materials, EUA, 1998.
- ASTM - E1912-98 *Standard Guide for Accelerated Site Characterization for Confirmed or Suspected Petroleum Releases*, American Society for Testing and Materials, EUA, 1995.
- CLAPP, R.B. e HORNBERGER, G.M., *Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties*, Water Resources Resource, v.14, pg.601-604, 1978.
- CONSIDINE, D.M., *Energy Technology Handbook*. McGraw -Hill Book Company, New York, EUA, 1977.
- FRANZ, T. e N. GUIGUER. *VisualMODFLOW - User's Manual*. Waterloo Hydrogeologic Software, Canada, 1997.
- SEGURA, J.H.S., *Avaliação da Vulnerabilidade da Água Subterrânea à Contaminação com Praguicidas (Uma Proposta Metodológica)*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte, MG. 1997.

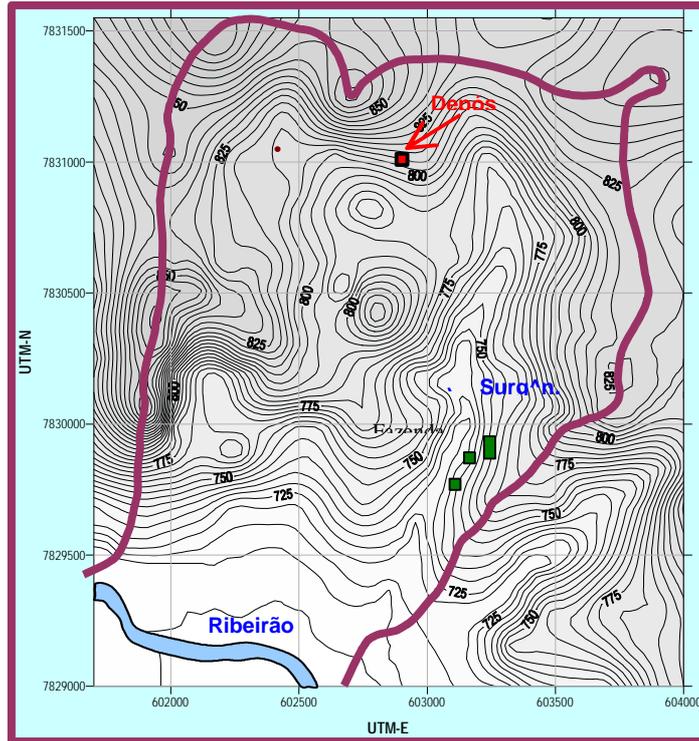


Figura 2.1: Representação topográfica aproximada da área de estudo, com a identificação dos limites de drenagem da bacia hidrográfica.

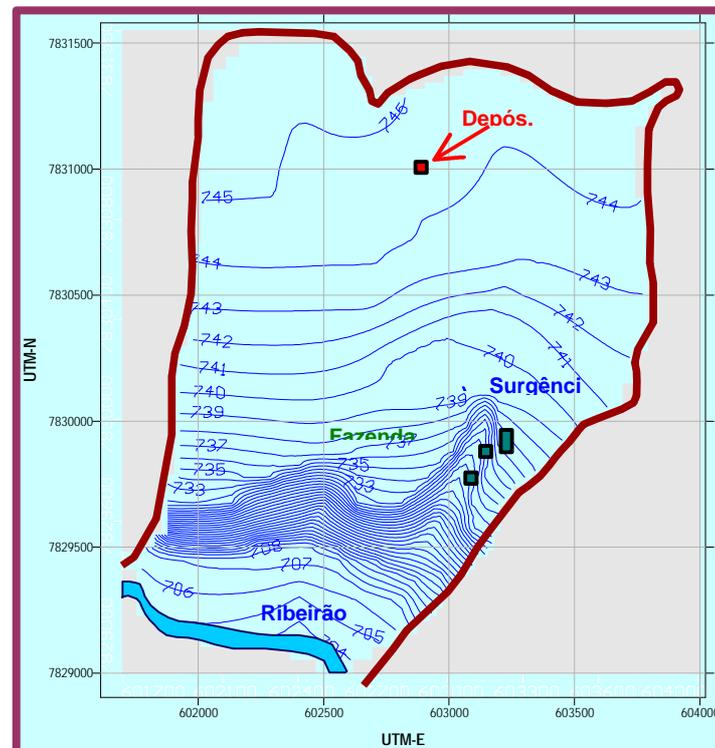


Figura 3.1: Representação potenciométrica da área de estudo, com a identificação dos limites de drenagem da bacia hidrográfica local e a distribuição dos níveis isopotenciométricos do lençol freático (em metros).

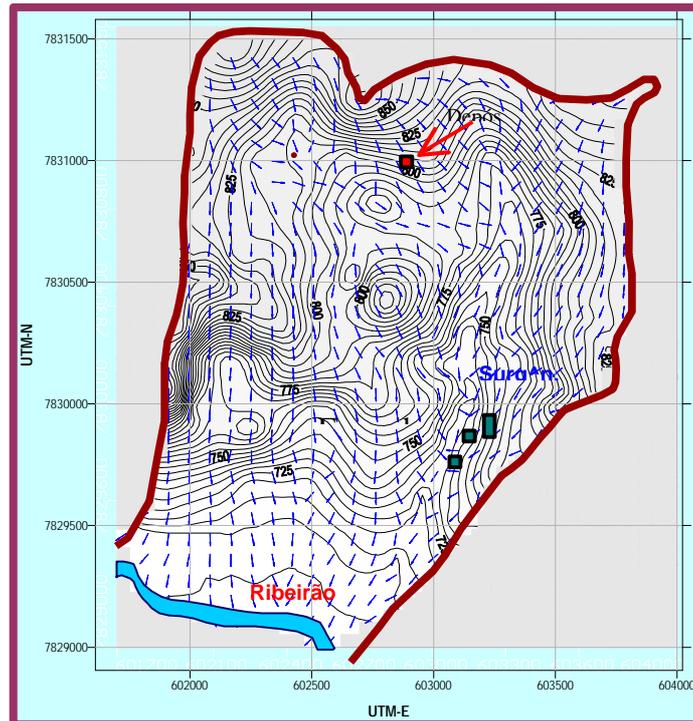


Figura 3.2: Representação da direção de escoamento das águas subterrâneas (setas em azul), com a identificação da distribuição topográfica e dos limites de drenagem da bacia hidrográfica local.

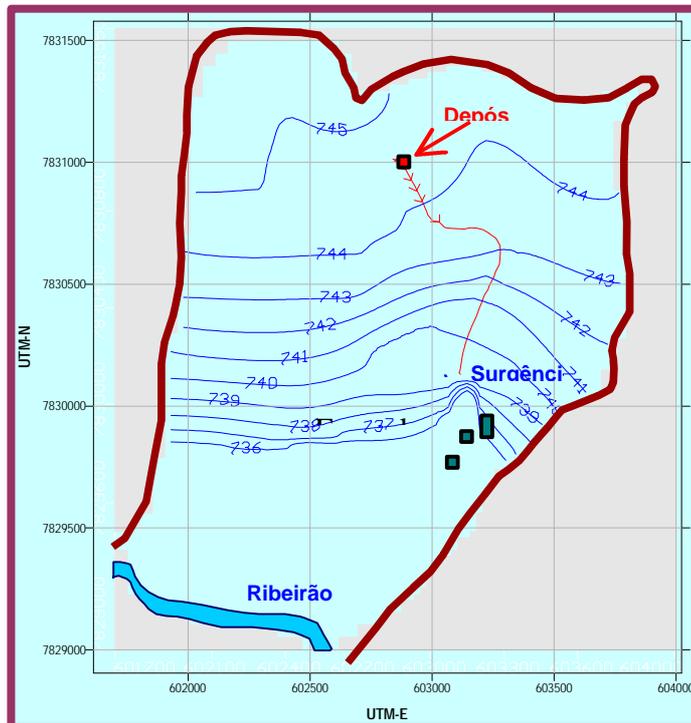


Figura 3.3: Representação do caminhamento (linha vermelha) de uma partícula liberada na superfície do lençol freático, em um ponto localizado sob a área de depósito do óleo. Os intervalos entre as marcas na linha de percurso da partícula representam um tempo de transporte de quatro anos. Identificação da distribuição isotopométrica (entre os níveis de 736 a 745 metros) e dos limites de drenagem da bacia hidrográfica local.

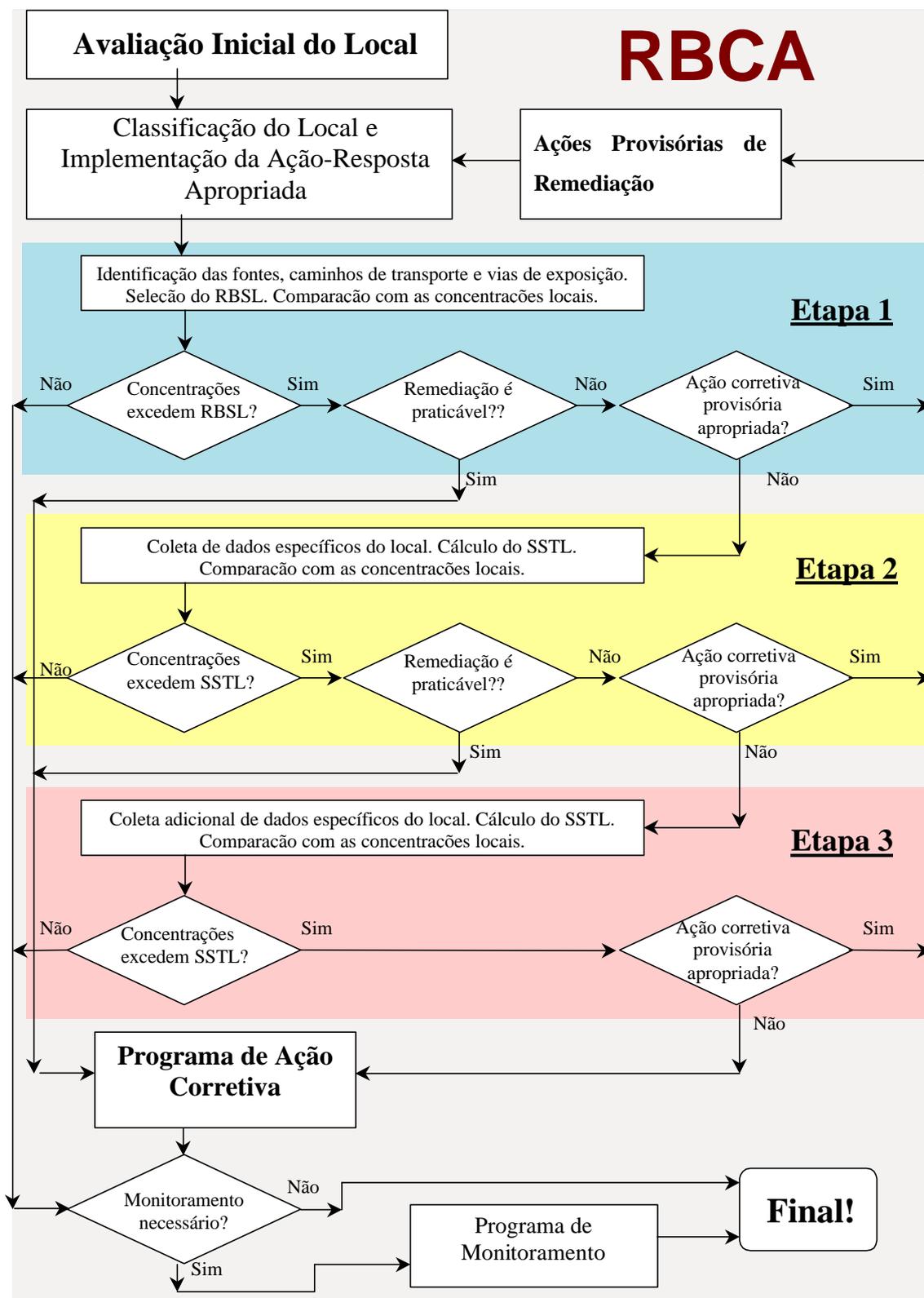


Figura 4.1: Fluxograma da metodologia RBCA

TABELA 3.1: Dados gerais de caracterização do local do enclave contaminante.

Propriedades	Símbolo	Unidade	Valor	Observações
Infiltração	I	m/ano	0,26	Valor da recarga ajustada, no modelo hidrogeológico, para a área do depósito
Gradiente hidráulico do aquífero	$\Delta H/\Delta x$	m/m	2,56E-3	Valor médio estimado pelo modelo na região do aquífero freático sob o local do depósito.
Velocidade de escoamento do aquífero	q	m/dia	0,0097	Valor médio estimado pelo modelo na região do aquífero freático sob o local do depósito. (Velocidade de Darcy : $q=3,5$ m/ano)
Velocidade real da água no aquífero	v	m/dia	0,0278	Valor médio estimado pelo modelo na região do aquífero freático sob o local do depósito. ($v = q/n$)
Área de drenagem da bacia hidrográfica	A_{bh}	Km ²	3,7	
Área do depósito	A_{dep}	m ²	340	Valor estimado = (20×17 m ²)

TABELA 4.1: Concentração máxima dos componentes na água, na zona contaminada do solo.

Propriedades	Símb.	Unid.	Componente						Observações
			Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno	
Solubilidade	S_i	mg/L	1750	535	152	198	31	0,0012	[ASTM-95]
Fração molar	γ_i	--	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05	Valores adotados arbitrariamente.
Concentração máxima na água	$C_{a,i}$	mg/L	17,5	5,35	1,52	1,98	1,55	6,0E-5	Valores máximos estimados na zona contaminada

TABELA 4.2: Conteúdo volumétrico de água nas camadas litológicas sob a zona contaminada.

Propriedades	Símb.	Unid.	Camadas Litológicas			Observações
			Colúvio 1	Colúvio 2	Calcário	
Porosidade total	n_k	-	0,45	0,50	0,35	Valor típico [Clapp et.al.,78]
Cond. hidráulica	K_{sat-k}	m/d	0,4	0,3	3,8	Valor de calibração.
Coefficiente do meio	b_k	-	7,5	7,5	4,7	Valor típico [Clapp et.al.,78]
Infiltração	I	m/d	7,12E-4	7,12E-4	7,12E-4	Valor de calibração.
Cont. volumétrico	θ_k	-	0,316	0,357	0,175	Valores estimados

TABELA 4.3: Parâmetros especificamente relacionados às camadas do solo.

Propriedades	Símbolo	Unid.	Camadas Litológicas			Observações
			Colúvio 1	Colúvio 2	Calcário	
Espessura da camada	Z_k	M	1,0	15,0	42,5	Valores estimados
Densidade seca	ρ_{b-k}	kg/L	1,46	1,33	1,72	Valores estimados com base na porosidade total e na densidade do sólido, ρ_s
Fração em peso da matéria orgânica	f_{mo-k}	-	0,02	0,01	0,001	Valores estimados [Segura, 1987]
Conteúdo volumétrico	θ_k	-	0,316	0,357	0,175	Valores estimados acima.

TABELA 4.4: Parâmetros relacionados apenas aos componentes contaminantes.

Propriedades	Símbolo	Unid.	Componente						Observação
			Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno	
$\text{Log}(K_{oc-i})$	-	-	1,58	2,13	1,96	2,38	3,11	5,59	[ASTM-95]
Coeficiente de partição água-carbono orgânico	K_{oc-i}	-	38,02	134,90	91,20	239,88	1,28E3	3,89E5	-

TABELA 4.5: Coeficientes de distribuição, $K_{d-k,i}$, relativos aos componentes, i, nas camadas litológicas sob a zona contaminada.

Camadas Litológicas	Propriedades											
	Benzeno		Tolueno		Etil-Benzeno		Xilenos		Naftalina		Benzo-a-pireno	
	$K_{d-k,i}$ [L/kg]	$R_{k,i}$ [-]										
Colúvio 1	0,44	3,03	1,56	8,21	1,06	5,90	2,78	13,84	14,94	70,03	4,5E3	2,1E4
Colúvio 2	0,22	1,82	0,78	3,91	0,53	2,97	1,39	6,18	7,47	28,83	2,3E3	8,4E3
Calcário	0,02	1,2	0,08	1,79	0,05	1,49	0,14	2,38	0,75	8,37	2,3E2	2,2E3

TABELA 4.6: Determinação do tempo de chegada $t_{c,i}$, de cada componente.

Camadas Litológicas	Tempo de Chegada - $t_{c,i}$ [dias]					
	Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno
Colúvio 1	1,34E3	3,64E3	2,62E3	6,14E3	3,11E4	9,23E6
Colúvio 2	1,37E4	2,94E4	2,23E4	4,65E4	2,17E5	6,32E7
Calcário	1,25E4	1,87E4	1,56E4	2,48E4	8,74E4	2,32E7
Total	2,75E4	5,17E4	4,05E4	7,74E4	3,36E5	9,56E7

TABELA 4.7: Fator de atenuação, $F_{at,i}$, e concentrações de chegada dos componentes, $C_{c,i}$.

Propriedades	Símb.	Unid.	Componente						Observações
			Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno	
Tempo de chegada	$t_{c,i}$	Dias	2,75E4	5,17E4	4,05E4	7,74E4	3,36E5	9,56E7	Valores calculados
Meia vida	$t_{1/2,i}$	Dias	700	63	228	365	258	1058	[ASTM-95]
Fator de atenuação	$F_{at,i}$	-	1,3E-11	» 0	» 0	» 0	» 0	» 0	Valores calculados
Conc. Máx. na zona contamin.	$C_{a,i}$	mg/L	17,5	5,35	1,52	1,98	1,55	6,0E-5	Valores máximos estimados
Concentração de chegada	$C_{c,i}$	mg/L	2,3E-10	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	

TABELA 4.8: Determinação dos valores do RBSL - Níveis de Triagem com Base no Risco, relativos ao consumo de água subterrânea.

Propriedades	Unid.	Valor	Valores dependentes dos componentes						Observações
			Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno	
BW	Kg	70							[ASTM-95]
AT _c	ano	70							[ASTM-95]
TR	ano	1,0E-6							[ASTM-95]
IR _w	L/dia	2							[ASTM-95]
EF	dia/ano	365							[ASTM-95]
ED	ano	30							[ASTM-95]
SF _o	Kg.d/mg		0,029					7,3	[ASTM-95]
Propriedades	Unid.	Valor	Valores dependentes dos componentes						Observações
			Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno	
RBSL_w	mg/L		2,82E-3					1,12E-5	Relativo aos compostos carcinogênicos
THQ	-	1							[ASTM-95]
AT _n	Ano	30							[ASTM-95]
R _i D _o	mg/kg.dia			0,2	0,1	2,0	0,004		[ASTM-95]
RBSL_w	mg/L			7,0	3,5	70,0	0,14		Relativo aos compostos não-carcinogênicos

TABELA 4.9: Comparação dos valores das concentrações de chegada com os valores de RBSL_w.

Propriedades	Símb.	Unid.	Componente						Observações
			Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno	
Nível de Triagem com Base no Risco	RBSL _w	mg/L	2,82E-3	7,0	3,5	70,0	0,14	1,15E-5	Valores calculados
Solubilidade efetiva (máxima)	S _e	mg/L	17,5	5,35	1,52	1,98	1,55	6,0E-5	Valores máximos estimados de solubilidade.
Nível de Triagem com Base no Risco (Valor efetivo)	RBSL _w (Efetivo)	mg/L	2,82E-3	>S _e	>S _e	>S _e	0,14	1,15E-5	Valores efetivos, levando em conta a solubilidade máxima.
Concentração de chegada	C _{c,i}	mg/L	2,3E-10	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	

TABELA 4.10: Avaliação do Índice Segura (Segura, 1997).

Propriedades	Símb.	Unid.	Componente						Observações
			Benzeno	Tolueno	Etil-Benzeno	Xilenos	Naftalina	Benzo-a-pireno	
Concentração máxima inicial	C _{a,i}	mg/L	17,5	5,35	1,52	1,98	1,55	6,0E-5	Valores máximos estimados na zona contaminada
Valor Máximo Permitido	VMP _i	mg/L	0,005	1	0,7	10	-	2,0E-4	[ASTM-95]
Meia vida	t _{1/2,i}	dia	700	63	228	365	258	1058	[ASTM-95]
Tempo de atenuação natural ao VMP	t_{f,i}	dia	8,24E3	1,52E2	2,55E2	-	-	-	Valores calculados
Tempo de chegada	t _{c,i}	dia	2,75E4	5,17E4	4,05E4	7,74E4	3,36E5	9,56E7	Valores calculados
Índice Segura	IS_i	-	0,03	0,003	0,006	<<1	-	<<1	Valores calculados