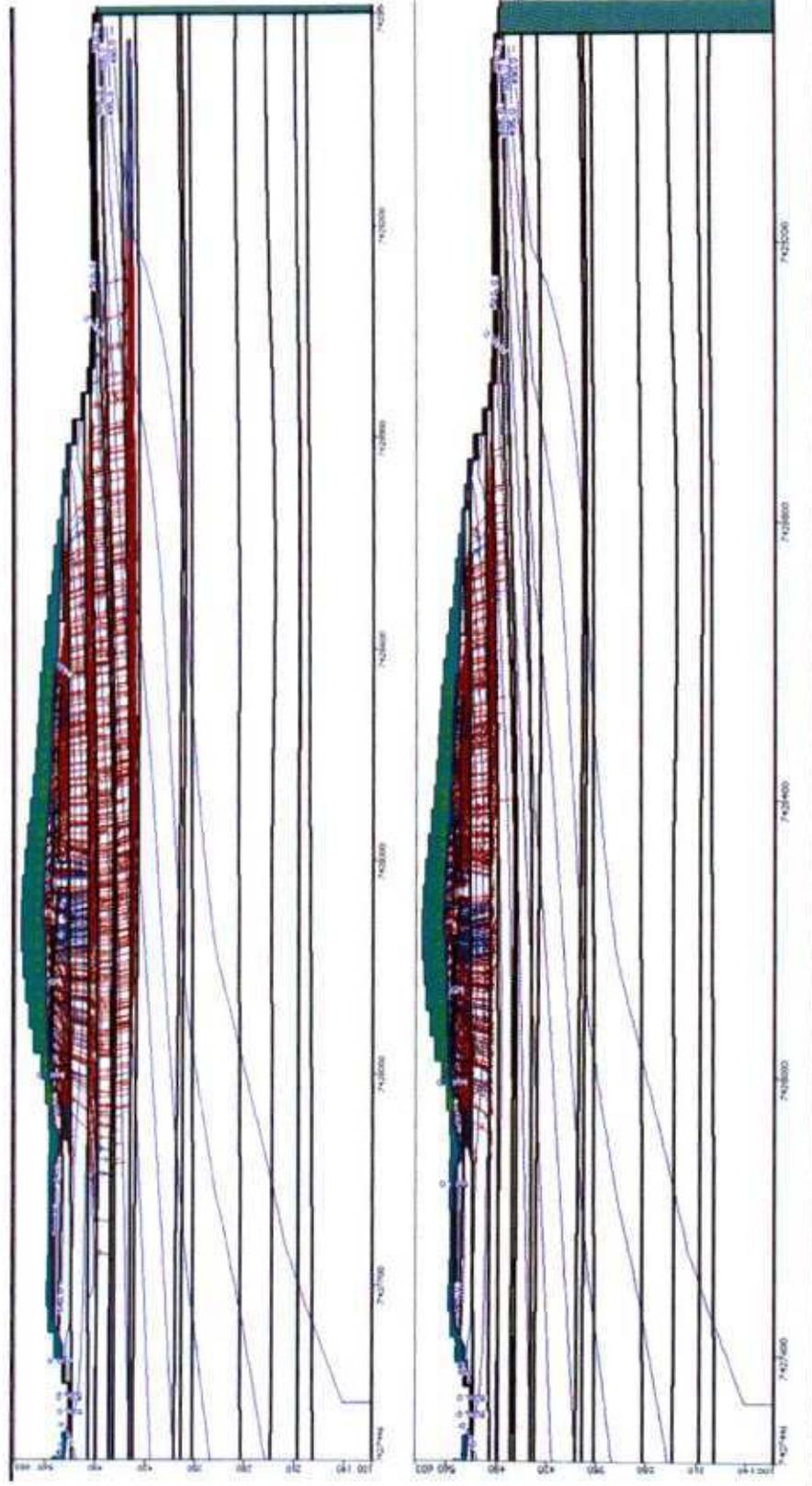


Figura 3.10 Vista de Corte N-S (sem e com fator de retardamento, respectivamente)



Simulação com partículas "reversas" (Backward) - nesta simulação foram inseridas partículas nos poços cacimbas e poços tubulares onde foi detectada a presença de compostos em fase dissolvida na campanha de monitoramento realizadas pela CETESB em maio/junho de 2017. Para tanto, foram efetuadas quatro simulações distintas, descritas a seguir:

- Simulação 1: Partículas reversas poços cacimbas: Poços de Produção da CETESB desativados - sem bombeamento (todos) (Figura 3.11).

As partículas foram posicionadas nos poços cacimbas da Chácara Estrela, Chácara Deck, Antiga Chácara Casarão, Atual Galpão Comercial e Casa da Vovó, localizados no aquífero raso (primeira a camada do modelo). Nos poços tubulares as partículas foram posicionadas nas proximidades dos filtros de cada poço.

- Simulação 2: Partículas reversas poços cacimbas (com os poços tubulares da Porto Feliz S/A - 17, 18, 18A bombeando (ligados) (Figura 3.12).

As partículas foram posicionadas nos mesmos cacimbas supracitados.

- Simulação 3: Partículas reversas poços cacimbas (com os poços tubulares da Porto Feliz S/A - 17, 18, 18A não bombeando/desligados) (Figura 3.13).

As partículas foram posicionadas nos mesmos cacimbas supracitados.

- Simulação 4: Partículas reversas dos poços tubulares (com os poços de produção da Porto Feliz S/A - 17, 18, 18A bombeando (ligados) e dos poços das chácaras vizinhas sem bombeamento (desligados) (Figura 3.14).

Para as simulações foi acionado um comando no programa, que calcula o trajeto feito pela partícula desde sua origem até a chegada ao filtro do poço.

Nas figuras 3.11 à 3.15 abaixo são apresentados os resultados das simulações supracitadas.

Figura 3.11 Simulação 1 com partículas reversas (Cacimbas): Poços de Produção da CETESB desativados (todos) - Origem das partículas - Cacimbas impactados da CETESB

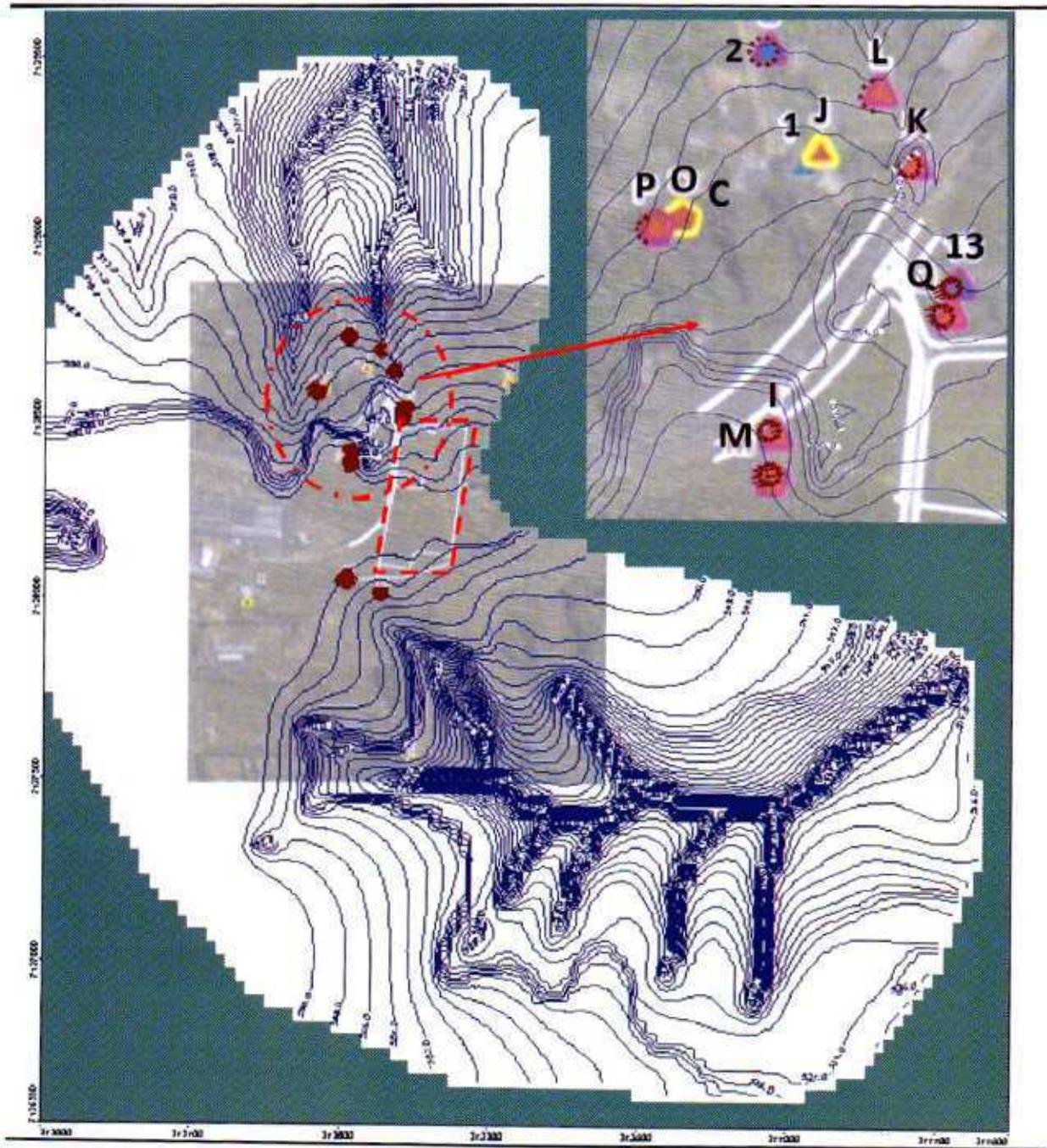
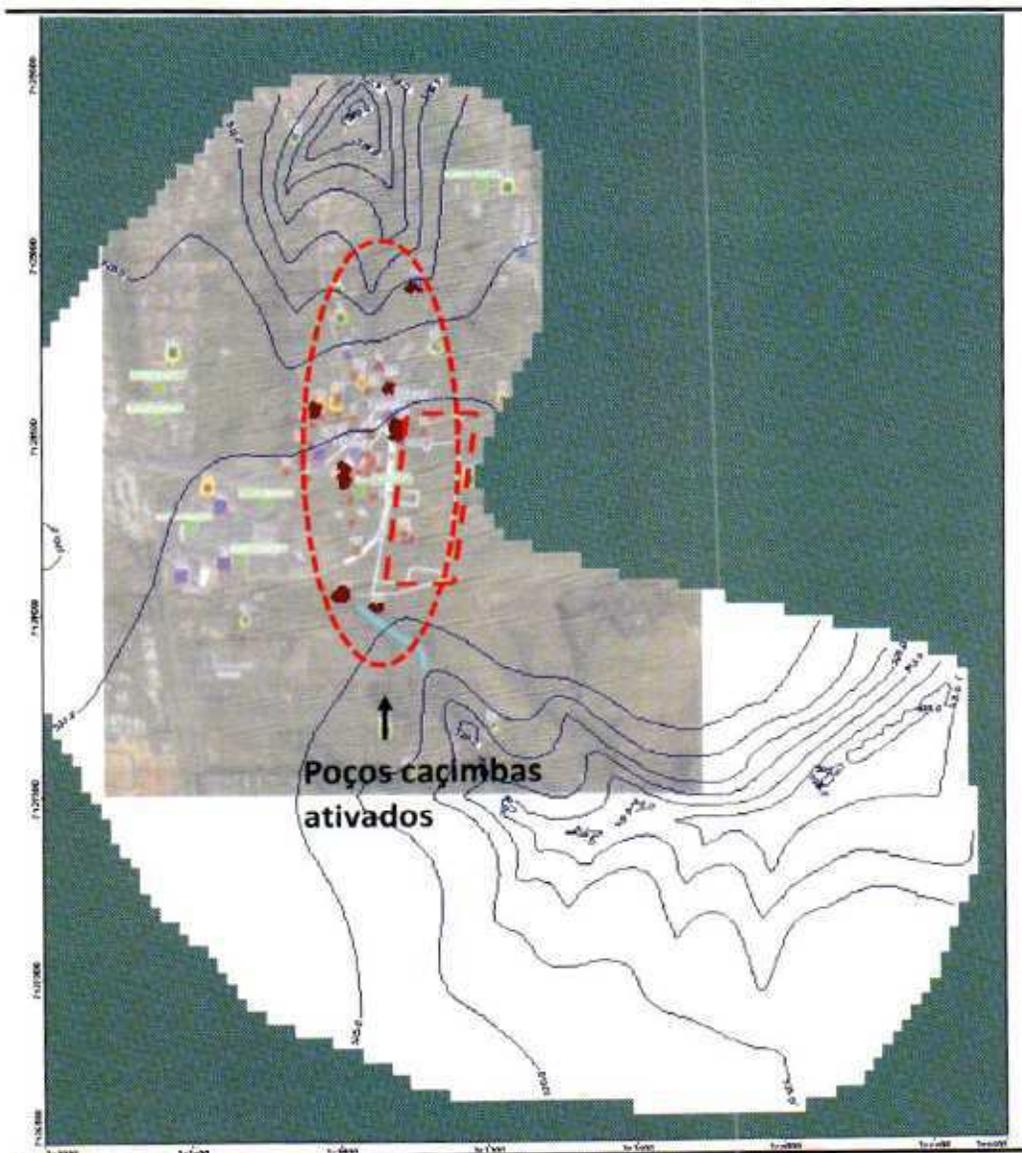
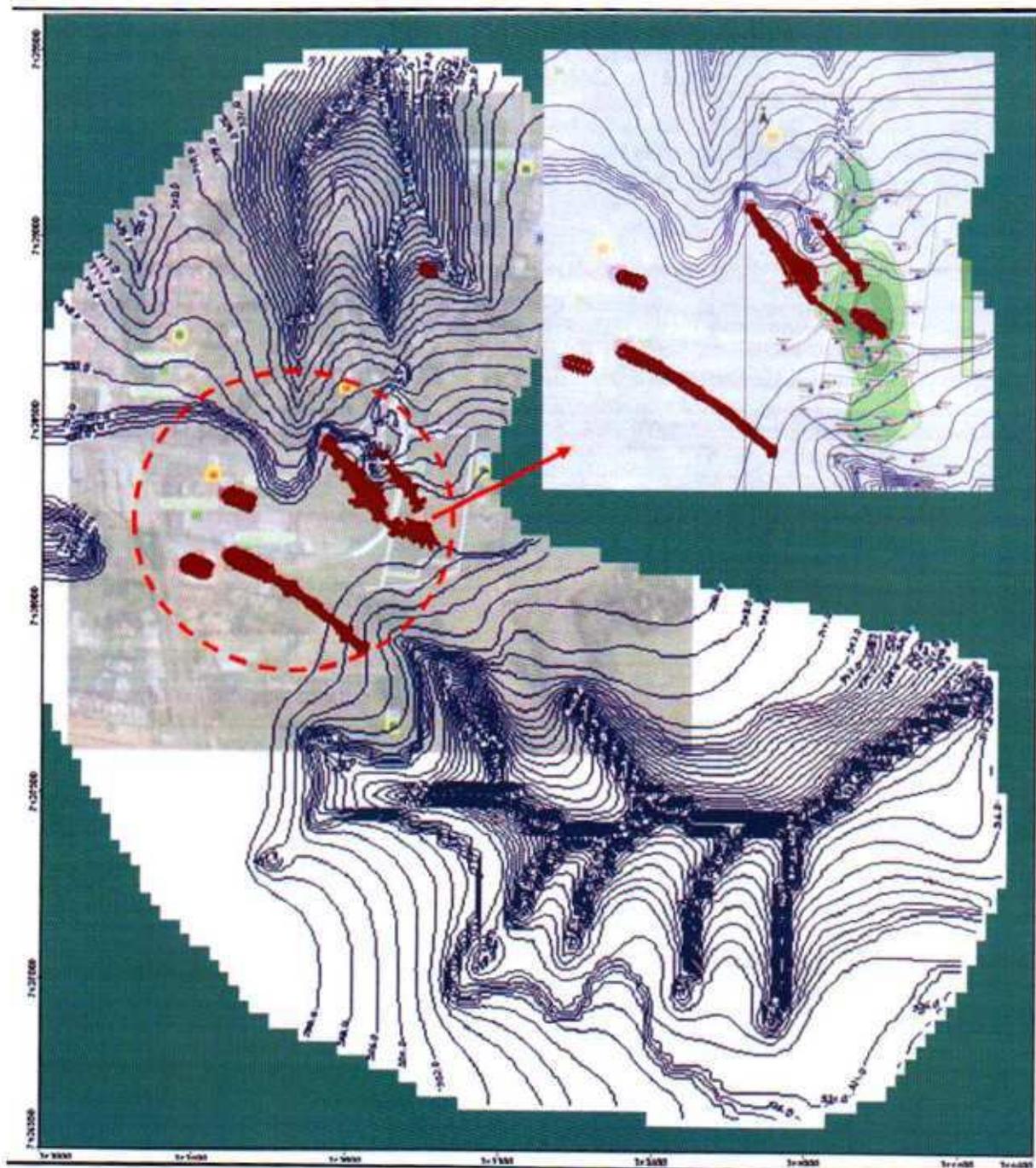


Figura 3.12 Simulação 2 com partículas reversas poços cacimbas (com os poços tubulares da Porto Feliz S/A - 17, 18, 18A bombeando (ligados) - Origem das partículas - Cacimbas impactados da CETESB



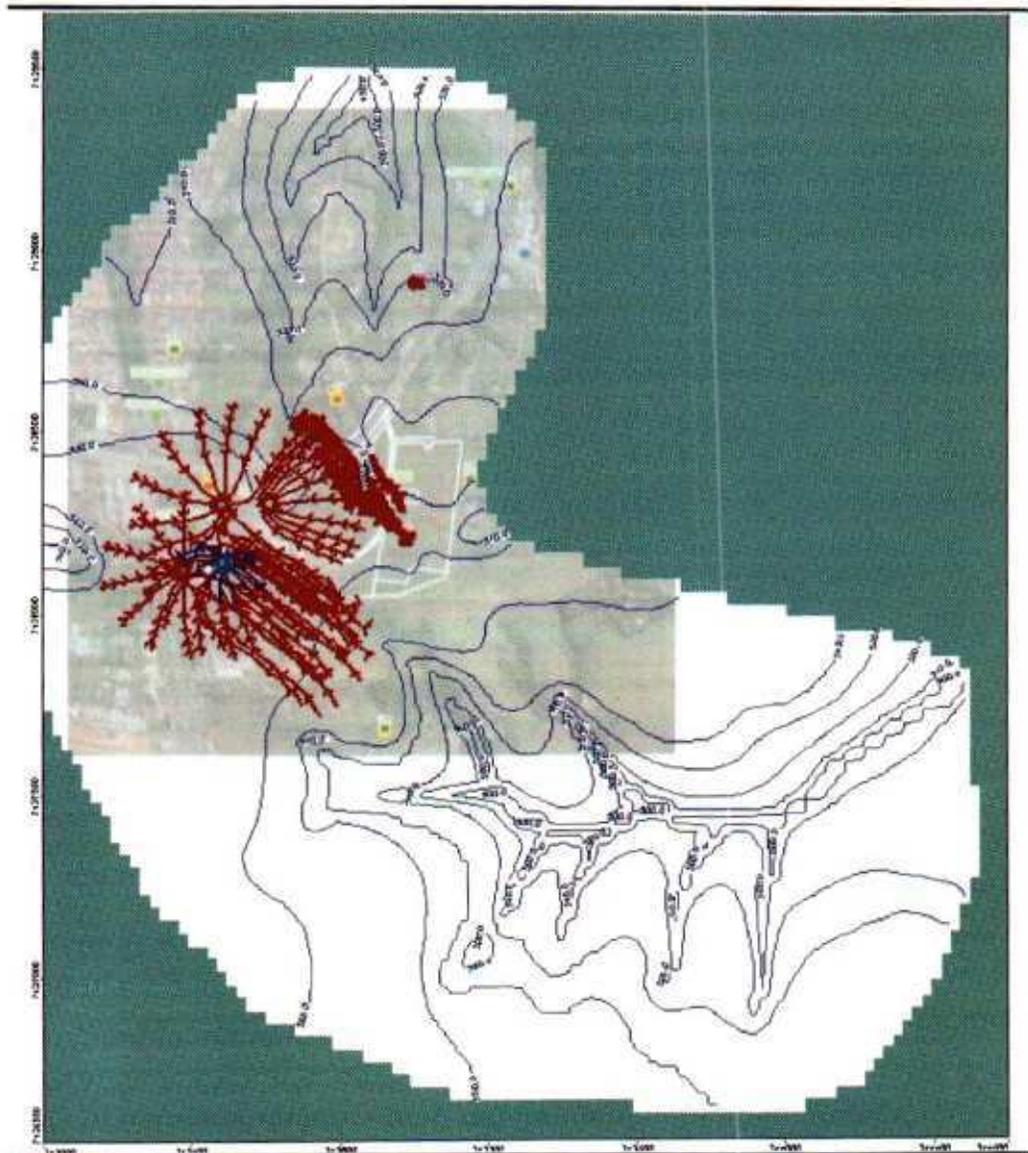
Nessa simulação, feita com partículas reversas, verificou-se que não foi observado relação entre aquífero raso com o profundo, mesmo após os poços de produção terem sido acionados (Figuras 3.11 e 3.12).

Figura 3.13 Simulação 3 com partículas reversas poços cacimbas (com os poços tubulares da Porto Feliz S/A - 17, 18, 18A não bombeando/desligados) - Origem das partículas - receptores impactados da Cetesb (poços tubulares)



Nessa simulação, a origem das partículas são os receptores impactados da CETESB (poços tubulares). Utilizando-se as partículas reversas, para um período de 35 anos (em relação a 1983), verificou-se que, sem bombeamento as partículas não estariam no caminho da pluma.

Figura 3.14 Simulação 4: Partículas reversas dos poços tubulares (com os poços de produção da Porto Feliz S/A - 17, 18, 18A bombeando/ligados e das chácaras vizinhas sem bombeamento/desligados)



Nessa simulação com partículas reversas, para um período de 35 anos, verificou-se que, com os poços tubulares monitorados pela CETESB bombeando (ligados), os poços da Chácara Ilha Bela e Porto Feliz S.A. não seriam impactados sem a existência de um caminho preferencial ou "atalho" que conduza o fluxo até horizontes mais profundos, visto que partículas incluídas no nível C do aquífero (45 metros de profundidade), não atingiriam esses poços. Dessa forma, estima-se que o poço tubular que existia na antiga área de tancagem funcionava como caminho preferencial do produto até 80 metros de profundidade. Vale destacar novamente que esse poço foi citado na tese de mestrado do Hirata (1990) e que possuía 80 metros de profundidade.

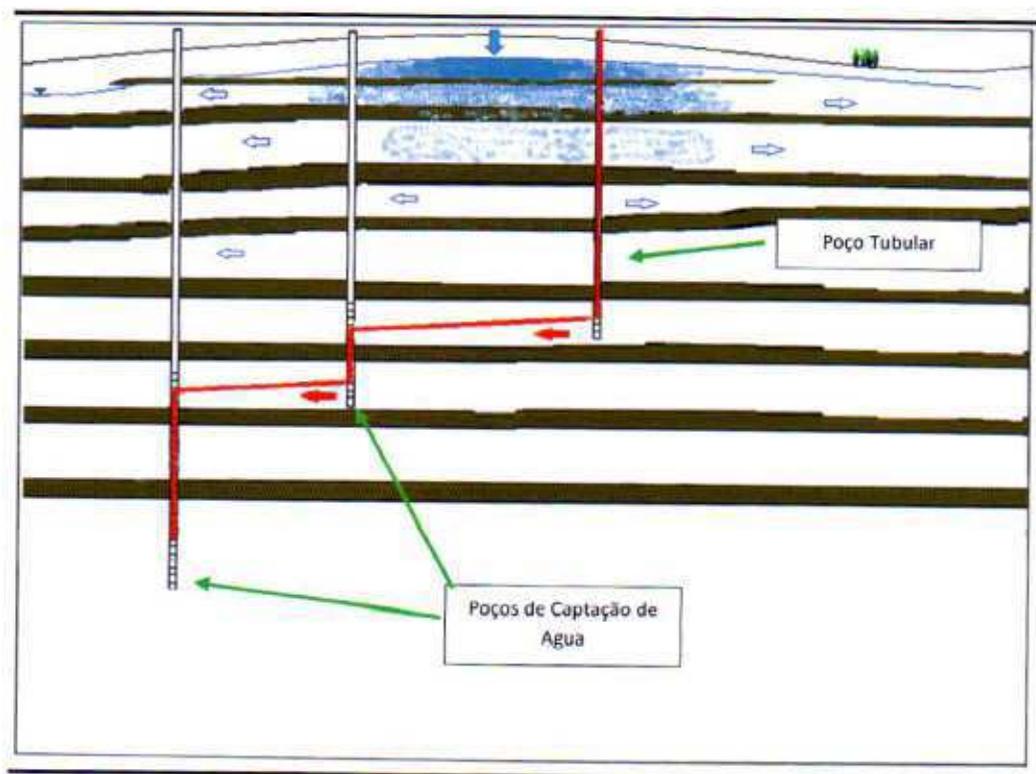
Verifica-se também que as partículas que partem da área mais ao sul, nas proximidades da Chácara da Vovó, apresentam uma área de abrangência

maior. Também são capturadas partículas localizadas nas proximidades da antiga área da USA Chemicals.

Nestas observações, o caminho mais provável para a presença de SQI nos poços tubulares profundos aparenta ser através de poços não cimentados e que, provavelmente, esse processo tenha ocorrido a partir do poço tubular que existia junto aos tanques da antiga USA Chemicals.

Dessa forma, em relação ao caso em estudo, propõe-se a seguinte hipótese de impacto aos poços profundos da Porto Feliz S/A (de referência 17, 18 e 18A, com 248, 270 e 500 m de profundidade, respectivamente, conforme CETESB (2017)), ilustrada na **Figura 3.15**: o produto teria atingido profundidade de até 80 metros através do poço tubular que existia na antiga área de tancagem (AC-01) do site. Dessa forma, uma vez nesse horizonte (80 m de profundidade) a pluma de fase livre teria migrado para noroeste, até regiões próximas ao antigo poço tubular da Chácara Ilha Bela, onde hoje encontra-se o Galpão Comercial, migrando verticalmente pelo interior do mesmo, até profundidades de até 110 m (profundidade do poço, de acordo com o Hirata (1990)). Posteriormente, a pluma teria sido deslocada até os poços tubulares da Porto Feliz S/A, através do bombeamento dos mesmos, os quais teriam funcionado como um vetor de migração vertical dos impactos, atingindo os níveis mais profundos do aquífero local. A **Tabela 03, Anexo E**, apresenta os dados construtivos (seção filtrante e profundidade) dos poços citados.

Figura 3.15 Exemplo de Mecanismo de Impactos de Poços Tubulares Profundos Originados por Poço de Tubular



Durante o processo de modelagem matemática é comum a realização de testes considerando-se dados mais conservadores para observar a sensibilidade do modelo e avaliar as alterações que poderiam causar no modelo.

Dessa forma, foi realizada também uma análise de sensibilidade com anisotropia vertical aumentada ($K_z:K_x = 1:100$) em relação ao modelo original ($K_z:K_x = 1:10$), apresentado acima. O valor de 1:10 é um valor típico utilizado em rochas sedimentares e sedimentos densos, sendo adotado neste modelo como um valor conservador para testar a possibilidade de migração da pluma de fase dissolvida para os poços tubulares profundos. Entretanto, os arenitos locais mostram evidências de laminações plano paralelas horizontais compostas por litologias mais argilo-siltosas, conforme pode ser visto nas fotos de testemunhos de sondagem (Sanifox, 2015), assim como é verificado que as concentrações diminuem significativamente do Nível A e Nível B. Portanto, é provável que a anisotropia seja mais pronunciada na realidade.

Para avaliar este cenário mais realista, a anisotropia vertical foi aumentada nas camadas mais superficiais (Níveis A, B e C). Para manter o modelo calibrado, a taxa de recarga foi reduzida para 110 mm/ano (aproximadamente 9% da precipitação anual) e foram aumentadas os valores de condutividade das zonas 2 e 3 do modelo descritas anteriormente. A zona 2 foi aumentada por um fator de cerca de 1.5 x e a zona 3 foi aumentada por um fator de 2.5 vezes. Os resultados desta simulação mostraram-se adequados (calibração com erro RMS normalizado de 8,3 %), o que demonstra que este cenário é possível, dentro da faixa de incertezas típicas de modelos regionais.

A simulação de caminamento de partículas para frente (*forward*), nesse caso, foi realizada para um tempo de trânsito de 40 anos, considerando um fator de retardamento igual a 2.6, e o cenário dos poços tubulares do entorno sem bombeamento (desligados). A inclusão do fator de retardamento é feita através do aumento da porosidade efetiva, o que faz com que o MODPATH 1 calcule os tempos de trânsito com uma velocidade retardada em relação a velocidade normal da água. A comparação entre a simulação obtida nesta análise de sensibilidade e o obtido no modelo original é apresentada nas Figuras 3.16 e 3.17.

Verifica-se que com a anisotropia aumentada, a migração das partículas para o norte é um pouco maior, mas a extensão da pluma permanece similar nas duas simulações realizadas. Na realidade, essa migração adicional não reflete as reações de degradação dos compostos e, portanto, é superestimada no modelo.

Com relação a migração vertical, observa-se que as partículas migrariam com uma velocidade menor, graças a um K_z menor, atingindo praticamente apenas a camada C. O fluxo torna-se mais horizontalizado na medida que se aproxima do afluente do Ribeirão Aveçuia e dos lagos da antiga Chácara

Casarão e da Chácara Deck.

As conclusões gerais deste cenário menos conservador coincidem com outras evidências observados no modelo original, que apontam uma maior quantidade de massa concentrada na Camada A (nível A), e migração descendente muito lenta, devido a presença dos aquitardes silto-arenosos e alta anisotropia vertical, que dificultam a migração dos compostos em profundidade.

Figura 3.16 Comparação em planta entre a) Modelo Original ($Kz:Kx = 1:10$) e b) Modelo com anisotropia vertical aumentada ($Kz:Kx = 1:100$)

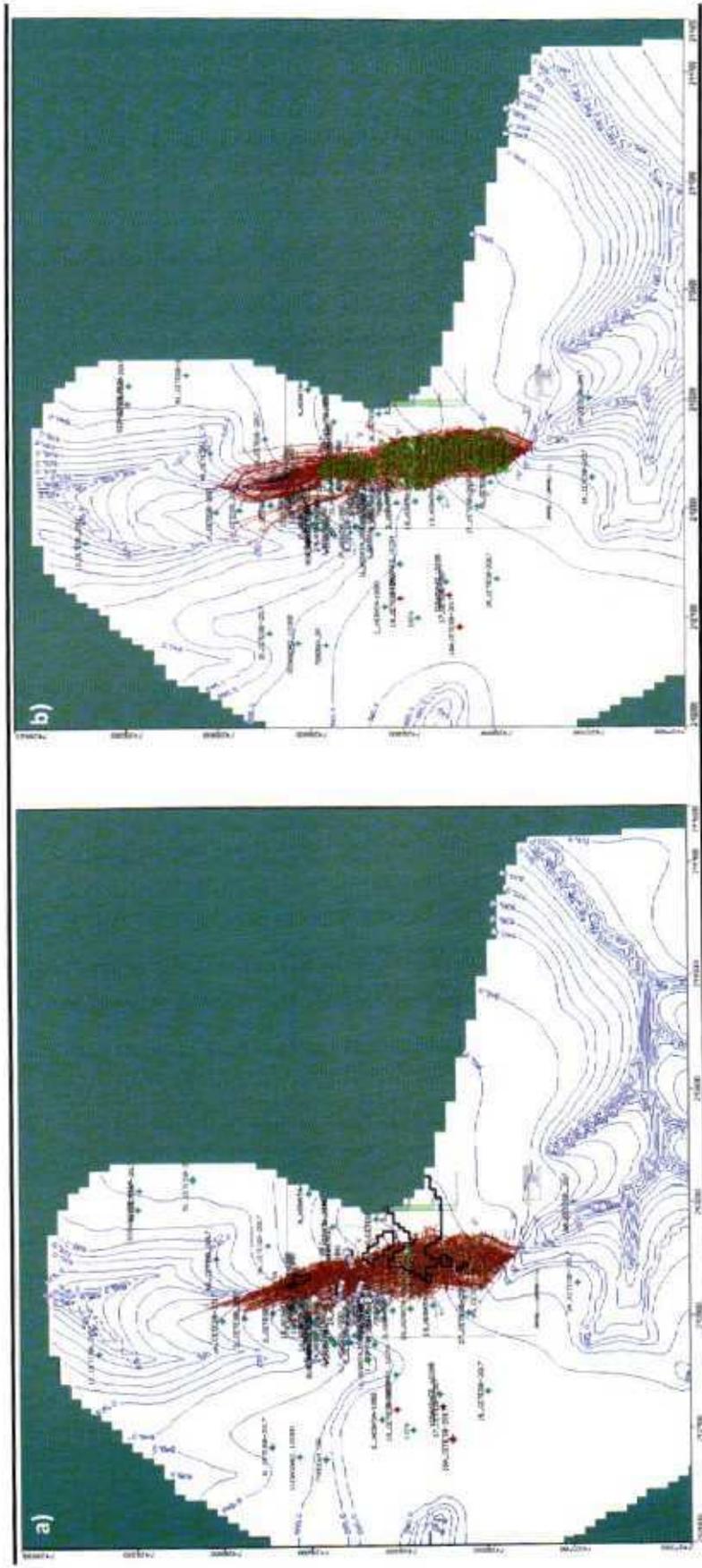
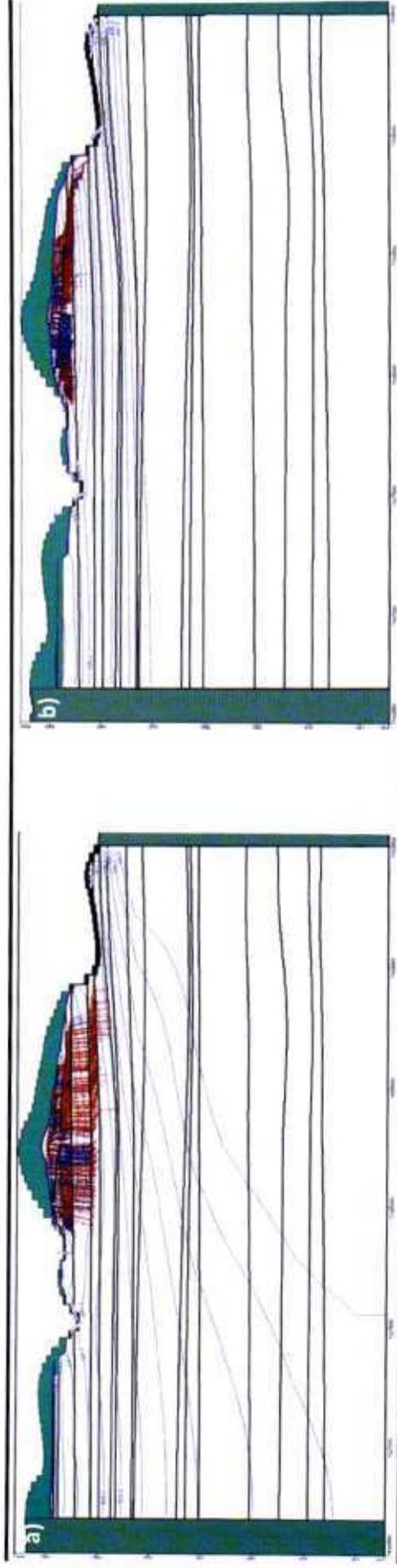


Figura 3.17 Comparação em seção entre a) Modelo Original ($K_z:K_x = 1:10$) e b) Modelo com anisotropia vertical aumentada ($K_z:K_x = 1:100$)



As simulações de fluxo e caminhamento de partículas realizadas na área da Antiga USA Chemicals e seu entorno permitiram chegar às seguintes conclusões:

- O modelo regional de fluxo foi construído e calibrado adequadamente segundo padrões aceitáveis e parâmetros de entrada similares aos levantados em campo;
- As condições de fluxo mostram uma componente descendente na antiga área de tançagem, característica de zona de recarga local e extremamente lenta em função da baixa permeabilidade da litologia que compõe o aquífero. Na medida em que se distancia da zona de recarga e se aproxima dos córregos que constituem-se zonas de descarga locais, o padrão de fluxo se torna horizontal, condicionado por níveis de siltitos, argilitos e pela laminação dos arenitos locais, o que minimiza o fluxo da água subterrânea no sentido vertical; e
- No nível C os fluxos são predominantemente horizontais e migram em sentido N-NW e S, em direção às drenagens locais e sob influência dominante do fluxo regional, guardando menor relação com a topografia.
- Os regimes de fluxo nos níveis mais profundos são mais incertos, porém, não há indicações de que os compostos de interesse poderiam atingir os poços tubulares profundos sem que existam caminhos preferenciais, nesse caso, pelo antigo poço tubular que existia no passado na área de tançagem. Esta conexão parece, ainda, ter sido facilitada pelo bombeamento de poços tubulares e cacimbas no entorno, particularmente os poços da antiga chácara adjacente a antiga USA Chemicals;
- O modelo indica que o caminho mais provável para o impacto dos poços tubulares profundos aparenta ter sido através de poços não cimentados e, provavelmente, tenha ocorrido a partir do antigo poço tubular, junto a área de tançagem da antiga USA Chemicals; e
- O modelo utilizou uma anisotropia vertical típica de rochas sedimentares consistentes, que é conservadora, já que na região as rochas apresentam laminações frequentes de siltitos/argilitos. A análise de sensibilidade do modelo de fluxo indicou que mesmo com uma anisotropia vertical aumentada e mais realista, o comportamento do fluxo seria bastante semelhante, ainda que com menor migração vertical que não ultrapassaria a camada C.

SIMULAÇÕES DE TRANSPORTE DE COMPOSTOS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA

As simulações de transporte visaram o entendimento do comportamento dos compostos de interesse no aquífero e seus processos de migração ao longo do tempo, através de linhas de fluxo até os receptores mais importantes existentes no entorno da área. Para tanto, foram utilizados dois modelos unidimensionais de transporte - Biochlor e PREMChlor - que são descritas no Item 4.1.

O desenvolvimento das simulações envolveu as etapas descritas a seguir:

- 1) *Seleção de linhas de fluxo*: os resultados obtidos com a simulação de partículas do modelo hidrogeológico de fluxo (Item 3 do presente relatório) foram utilizados para definição preliminar das linhas de fluxo existentes na área, sendo selecionadas as linhas com dados de monitoramento suficientes para as simulações de transporte;
- 2) *Definição dos compostos de interesse*: a partir dos dados históricos dos poços contemplados nas linhas de fluxo selecionadas, foi observada a tendência de etanos e etenos clorados nos mesmos, assim com a suas tendências ao longo da linha de fluxo;
- 3) *Simulações de Concentração versus Distância com Biochlor*: foi realizada a calibração dos modelos para etenos e etanos clorados para os poços selecionados ao longo das linhas de fluxo, considerando como *input* os dados históricos e os dados obtidos na Modelagem Hidrogeológica Computacional (Modflow). A partir dos resultados da calibração, foram simulados cenários futuros para 20 anos em relação ao período atual; e
- 4) *Simulações de efeitos de remediação das fontes com PREMChlor*: os dados resultantes da calibração do Biochlor foram utilizados para a alimentação e calibração do software PREMChlor, comparando-se com os dados reais para os poços da linha de fluxo localizados na zona fonte e mais próximos aos receptores. A partir do resultado obtido na calibração, foram feitas simulações de remoção de massa na fonte (simulação de aplicação de processos de remediação).

4.1

PROGRAMAS UTILIZADOS

O programa Biochlor versão 2.2 (USEPA, 2002), utiliza a solução analítica de Domenico para modelos de transporte. O programa simula o processo de advecção em uma dimensão (1D) ao longo da linha central da pluma, dispersão em três dimensões (3D), adsorção linear e biotransformação por decloração reductiva em condições anaeróbicas. O software assume que a degradação de compostos orgânicos dissolvidos segue processo sequencial de primeira ordem.

Assim, o *software* simula a atenuação natural de solventes clorados na água subterrânea de determinada área. As principais limitações do Biochlor são:

- 1) Como modelo analítico, o Biochlor assume condições simplificadas de fluxo, ou seja, não considera sistemas em que há processos de bombeamento na área, tampouco situações em que o fluxo vertical afeta o transporte de solutos;
- 2) Esse modelo assume hidrogeologia e condições ambientais uniformes em toda a área estudada; e
- 3) O modelo foi desenvolvido para simular a decloração reductiva de etenos e etanos clorados e não atende a biotransformação de compostos que não degradam via cinética de primeira ordem. (USEPA, 2000)

O PREMChlor, o segundo *software* utilizado nesta etapa do estudo, é um modelo de remediação probabilística para solventes clorados, desenvolvido para avaliar simultaneamente a efetividade de remediações realizadas na fonte e na fase dissolvida, considerando as incertezas em todos os parâmetros principais. O PREMChlor foi desenvolvido pela união do modelo analítico REMChlor ao GoldSim (Falta et al, 2010), *software* que utiliza o método de Monte Carlo para propagar a incerteza no modelo (GOLDSIM, 2018). As incertezas consideradas derivam-se de propriedades hidrogeológicas e biogeoquímicas do site de estudo e do contexto do impacto existente, além do próprio processo de remediação.

O modelo da fonte dos impactos é baseado em uma relação exponencial da massa fonte e a sua descarga e pode considerar a remediação da fonte em qualquer momento após o derrame inicial. O modelo da fase dissolvida, baseado em advecção unidimensional e dispersão tridimensional, simula um decaimento sequencial de primeira ordem e gera uma série de subprodutos. As taxas de biodegradação dos compostos pais para filhos em relação ao tempo e a distância podem variar em três faixas de tempo e três faixas de espaço (p ex. pode-se aumentar a degradação durante a remediação). O modelo também permite aplicar taxas de redução às fontes dos impactos, simulando efeitos de remoção de solo ou remediação *in situ* (métodos termais, biodegradação acelerada, entre outras).

4.2 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DAS LINHAS DE FLUXO E DOS COMPOSTOS

4.2.1 Linhas de Fluxo

A definição preliminar das linhas de fluxo envolveu dois critérios principais. O primeiro critério envolveu a posição dos centros de massa da antiga USA Chemicals, conforme os resultados históricos da área, e os receptores no entorno dela, considerada a localização desses e os resultados da última campanha de monitoramento realizada pela CETESB, em maio/junho de 2017.

O segundo critério levou em conta o resultado da simulação com partículas "adiante" (item 03 do presente relatório), com os caminhos de fluxo da água subterrânea sem considerar o bombeamento dos poços do entorno. Com isso, foram definidos 05 caminhos potenciais desde as fontes até os receptores dos rios e rios clorados na área, conforme apresentados na Figura 21.

Anexo A:

- a) Linha 1: N-NO para S-SE - partindo do PM-07A, próximo ao principal centro de massa da antiga USA Chemicals, seguindo pela camada superficial, Nível A, para o afluente do Ribeirão Avecuia e o poço cacimba 33 (CETESB - Sítio Marabó);
- b) Linha 2: N para S - partindo do PM-15A, próximo ao principal centro de massa da antiga USA Chemicals, seguindo pela camada superficial, Nível A, para o afluente do Ribeirão Avecuia;
- c) Linha 3: E-SE para O-NO - partindo do PM-18B, próximo ao principal centro de massa da antiga USA Chemicals, seguindo pela camada superficial, Nível B, para os poços tubulares profundos 18, 17 e 18A da Porto Feliz S/A;
- d) Linha 4: SE para NO - partindo do PM-32B, seguindo pela camada superficial, Nível B para o poço tubular 8 da antiga Chácara Casarão, atual chácara São Francisco; e
- e) Linha 5: SE para NO - partindo do PM-01, centro de massa localizado ao norte da área, seguindo pela camada superficial, Nível A, para o poço cacimba 2, chácara DECK.

Durante o processo de seleção, as linhas envolvendo os poços tubulares profundos (Linha 3 e Linha 4) foram desconsideradas, uma vez que, conforme indicado no modelo hidrogeológico de fluxo, essa migração não ocorre de forma natural, sendo possibilitada apenas através de caminhos preferenciais e bombeamento. A Linha 2 também foi desconsiderada por envolver potencialmente fluxos de dois centros de massa (arredores PM-05A/B e PM-21A).

Assim, foi definida a realização de simulações para a Linha 1 e Linha 5, ambos no Nível A, as quais contemplam dois centros de massa distintos e dois receptores impactados (afluente Ribeirão Avecuia e poço cacimba 2). A Figura 22, Anexo A, apresenta as duas linhas de fluxo selecionadas e os poços considerados nessas linhas. A distância em linha reta do primeiro ponto da linha de fluxo para os subsequentes é apresentada na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.1 Distâncias Poços Linha de Fluxo 1

Ponto	Distância em relação a fonte (m)
PM-07A	0
PM-34A	48
PM-35A	144
PM-36A	192
PM-37	211.2
PM-39	259.2
Poço Cacimba - 33	528

Tabela 4.2 Distâncias Poços Linha de Fluxo 5

Ponto	Distância em relação a fonte (m)
PM-01	0
PM-27A	163
Poço Cacimba - 2	384

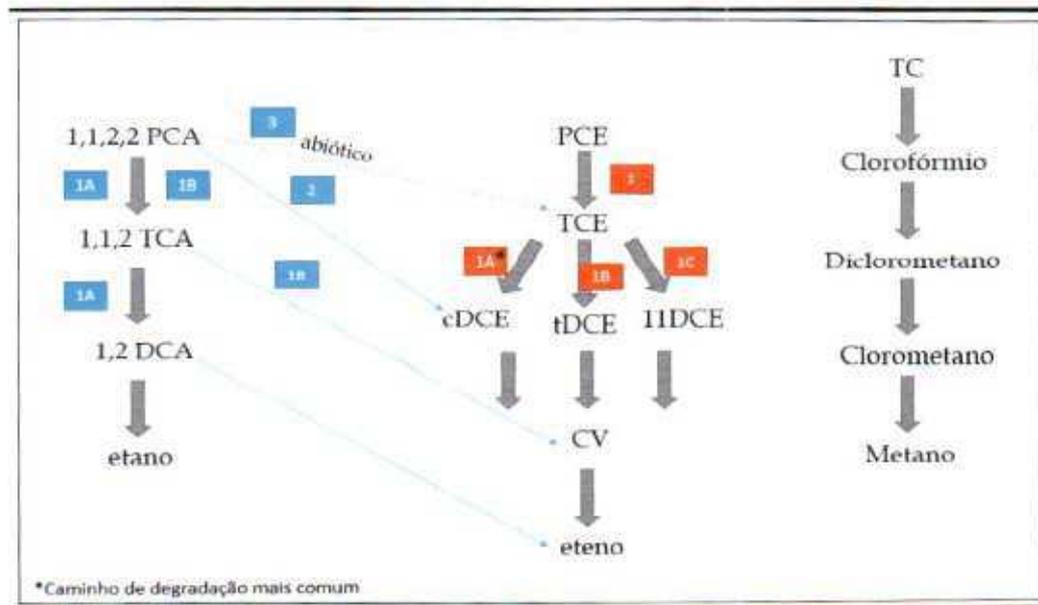
4.2.2 Compostos de Interesse

Conforme informações históricas da área, os produtos identificados na época do acidente na USA Chemicals apresentavam os seguintes compostos: tetracloreto de Carbono, clorofórmio, 1,2-dicloroetano, 1,1,2-tricloroetano, tetracloroetano (Hirata, 1990).

A seleção dos compostos de interesse a serem simulados neste trabalho foi baseada nos resultados da campanha de monitoramento de março/abril de 2017 (Sanifox, 2017a), assim como nos dados dos poços das chácaras e empresas localizadas no entorno da área de interesse, realizado pela CETESB entre maio/junho de 2017. Foram selecionadas para as simulações as séries de degradação de tetracloroetano e 1,1,2,2-tetracloroetano, devido a maior presença dos seus subprodutos na área. A Figura 4.1 a seguir apresentam os potenciais caminhos de degradação desses compostos, que é bastante complexa.

Uma das limitações encontrada, corresponde a localização dos poços, que não se alinham exatamente ao centro da pluma, como simulado pelo Biochlor. Essa limitação é menos evidente no PREMChlor, já que é possível indicar um deslocamento em relação a linha central da pluma. Por essa razão, no Biochlor, procurou-se simular concentrações um pouco acima da observado nos poços de monitoramento, produzindo análise conservadora.

Figura 4.1 Caminhos de Degradação Anaeróbica do 1,1,2,2-Tetracloroetano e Tetracloroeteno e Tetracloroeto de Carbono



Fonte: Adaptado de TRIPP & LIU, 1999; USEPA, 1998.

4.3 SIMULAÇÕES AO LONGO DE UMA LINHA DE FLUXO (BIOCHLOR)

4.3.1 Dados de entrada - Calibração

A calibração do Biochlor foi feita com os resultados dos poços de monitoramento de março/abril de 2017 (Sanifox, 2017a) e de novembro de 2017 (Sanifox, 2017b) para o PM-37, que estava seco na campanha anterior. Além disso, foram utilizados os dados da campanha de monitoramento dos poços e água superficial do entorno realizados pela CETESB em maio/junho de 2017. A calibração do modelo incluiu um período de 35 anos após o acidente ocorrido na área da Antiga USA Chemicals.

O objetivo da calibração é ter o melhor ajuste das curvas calculadas pelo Biochlor aos dados medidos em campo, de forma que as simulações do modelo representam o mais próximo possível da realidade observada.

Os dados históricos das duas linhas de fluxo podem ser verificados no Anexo G.

A Tabela 4.3 a seguir apresenta os dados de *input* e os dados ajustados conforme a calibração para as Linhas 1 e 5.

Tabela 4.3 Dados de entrada Biochlor

Parâmetro	Linha 1		Linha 5		Fonte
	Etanos	Etanos	Etanos	Etanos	
Velocidade - v_s (pés/ano)	34.8	34.8	32.9	32.9	Modflow
Condutividade Hidráulica - K (cm/s)	2.9E-05	2.9E-05	2.9E-05	2.9E-05	Modflow
Gradiente Hidráulico - i	0.058	0.058	0.023	0.023	Modflow
Porosidade Efétna - n	0.05	0.05	0.02	0.02	Calibração
Dispersividade Longitudinal - α_L (pés)	25	25	25	25	Calibração
Razão $n_{y/ar}$	0.1	0.1	0.1	0.1	Calibração
Razão $n_{y/gy}$	0.01	0.01	0.01	0.01	Calibração
Densidade do solo - ρ_{so} (kg/L)	1.7	1.7	1.7	1.7	-
Fração de Carbono Orgânico - f_{oc}	0.00039	0.00039	0.00045	0.00045	Calibração
Retardamento - R					
	TCA	6.58	PCE	6.58	TCA
	DCA	27	TCE	27	DCA
	CA	2.64	DCE	2.64	CA
			VC	1.39	VC
			ETH	4.95	ETH
	M*	27	M*	1.44	M*
	TCA-DCA	0.035	PCE-TCE	0.009	TCA-DCA
	DCA-CA	1.386	TCE-DCE	0.089	DCA-CA
	CA-Etano	0.139	DCE-VC	0.139	CA-Etano
			VC-ETH	13.86	VC-ETH
Área Moldeada - L (pés)	1800	1800	1300	1300	Sanifox, 2017a
Área Moldeada - W (pés)	656.2	601.3	393.7	262.5	Sanifox, 2017a
Espessura na Zona Saturada (unidade?)	26.4	26.4	26.4	26.4	Modflow
Concentração na Fonte (mg/L)					
	TCA	34	PCE	4	PCE
	DCA	115	TCE	21.5	DCA
	CA	0	DCE	14	CA
			VC	0.135	VC

*Orientamento: utilizado foi a mediana entre as composições da família de etanos ou etanos

Os resultados e discussões da calibração do Biochlor para os etenos e etanos clorados da Linha 1, assim como as simulações para cenários futuros são apresentados nos itens a seguir.

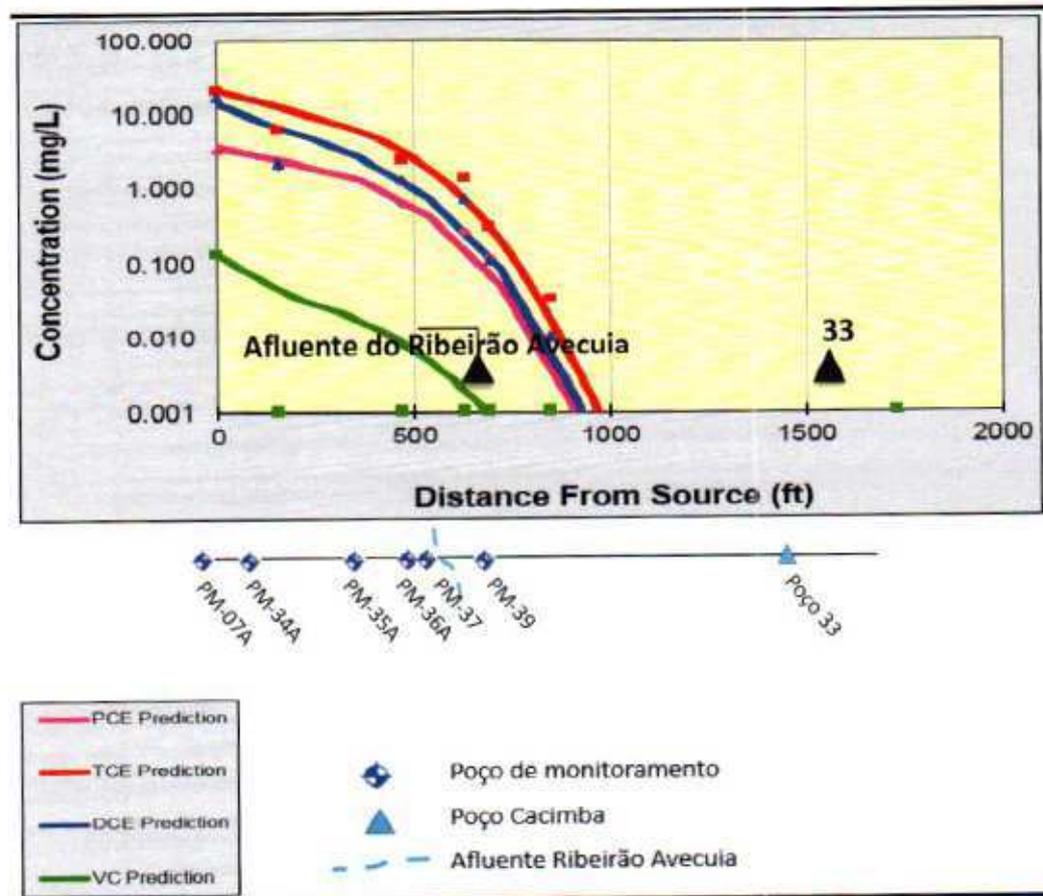
i. Etenos Clorados

1. Calibração

A **Figura 4.2** a seguir apresenta a saída do Biochlor para os dados de etenos clorados da Linha 1. A linha contínua refere-se ao melhor ajuste do modelo. Os pontos representam os dados medidos em campo. A posição dos principais receptores ao longo da Linha 1 também são indicadas na figura.

O gráfico apresenta a concentração de etenos clorados por distância ao longo da linha de fluxo por um período de 20 anos a partir de 2018. Considera-se as curvas obtidas pelo Biochlor como a frente da pluma em fase dissolvida dos compostos PCE, TCE, DCE e VC.

Figura 4.2 Gráfico Resultante da Calibração para Etenos Clorados na Linha 1 - Concentração por Distância da Fonte



Os resultados analíticos das amostras coletadas em março/abril de 2017 não apresentam a mesma tendência de concentrações de cloreto de vinila que a calibração obtida pelo Biochlor. No segundo semestre de 2017 e no primeiro semestre de 2018 ocorre presença de cloreto de vinila nos poços em questão, porém, da mesma forma, não seguem a tendência do Biochlor. Este fato indica pode indicar que a formação de cloreto de vinila pode estar ocorrendo mais lentamente devido as condições do local, ou a degradação do mesmo para etenos e cianos é rápida demais. Essa segunda hipótese, no entanto, não pode ser comprovada com os dados históricos, uma vez que eteno e etano não foram analisados nas campanhas de monitoramento realizadas até o momento.

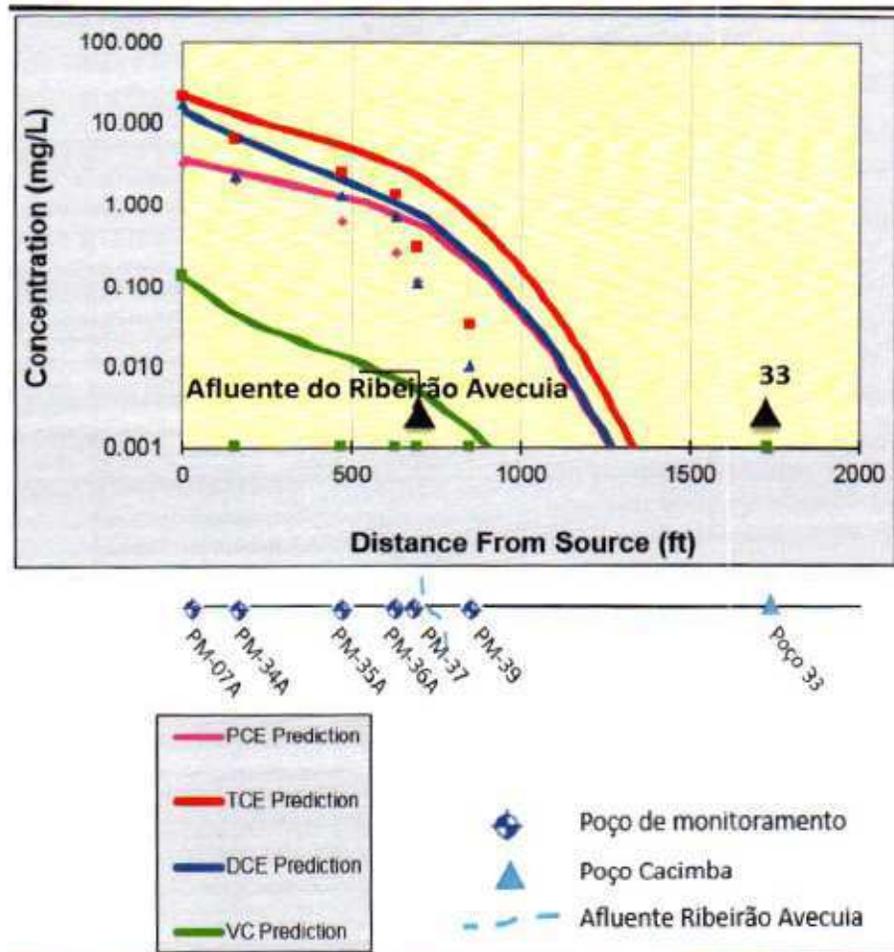
Ressalta-se que, as concentrações consideradas de calibração atual no modelo para os compostos simulados são maiores do que as obtidas nas medições diretas feitas pela Sanifox nos pontos monitorados do córrego, assim como na nascente amostrada pela CETESB. Esse fator indica que o modelo é conservador, uma vez que o mesmo considera fontes constantes, sem decaimento, assim como desconsidera o processo de diluição natural que ocorre na água. Além disso, a formulação de Domenico, usada no Biochlor e no PREMChlor, não inclui efeitos de diluição por recarga, que tendem a ser importantes na frente da pluma. Portanto, esses resultados sugerem que, em geral, o modelo apresenta concentrações superestimadas (entre 2,5 a 4 vezes superiores as obtidas nas amostragens diretas), não confirmadas assim pelos resultados obtidos através das amostragens diretas. Essa mesma limitação também ocorre para as simulações futuras, onde o modelo superestima tanto a distância de migração da pluma, como as concentrações de chegada.

Os resultados diretos obtidos pela Sanifox vêm sendo apresentados semestralmente, através dos relatórios de monitoramento da qualidade da água subterrânea e superficial.

2. Cenário Futuro

A partir dos resultados obtidos nas calibrações, descritos acima, foram realizadas as previsões futuras com o Biochlor. A Figura 4.3, apresentada abaixo, mostra a simulação de etenos clorados na Linha 1, considerando-se 20 anos em relação ao período atual.

Figura 4.3 Gráfico Cenário Futuro (20 anos) para Etenos Clorados na Linha 1 - Concentração versus Distância da Fonte



O modelo indica que em 20 anos a frente das plumas de etenos clorados avançaria além do afluente do Ribeirão Avecuia. A frente da pluma, porém, não atingiria o poço cacimba do Sítio Marabó (33). A Tabela 4.4, a seguir, apresenta a comparação entre as concentrações obtidas pelo modelo em fase de calibração e para o cenário futuro (20 anos) no afluente do Ribeirão Avecuia.

No entanto, deve ser ressaltado que, apesar do modelo mostrar o aumento da concentração dos compostos de interesse no cenário futuro, em relação as concentrações de calibração que representariam o cenário atual para o modelo, as simulações são classificadas como conservadoras, já que considera fontes constantes sem decaimento e desconsidera os processos de diluição natural que ocorrem na água. A formulação de Domenico, usada no Biochlor e no PREMChlor, não inclui efeitos de diluição por recarga, que tendem a ser importantes na frente da pluma.

Tabela 4.4 Comparação entre simulações de Calibração (cenário atual) e em 20 anos para Etenos Clorados na Linha 1, no afluente do Ribeirão Avecuia

Composto	Concentração de Chegada no afluente do Ribeirão Avecuia	
	Calibração (mg/L)	20 anos (mg/L)
PCE	0,049	0,534
TCE	0,209	1,967
DCE	0,084	0,691
CV	*	*

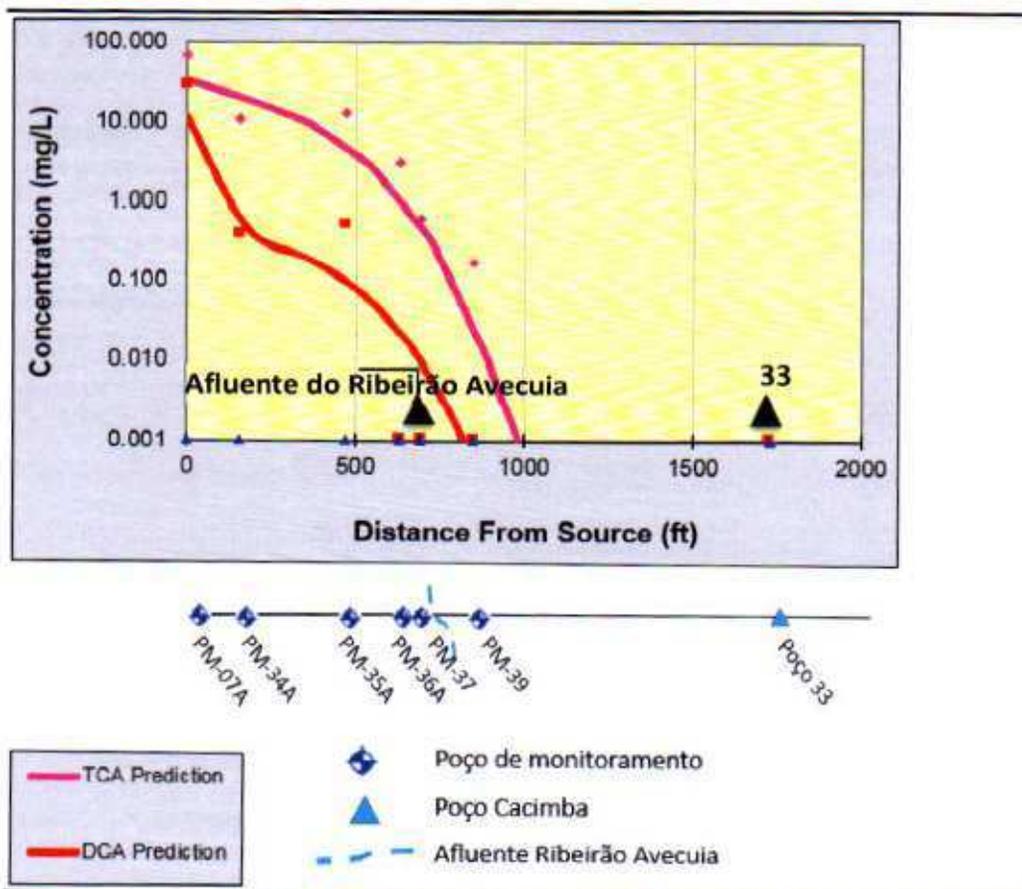
*Concentração de cloreto de vinila superestimada

ii. Etenos Clorados

1. Calibração

A calibração do cenário atual para etenos clorados na Linha 1 é apresentada na Figura 4.4.

Figura 4.4 Gráfico Resultante da Calibração para Etenos Clorados na Linha 1 - Concentração versus Distância da Fonte



A calibração do composto cloroetano para o Biochlor não foi considerada, uma vez que não é verificada a presença deste composto nos poços de monitoramento e na água superficial coletada no afluente do Ribeirão

Avecuia nas campanhas realizadas até novembro de 2017 (Sanifox, 2014b, 2015, 2016a, 2016b, 2017a, 2017b).

Assim como obtido para etenos clorados, os resultados da calibração para o cenário atual de etanos clorados na Linha 1 também indicam que a frente das plumas atinge o afluente do Ribeirão Avecuia e os poços de monitoramento a jusante deste.

Novamente, ressalta-se que, as concentrações consideradas de calibração atual no modelo para os compostos simulados são maiores do que as obtidas nas medições diretas feitas pela Sanifox nos pontos monitorados do córrego, assim como na nascente amostrada pela CETESB. Esse fator indica que o modelo é conservador, uma vez que o mesmo considera fontes constantes, sem decaimento, assim como desconsidera o processo de diluição natural que ocorre na água. Além disso, a formulação de Domenico, usada no Biochlor e no PREMChlor, não inclui efeitos de diluição por recarga, que tendem a ser importantes na frente da pluma. Portanto, esses resultados sugerem que, em geral, o modelo apresenta concentrações superestimadas (entre 2,5 a 4 vezes superiores as obtidas nas amostragens diretas), não confirmadas assim pelos resultados obtidos através das amostragens diretas. Essa mesma limitação também ocorre para as simulações futuras, onde o modelo superestima tanto a distância de migração da pluma, como as concentrações de chegada.

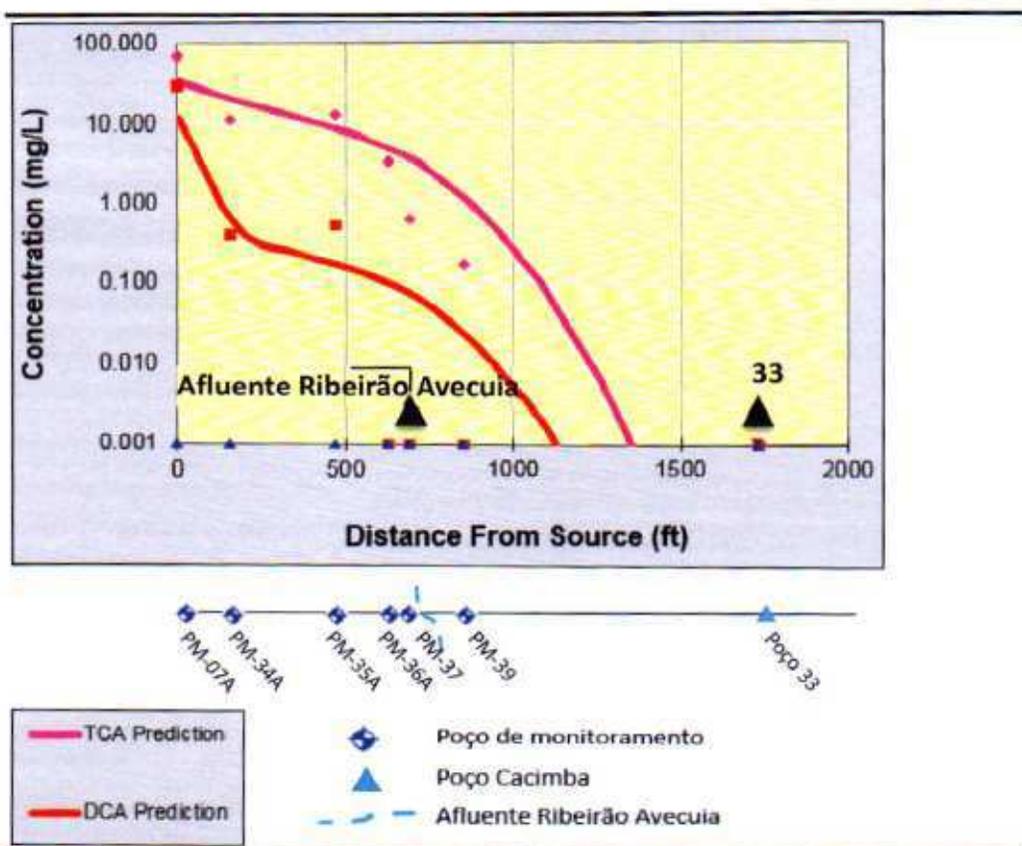
Os resultados diretos obtidos pela Sanifox vêm sendo apresentados semestralmente, através dos relatórios de monitoramento da qualidade da água subterrânea e superficial.

2. Cenário Futuro

A Figura 4.5, apresentada abaixo, indica o comportamento das plumas de etanos clorados dentro de 20 anos, em relação ao período atual.

Figura 4.5

Gráfico Cenário Futuro (20 anos) para Etanos Clorados na Linha 1 - Concentração versus Distância da Fonte



A simulação para o cenário futuro aponta que a concentração de chegada de 1,1,2-TCA e 1,2-DCA no aflúente do Ribeirão Avecuia tenderia a aumentar nos próximos 20 anos. No entanto, afrente da pluma não atingiria o poço cacimba do Sítio Marabo (33). A comparação entre as concentrações atuais (calibração) e daqui 20 anos é mostrada na Tabela 4.5.

No entanto, deve ser ressaltado que, apesar do modelo mostrar o aumento da concentração dos compostos de interesse no cenário futuro, em relação as concentrações de calibração que representariam o cenário atual para o modelo, as simulações são classificadas como conservadoras, já que considera fontes constantes sem decaimento e desconsidera os processos de diluição natural que ocorrem na água. A formulação de Domenico, usada no Biochlor e no PREMChlor, não inclui efeitos de diluição por recarga, que tendem a ser importantes na frente da pluma.

Tabela 4.5 Comparação entre simulações de Calibração (cenário atual) e em 20 anos para Etanos Clorados na Linha 1, no aflúente Ribeirão Avecuia

Composto	Concentração de Chegada no Aflúente do Ribeirão Avecuia	
	Calibração (mg/L)	20 anos (mg/L)
1,1,2-TCA	0,339	3,228
1,2-DCA	0,006	0,061

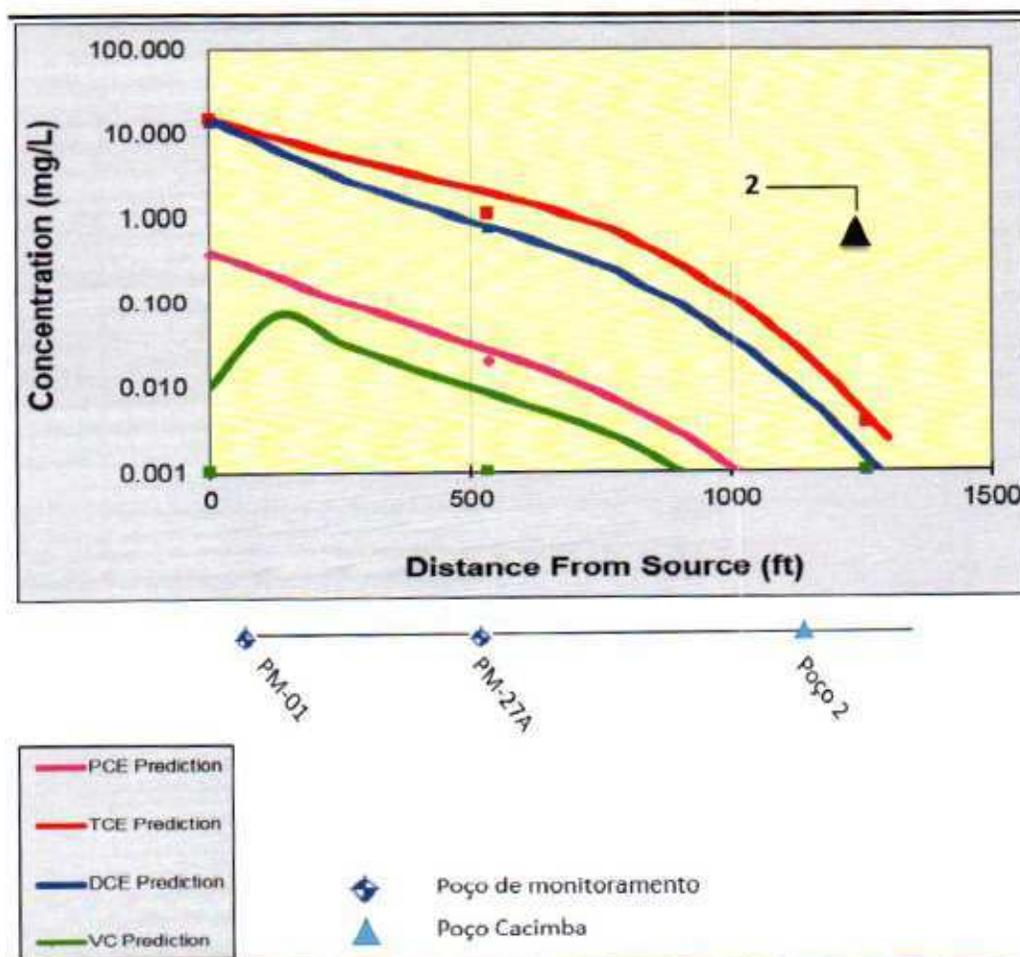
Os resultados e discussões da calibração do Biochlor para os etenos e etanos clorados na Linha 5, assim como as simulações para cenários futuros são apresentados nos itens a seguir.

i. Etenos Clorados

1. Calibração

A Figura 4.6 abaixo apresenta a calibração de etenos clorados da Linha 5 realizada pelo Biochlor.

Figura 4.6. Gráfico Resultante da Calibração para Etenos Clorados na Linha 5 - Concentração versus Distância da Fonte



Nessa linha de fluxo também não é verificada, de acordo com os resultados das amostras de água subterrânea coletadas em março/abril de 2017 pela Sanifox, a formação de cloreto de vinila conforme a predição do Biochlor. Os resultados das campanhas do segundo semestre de 2017 e do primeiro semestre de 2018, também não seguem o mesmo padrão indicado pela calibração no Biochlor. Provavelmente, nesta Linha de fluxo, a formação do

cloreto de vinila esteja ocorrendo de maneira lenta, ou a degradação total para etenos e etanos esteja ocorrendo rapidamente. Mais uma vez, ressalta-se que o monitoramento de eteno e etano não foi realizado nas campanhas até a presente data.

A calibração do Biochlor para etenos na Linha 5 demonstra que a frente das plumas atinge o poço cacimba 2 (que é localizado na Chácara DECK). Este resultado é condizente com o cenário atual, uma vez que são obtidas concentrações de Tricloroetano nesse poço, nos monitoramentos realizados pela CETESB, porém em concentração inferior ao nível de intervenção dos valores orientadores da CETESB 2016.

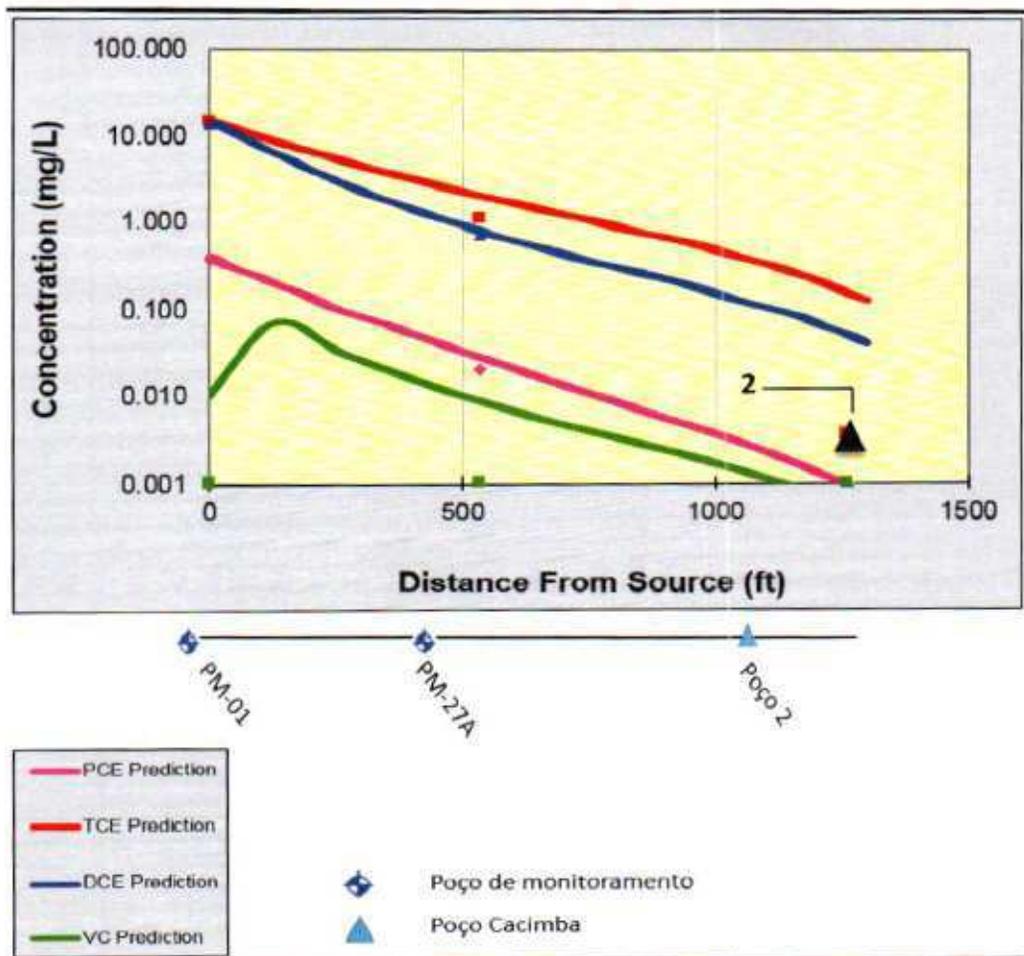
Novamente, ressalta-se que, as concentrações consideradas de calibração atual no modelo para os compostos simulados são maiores do que as obtidas nas medições diretas feitas pela Sanifox nos pontos monitorados do córrego, assim como na nascente amostrada pela CETESB. Esse fator indica que o modelo é conservador, uma vez que o mesmo considera fontes constantes, sem decaimento, assim como desconsidera o processo de diluição natural que ocorre na água. Além disso, a formulação de Domenico, usada no Biochlor e no PREMChlor, não inclui efeitos de diluição por recarga, que tendem a ser importantes na frente da pluma. Portanto, esses resultados sugerem que, em geral, o modelo apresenta concentrações superestimadas (entre 2,5 a 4 vezes superiores as obtidas nas amostragens diretas), não confirmadas assim pelos resultados obtidos através das amostragens diretas. Essa mesma limitação também ocorre para as simulações futuras, onde o modelo superestima tanto a distância de migração da pluma, como as concentrações de chegada.

2. Cenário Futuro

A simulação de etenos clorados, na Linha 5, para o cenário em 20 anos em relação ao período atual é apresentada na Figura 4.7 abaixo. Essa simulação, assim como as simulações anteriores, considera fontes com concentração constante e sem efeitos de remediação.

Figura 4.7

Gráfico Cenário Futuro (20 anos) para Etenos Clorados na Linha 5 - Concentração versus Distância da Fonte



O modelo indica, de forma conservadora, que a frente das plumas de TCE e DCE atingiria e passaria o poço cacimba 2, o que significa que em 20 anos, a concentração de ambos compostos tenderia a aumentar no poço em questão. De acordo com as simulações, as plumas de PCE e VC, no entanto, não atingiriam o poço cacimba 2. A comparação das concentrações obtidas no receptor na calibração e na simulação futura é apresentada na Tabela 4.6.

No entanto, deve ser ressaltado que, apesar do modelo indicar o aumento da concentração dos compostos de interesse no cenário futuro, em relação as concentrações de calibração que representariam o cenário atual para o modelo, as simulações são classificadas como conservadoras, já que consideram fontes constantes, sem decaimento, e desconsideram o processo de diluição natural que ocorre na água. Além disso, a formulação de Domenico, usada no Biochlor e no PREMChlor, não inclui efeitos de diluição por recarga, que tendem a ser importantes na frente da pluma.