

## **Análise da Vulnerabilidade do Lençol Freático à Contaminação por Hidrocarbonetos em Cenário de Vazamentos na Área do Oleoduto Orsul II, Refap-Copesul, RS**

**Ricardo Giumelli Marquezan Nelson Oswaldo Luna Caicedo**

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS  
rgmarquezan@yahoo.com.br, caicedo@iph.ufrgs.br*

**Artur Cezar Bastos Neto**

*Instituto de Geociências, UFRGS  
artur.bastos@ufrgs.br*

**Nilo Chagas de Azambuja Filho**

*High Resolution Technology & Petroleum, RJ  
nilo@hrt.com.br*

*Recebido: 07/05/09 - revisado: 28/10/09 - aceito: 08/01/10*

---

### **RESUMO**

*Este estudo usou conceitos derivados da metodologia DRASTIC (Aller et al., 1987) para proceder à avaliação do potencial de vulnerabilidade natural (PVN) à contaminação do lençol freático no trajeto do oleoduto ORSUL II que liga a Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) ao Complexo Petroquímico do Sul (COPESUL), região metropolitana de Porto Alegre, RS. O sistema de informações geográficas (SIG) foi empregado para gerar os planos de informações referentes as variáveis utilizadas na avaliação, executar o cruzamento destes planos e obter o índice do potencial de vulnerabilidade (IPV). A aplicação da modelagem do fluxo permitiu a geração do mapa de recarga do aquífero a partir das cargas hidráulicas observadas e a criação de cenários de vazamentos no duto mostrando o deslocamento advectivo da contaminação. O modelo de avaliação do potencial de vulnerabilidade natural foi testado considerando-se as hipóteses de pequenos vazamentos e de grandes derrames de curta duração. Neste último, o potencial de vulnerabilidade do aquífero foi avaliado invertendo-se os escores do fator profundidade do N.A., obtendo-se o mapa da oportunidade de contaminação por injeção de massa. A abordagem empregada neste trabalho identificou uma diversidade de situações hidrogeológicas ao longo do duto, cujo conhecimento é fundamental para o planejamento de medidas de prevenção, planos de contingência e monitoramento.*

**Palavras-chave:** *oleoduto, água subterrânea, vulnerabilidade de aquífero.*

---

### **INTRODUÇÃO**

O oleoduto é o meio de transporte mais seguro para petróleo e derivados, mas também está sujeito a acidentes acarretando em contaminação das águas subterrâneas. Não obstante, os critérios prioritários para escolha das rotas dos dutos relacionam-se à obra de engenharia, a fatores econômicos e à distribuição da ocupação humana, sem preocupação com os mananciais subterrâneos. Mesmo para um duto implantado, a vulnerabilidade dos aquíferos no seu entorno deveria ser investigada para pla-

nejamento de medidas de prevenção e ações de remediação, entretanto, isto não ocorre. Este fato deve-se, em parte, à não existência de metodologias específicas.

O presente estudo usou conceitos derivados da metodologia DRASTIC (Aller et al., 1987), desenvolvida para avaliação do potencial de vulnerabilidade natural (PVN) de aquíferos em escala regional, para avaliar a vulnerabilidade do lençol freático em relação ao sistema de dutos ORSUL II que liga a Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) ao Complexo Petroquímico do Sul (COPESUL), região metropolitana de Porto Alegre, RS, Figura 1.

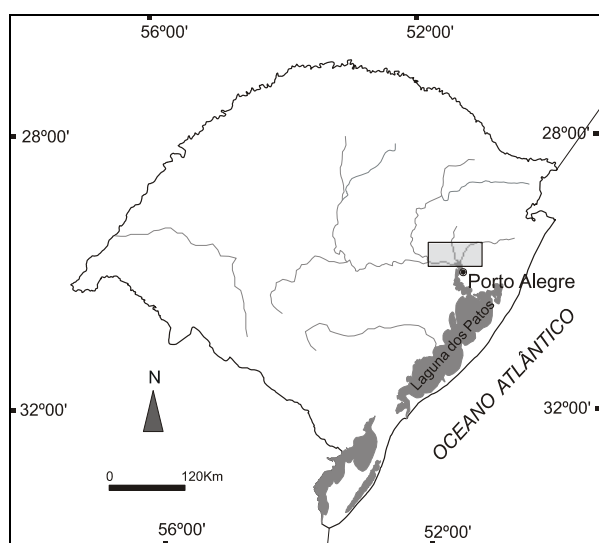


Figura 1 - Mapa de localização da área

## METODOLOGIA

O sistema de dutos ORSUL II tem 25 km de comprimento e uma faixa de domínio com 20 metros de largura. Em toda sua extensão encontra-se enterrado a profundidades variando entorno de 2 m. Como área de estudo no seu entorno, definiu-se uma faixa com 32 km de comprimento por 14 km de largura. O levantamento de dados foi efetuado junto a órgãos e empresas públicas, centros de pesquisas e empresas privadas. Os trabalhos de campo consistiram no georeferenciamento dos dados com GPS, em reconhecimento geológico e de solo (com apoio de fotografias aéreas e imagens de satélite) e na execução de testes de permeabilidade. O banco de dados (Marquezan, 2000, 2008) foi composto por: mapas topográficos (1:50.000) folhas São Leopoldo (SH.22-V-D-VI-4) e Morretes (SH.22-V-D-VI-3); fotografias aéreas (1:40.000), voo 090 FAB/METROPLAN; imagens TM-LANDSAT, bandas 3, 4 e 5, órbita 221.081; mapas de solos de IBGE (1986); mapas geológicos de Frank (1989) e Nowatzki (1992); seções geológicas de 88 poços tubulares obtidas junto às empresas HIDROGEO e CORSAN; descrições e planilhas de dados de 499 locais com informações provenientes de sondagens elétricas verticais, geotécnicas (SPT) e a trado e de piezômetros, obtidas junto às empresas SERKI, ESTASUL e CIENTEC; dados de condutividade hidráulica de 60 piezômetros (*slug* tests) e de 34 sondagens geotécnicas obtidas junto às empresas COPESUL e

REFAP; 26 furos de trado e *slug* tests efetuados para este trabalho.

O potencial de vulnerabilidade natural (PVN) à contaminação das águas subterrâneas refere-se à relativa facilidade com que um contaminante aplicado na superfície do terreno possa migrar até o freático face às propriedades do meio físico. Nesta avaliação, consideram-se as características intrínsecas dos materiais geológicos da zona vadosa. Os fatores hidrogeológicos empregados foram: profundidade do nível d'água, taxa de recarga, característica geológica do aquífero, característica da cobertura do solo, declividade do terreno e condutividade hidráulica do aquífero. Cada um destes fatores hidrogeológicos constituiu um plano de informação georeferenciado (Datum WGS-84) dentro do sistema de informações geográficas, permitindo que se efetuassem operações com os mesmos. Os atributos de cada um dos fatores hidrogeológicos foram classificados recebendo valores entre 1 e 10. A cada fator atribuiu-se um peso, de 1 a 5, conforme sua importância relativa na avaliação do PVN (Tabela 1). O PVN é representado por um índice de potencial de vulnerabilidade (IPV) obtido pelo somatório dos produtos dos fatores por seus pesos.

Tabela 1 - Fatores hidrogeológicos adotados na avaliação do potencial de vulnerabilidade

FATORES	Pesos*
Profundidade do nível de água	5
Recarga do aquífero	4
Meio geológico do aquífero	3
Tipo de Solo	2
Declividade do terreno	1
Condutividade Hidráulica	3

\* Pesos definidos no DRASTIC.

Os planos de informação dos fatores meio geológico, tipo de solo e recarga foram gerados no AutoCAD®. Os planos de informação de propriedades contínuas (declividade do terreno, profundidade do nível d'água e condutividade hidráulica) foram gerados no SURFER®. Utilizou-se o IDRISI® para transformação dos planos para o formato *raster* e efetuar as operações de sobreposição e cruzamento. As informações adicionais sobre os dois últimos aplicativos supracitados são encontradas, respectivamente, em Keckler (1995) e Eastman (1995)..

Neste trabalho, ajustou-se um modelo de simulação do fluxo para obtenção do mapa de taxas de recarga dos aquíferos e criação de cenários de

vazamentos. O modelo foi testado considerando-se que a contaminação por hidrocarbonetos transportados pelo duto pode ser ligada a pequenos vazamentos constantes ou a grandes acidentes de curta duração.

## OS FATORES HIDROGEOLÓGICOS E A VULNERABILIDADE NATURAL

Quanto maior a profundidade do freático, maior é a possibilidade de atuação de processos de atenuação. Na avaliação do PVN, a profundidade do N.A. recebe o maior peso. Este fator hidrogeológico varia na área (Figura 2) entre 0 e 15 m. A classificação consta na Tabela 2.

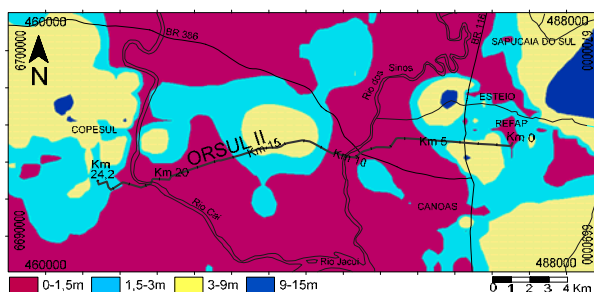


Figura 2 - Mapa da profundidade do nível d'água.

Tabela 2 - Profundidade do nível d'água

Intervalos (m)	Score	Área (km <sup>2</sup> )	%
0 -1,5	10	218,75	49,75
1,5 -3	9	110,63	25,16
3 - 9	7	100,04	22,75
9 -15	5	10,21	2,32

A recarga natural do aquífero, traduzida pela quantidade de água proveniente das precipitações que efetivamente alcança o aquífero, é caracterizada para cada região e a taxa com que esta se processa. Quanto maior a recarga de uma área, mais vulnerável será o aquífero.

Para o cálculo do mapa de recarga foi primeiramente simulado o fluxo subterrâneo (Figura 3) usando-se o modelo FLOWPATH® (Waterloo Hydrogeologic, Inc.). O modelo foi calibrado com base no mapa da superfície piezométrica observada

através de informações de sondagens elétricas e piezômetros. As taxas de recarga utilizadas para calibrar o modelo foram classificadas obtendo-se, assim, o mapa de taxas de recarga (Figura 4). Os valores obtidos são compatíveis com os valores de recarga calculada por balanço hídrico para a região de Porto Alegre (Hausman, 1995). Para classificação em intervalos percentuais (Tabela 3), considerou-se como limite superior o valor de 105 mm/ano correspondendo a 8% da precipitação média anual de 1322 mm da Grande Porto Alegre.

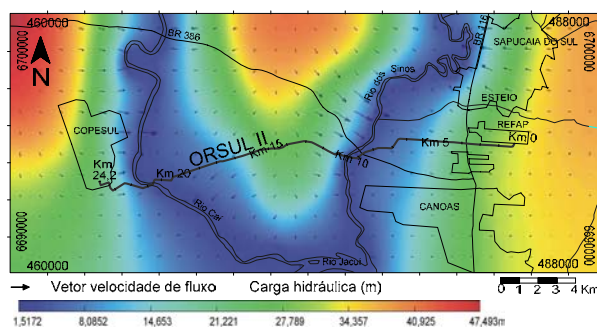


Figura 3 - Mapa piezométrico obtido na simulação do fluxo da água subterrânea na área do oleoduto ORSUL II.

Tabela 3 - Recarga do aquífero

Intervalos (mm/ano)	Score	Área (km <sup>2</sup> )	%
>53	7	62,25	14,16
32-53	5	72,47	16,48
11-32	3	26,58	6,05
<11	1	278,38	63,31

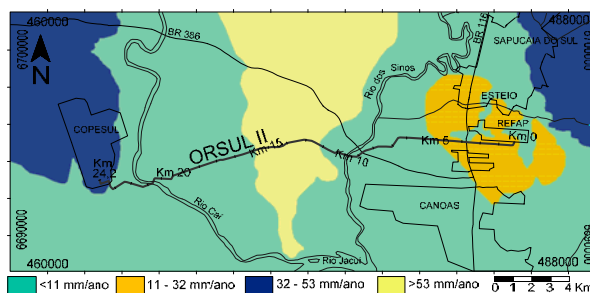


Figura 4 - Mapa de recarga.

Na área de estudo ocorrem rochas sedimentares da Bacia do Paraná e sedimentos aluviais e coluviais (Figura 5) A avaliação do meio geológico

focalizou a porção superior dos aquíferos, considerando-os como inteiramente livres, embora aquíferos semi-confinados possam ocorrer (CPRM, 1997). Na atribuição dos escores (Tabela 4), consideraram-se os aspectos composicionais, texturais (granulometria, seleção e empacotamento) e estruturais (estratificação, fraturas), o relacionamento intergranular (dissoluções) e o fraturamento das litologias dos sistemas de aquíferos. Estas características exercem controle sobre o fluxo, influenciando no tempo de atuação dos processos de atenuação. O deslocamento mais fácil no meio poroso aumenta o PVN. Os maiores escores foram atribuídos às formações predominantemente arenosas (Tabela 4). Os depósitos aluviais e colúviais, onde níveis de argila são mais frequentes, receberam os escores mais baixos.

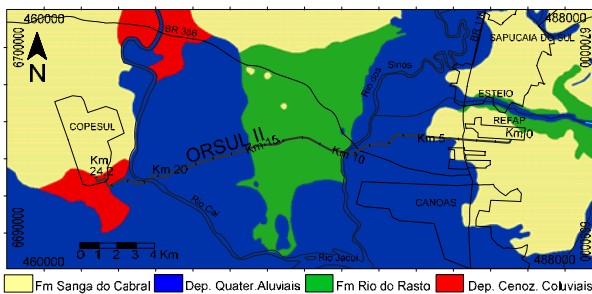


Figura 5 - Meio geológico

Tabela 4 - Unidades geológicas

Unidades	Escore	Área (km <sup>2</sup> )	%
Fm. Sanga do Cabral	7	147,91	33,64
Formação Rio do Rasto	6	59,33	13,49
Depósitos Aluviais	5	214,56	48,80
Depósitos Colúviais	4	17,84	4,05

Características do solo como relação finos/arenosos, composição química, presença de argila (expansiva ou não), matéria orgânica e espessura dos horizontes influenciam no tempo de atenuação, permitindo a atuação de mecanismos, como, troca iônica, sorção, diluição etc, que podem diminuir a concentração do contaminante (Domenico e Schwartz, 1990). A cobertura de solos (Figura 6 e Tabela 5) foi separada em: PVa1 (Podzólicos vermelho amarelo e vermelho escuro álicos; textura arenosa/média), PVa2 (Podzólico vermelho amarelo álico; solos colúviais álicos e distróficos; textura

areno-argilosa), PLe1 (Planossolo eutrófico, textura arenosa média), PLe2 (Planossolo eutrófico e Glei pouco húmico eutrófico; textura média/argilosa), GPH (Glei pouco húmico eutrófico.; Horizonte A moderado, textura média e argilosa).

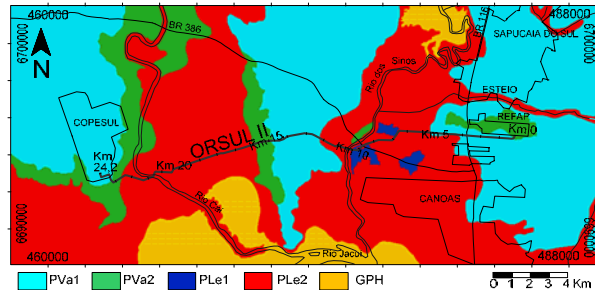


Figura 6 - Mapa de solos.

Tabela 5 - Tipos de solos

Unidades	Escore	Área (km <sup>2</sup> )	%
Pva1	9	182,25	41,45
Pva2	6	36,65	8,34
PLe1	5	2,59	0,59
PLe2	4	183,08	41,64
GPH	3	35,07	7,98

Uma baixa declividade do terreno tende a favorecer a infiltração do contaminante, aumentando o PVN. Os intervalos de declividade (Tabela 6), expressos em percentagem da declividade máxima, foram estabelecidos com base na classificação do Soil Conservation Service (in Aller *et al.*, 1987), relacionando declividade e escoamento superficial/erosão. A partir do modelo numérico do terreno, foi obtido o mapa final de declividade (Figura 7).

Tabela 6 - Declividade

Intervalos (%)	Escore	Área (km <sup>2</sup> )	%
0-2	10	383,24	87,52
2-6	9	33,94	7,84
6-12	5	15,77	3,60
12-18	3	4,89	1,12
>18	1	1,80	0,41

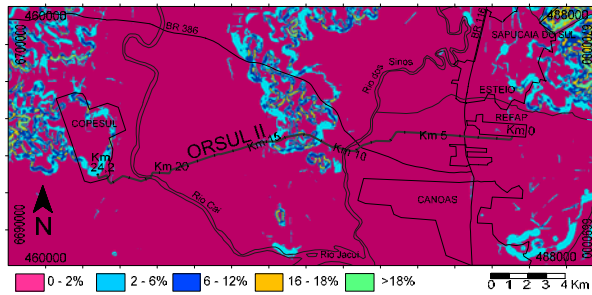


Figura 7 - Mapa de declividade

A condutividade hidráulica (Figura 8) é controlada, principalmente, pela quantidade de espaços porosos interconectados decorrente das características texturais (tamanho de grão, arredondamento, esfericidade e seleção) e estruturais (estratificação, juntas e fraturas) dos materiais geológicos. A condutividade hidráulica varia tanto verticalmente como horizontalmente. Os dados de condutividade hidráulica se referem aos materiais geológicos da zona não-saturada no entorno da superfície do N.A. A distribuição dos valores de condutividade hidráulica foi obtida a partir da interpolação dos dados pontuais, variando entre  $10^{-3}$  m/dia e 1 m/dia. A classificação (Tabela 7) foi efetuada com base na adoção de proporções do desvio padrão em relação a média.

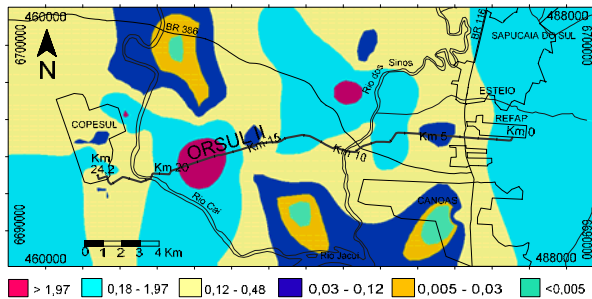


Figura 8 - Mapa de condutividade hidráulica.

Tabela 7 - Escores atribuídos à condutividade hidráulica

Intervalos (m/dia)	Escore	Área (km <sup>2</sup> )	%
>1,97	10	7,08	1,61
0,48-1,97	9	181,98	41,39
0,12-0,48	7	181,01	41,17
0,03-0,12	5	49,78	11,32
0,005-0,03	3	15,14	3,44
<0,005	1	4,65	1,06

Tentativas de subdivisão dos IPV em mais de três intervalos resultaram em resoluções incompatíveis com as características da área e a densidade de informações. Assim, os IPV obtidos foram subdivididos em três classes de potencial (Tabela 8) definidas com base na proporção do desvio padrão, estabelecendo as classes centradas na média (Burrough, 1986).

As zonas de PVN alto (Figura 9) situam-se dentro dos domínios de afloramento das Formações Sanga do Cabral e Rio do Rasto (Figura 5). Mas, a superposição dos diversos fatores hidrogeológicos arrolados no modelo acarretou na identificação, dentro destes domínios, de zonas com PVN médio. Do mesmo modo, nos domínios aluvionares, que possuem, caracteristicamente, PVN médio, foram identificadas diversas zonas de PVN baixo por influência, principalmente, dos solos, dos baixos valores de condutividade hidráulica ou, mais localmente, por maiores profundidades do N.A.

Tabela 8 - Classes do potencial de vulnerabilidade natural e distribuição areal.

PVN	Intervalo de classe dos IPVs	Área km <sup>2</sup>	%
Baixo	< 103	69,5	15,8
Médio	103-130	276,9	62,9
Alto	>130	93,2	21,2

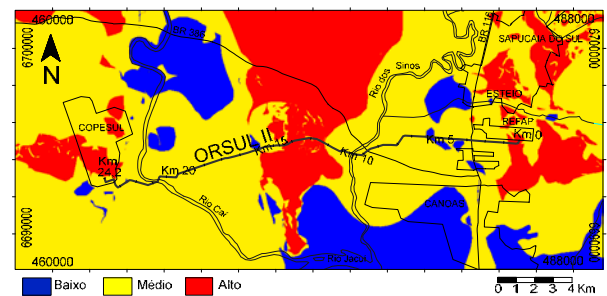


Figura 9 - Mapa do potencial de vulnerabilidade.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E APLICAÇÃO PARA OS DUTOS

O método DRASTIC considera fatores hidrogeológicos que são, em sua maioria, inter-relacionados pela litologia. A resolução do mapa dependerá da densidade de informações sobre os demais fatores hidrogeológicos. O que se espera do



modelo é que ele possa distinguir, dentro de cada domínio geológico, áreas com diferentes PVNs, numa escala com definição suficiente para trazer implicações sobre a localização do duto. Este objetivo foi atingido com a classificação dos IPV's em três intervalos (Figura 9), onde observa-se que dos 6 km atravessados pelo duto em terrenos da Formação Rio do Rasto (Figura 5), 2,5 km correspondem a áreas com PVN alto (Figura 9). O trecho atravessando áreas de PVN alto poderia ter sido menor se o traçado do duto fosse mais ao sul, onde a zona de PVN alto tem uma largura de apenas 1 km.

A metodologia DRASTIC objetiva a análise da vulnerabilidade natural dos aquíferos, ou seja, independentemente da fonte de contaminação. Ao considerar-se a presença do duto, introduz-se o conceito de risco e, conseqüentemente, a composição do contaminante(s), seu(s) comportamento(s) face ao meio poroso e a forma de liberação no meio ambiente devem ser considerados. No presente trabalho, fizeram-se necessárias simplificações com relação à composição do contaminante e à forma de liberação, sendo esta abordada em dois casos extremos: pequenos vazamentos não perceptíveis aos equipamentos de controle e derrame de grandes proporções.

No caso de pequenos vazamentos, os mecanismos de proteção ao aquífero são os mesmos considerados na análise do PVN. Por exemplo, os fatores hidrogeológicos declividade da superfície do terreno e cobertura de solo, mesmo tratando-se de um duto enterrado, continuam exercendo influência na quantidade de água infiltrada, cujo movimento descendente contribui no transporte do contaminante até o freático e, principalmente, porque neste caso o oleoduto acompanha razoavelmente a superfície do terreno. A massa de contaminante liberada é relativamente pequena em relação às condições do meio e, geralmente, pode ser parcialmente dissolvida na água. Portanto, o mapa de PVN (Figura 9) traduz, também, o potencial de vulnerabilidade à contaminação de pequenos vazamentos.

No caso de derrame de volume expressivo de óleo em tempo relativamente curto, a contaminação do freático ocorre por processo de injeção de massa em uma área. O óleo só tem oportunidade de infiltrar-se em grande volume em locais com N.A. profundo e baixa saturação de água no solo. Tal situação foi constatada no vazamento da REPAR (Araucária, PR), onde a infiltração de óleo em grande volume ocorreu nas áreas com N.A. profundo, apesar de situadas em encosta e das condutividades hidráulicas serem baixas; a infiltração de óleo foi extremamente dificultada nas áreas com N.A.

raso e maior saturação de água no solo, mesmo sendo planas e com alta condutividade hidráulica (Bastos Neto *et al.*, 2001). Diante do exposto, foram atribuídos pesos maiores as profundidades menores, proseguindo-se ao cruzamento dos planos de informação. O mapa obtido (Figura 10) traduz a oportunidade de contaminação por injeção de massa. O duto atravessa, na parte central da área, uma zona de alta oportunidade de contaminação que teria sido evitada por um traçado mais ao sul. Por outro lado, há que se considerar que zonas com freático excessivamente raso devem ser evitadas por questões de engenharia.

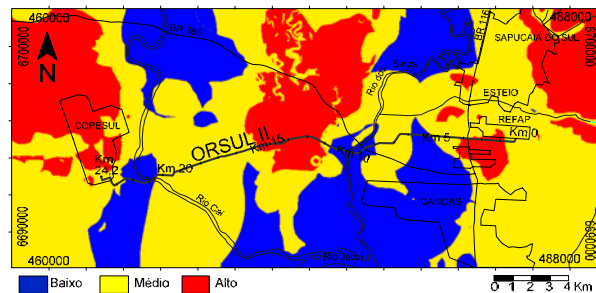


Figura 10 - Mapa de oportunidade de contaminação por injeção de massa.

A partir do modelamento do fluxo da zona saturada efetuaram-se simulações em condições de fluxo permanente, com contaminante conservativo e transporte advectivo (Figura 11). As simulações de pequenos vazamentos (pontos 1, 2 e 4) evidenciam a diversidade de situações ao longo do duto, com relação à direção e velocidade de propagação do contaminante. Pequenos vazamentos seriam pouco significativos como contaminação para os recursos hídricos superficiais, mas poderiam ser muito prejudiciais à qualidade das águas subterrâneas nos diversos pontos de captação existentes ao longo dos trajetos representados na Figura 11. A partir desta simulação, poder-se-ia posicionar uma rede de monitoramento e estabelecer os pontos para instalação de poços de bombeamento para interceptação do fluxo do contaminante evitando que ele atinja pontos críticos. A simulação do ponto 3 representa um vazamento de grandes proporções onde o duto atravessa a área de maior oportunidade de contaminação por injeção de massa. Esta área coincide com o divisor do fluxo das águas subterrâneas, o que acarreta no agravamento da situação em caso de acidente, visto o grande espalhamento da contaminação.

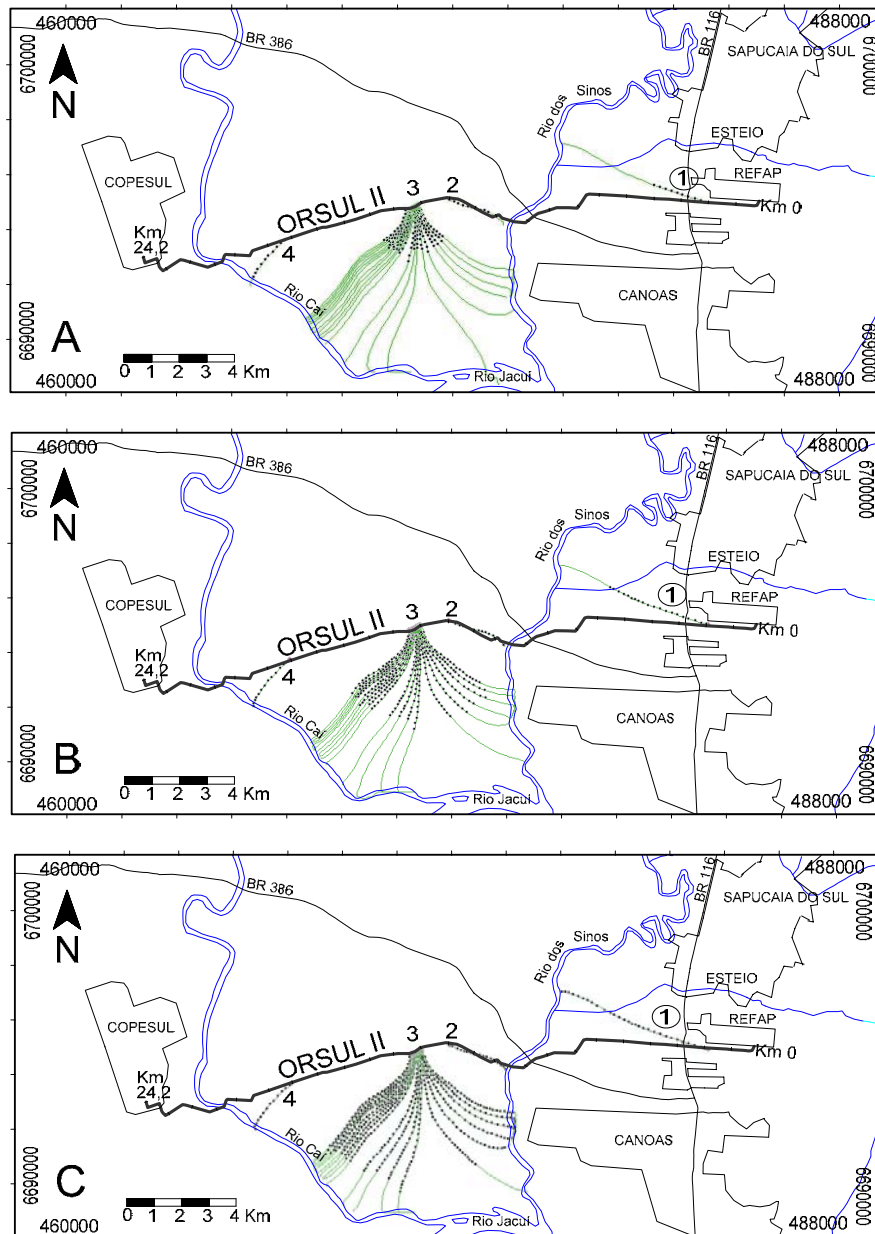


Figura 11 - Trajetória e deslocamento progressivo das partículas: (A) após 1000 dias; (B) após 2000 dias; (C) após 3000 dias. Ao longo de cada trajetória, a distância entre dois pontos marca o intervalo de 100 dias.

Duas restrições importantes estão relacionadas intrinsecamente a esta metodologia: o caráter subjetivo do sistema de pesos e valores atribuídos, respectivamente, aos parâmetros e atributos; não permitindo a validação dos resultados. O aspecto da subjetividade incluído no sistema de índices deste tipo de avaliação é a principal limitação desta metodologia. Porém, a restrição à validação dos resultados pode ser tentativamente contornada. A alterna-

tiva comumente empregada consiste em efetuar a validação dos resultados tomando por base o conhecimento que se dispõe sobre a região analisada. Ou ainda, a tentativa de validação poder ser confrontada com os resultados de algum tipo de avaliação regional disponível (ex: avaliação da qualidade da água).

Considerando as limitações da metodologia, a avaliação da vulnerabilidade à contaminação, efetuada neste estudo, deve ser compreendida como a

avaliação inicial de um conjunto de práticas que podem ser executadas para auxiliar na proteção dos mananciais subterrâneos no trajeto de oleodutos. Esta participação pode ocorrer ainda na etapa da avaliação do traçado do oleoduto. Neste caso, o resultado da avaliação de vulnerabilidade, pode, também, ser empregado como plano de informação ou parâmetro a ser analisado junto com outros parâmetros de engenharia. No caso do oleoduto implantado, o resultado da avaliação pode ser usado para selecionar locais que justifiquem a execução de estudos adicionais.

## CONCLUSÕES

Este estudo usou conceitos derivados da metodologia DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), aplicados dentro do sistema de informações geográficas (SIG), para proceder à avaliação do potencial de vulnerabilidade dos aquíferos no trajeto do oleoduto ORSUL II que liga a Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) ao Complexo Petroquímico do Sul (COPEL), região metropolitana de Porto Alegre, RS.

A área de estudo compreende dois domínios geológicos principais, o de arenitos da Bacia do Paraná, de vulnerabilidade mais alta, e o de sedimentos aluvionares, de vulnerabilidade mais baixa. A metodologia utilizada mostrou-se hábil em distinguir dentro de cada domínio áreas com diferentes PVNs numa escala com definição suficiente para trazer implicações sobre a localização do duto. Este tem, de modo geral, um traçado adequado atravessando, principalmente, áreas com PVN médio e baixo. Apenas na porção central da área, atravessa uma faixa de rochas arenosas favoráveis à contaminação do freático. Entretanto, a influência dos demais fatores hidrogeológicos arrolados no modelo faz com que o PVN seja atenuado em grande parte desta faixa.

Os conceitos utilizados na análise de PVN podem ser mantidos em determinadas situações. O mapa de PVN representa, também, o potencial de vulnerabilidade dos aquíferos em relação ao duto no caso de pequenos vazamentos. Já no caso de grandes vazamentos, o potencial de vulnerabilidade natural do aquífero passa a ser traduzido pelo mapa de oportunidade de contaminação por injeção de massa, no qual o parâmetro profundidade do N.A. é considerado de forma inversa ao mapa anterior. No entanto, a inversão no conceito de proteção ao aquífero associada a este parâmetro não torna os dois mapas incompatíveis, sendo possível identificar traça-

dos adequados segundo ambas abordagens. No caso estudado, este traçado deveria ser deslocado cerca de 3km mais ao sul, onde a faixa de alta vulnerabilidade natural é mais estreita (Figura 9) e a zona de alta oportunidade de contaminação por injeção de massa desaparece (Figura 10). O modelamento do fluxo subterrâneo revelou-se uma ferramenta poderosa para o planejamento de redes de monitoramento e de ações de remediação, permitindo a localização de poços e o dimensionamento de parâmetros de bombeamento para retirada do contaminante. A abordagem empregada neste trabalho permitiu salientar a existência, ao longo do duto, de uma diversidade de situações hidrogeológicas cujo conhecimento é fundamental para o planejamento de monitoramento, medidas de prevenção e planos de contingência.

Estudos mais detalhados poderiam incluir dois planos de informação adicionais. O de condutividade do óleo no solo, a ser elaborado, na medida do possível, a partir de ensaios de campo considerando as direções vertical e horizontal. E o plano de saturação do solo, considerando as diferentes estações do ano e condições climáticas específicas.

Finalmente, observa-se que os dados levantados para o estudo direcionado aos aquíferos representam uma importante base para estudos de previsão do escoamento superficial relacionado a um vazamento.

## AGRADECIMENTOS

A PETROBRÁS financiou a parte inicial deste trabalho, realizada no quadro de uma dissertação de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS. A continuidade do trabalho, no quadro de uma tese de doutoramento em desenvolvimento junto ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da UFRGS foi assegurada pelo projeto FINEP-CTPETRO, processo 650002600. Os autores agradecem ao Dr. Nelson Lisboa e aos estudantes de geologia Maurício Prado, Marcelo Schwarz e Maicol da Rosa.

## REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. (1985) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeo-



- logic Settings. EPA/600/2-85/018. R.S.Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma, 163 p.
- BASTOS NETO, A.C.; CAICEDO, N.O.L.; MELO, C.L. (2000) Contaminação do lençol freático na área do Ponto Zero (município de Araucária, PR) Relatório REPAR, 93 p.
- BURROUGH, P.A. (1986) *Principles of Geographical Information Systems for Land Assessment*. Oxford University Press. Oxford, 191 p.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, CPRM (1997) *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. Porto Alegre. Folha SH-22-Y-B. Estado do Rio Grande do Sul. Brasília, 250 p.
- DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W., (1990) *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons. EUA. 822 p.
- EASTMAN, R.J. (1995) *Idrisi for Windows. User's Guide*. Clark University, MA. EUA.
- FRANK, H. T. (1989) *Geologia e Geomorfologia das Folhas de Morretes, São Leopoldo, São Jerônimo, Guaíba e Arroio dos Ratos, RS*. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 160 p.
- HAUSMAN, A. (1995) *Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul-RS*. Acta Geológica Leopoldensia. Série Mapas, Nº2, 127 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE (1986) Folha SH.22 Porto Alegre e Parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Levantamento de Recursos Naturais Volume 33. Rio de Janeiro, 796 p.
- KECKLER, D. (1995) *Surfer for Windows. Version 6. User's Guide*. Golden Software, Inc. CO. EUA.
- MARQUEZAN, R.G. (2000) *Avaliação do potencial de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na área do sistema de dutos REFAP-COPESUL, Triunfo, RS*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. 167 p.
- MARQUEZAN, R.G. (2008) *Análise de Recursos Digitais como Ferramentas de Avaliação em Ações de Proteção de Aquíferos no Trajeto de Oleodutos*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. 158p.
- NOWATZKI, C.H ; CASTRO PAULA, C. & ZELTZER, F. (1992) *Mapa Geológico da Folha de São Leopoldo, RS*. Acta Geológica Leopoldensia. Série Mapas, Nº1, 14 p.

### **Analysis of Groundwater Vulnerability to Hydrocarbon Contamination in a Scenario of Leakages in the Area of Orsul II Pipeline, Refap-Copesul, RS**

#### **ABSTRACT**

*This study used concepts derived from the DRASTIC methodology (Ailer et al. 1987) to evaluate the potential of natural vulnerability (PNV) for groundwater contamination on the route of the ORSUL II pipeline which connects Alberto Pasqualini Refinery (REFAP) to the Petrochemical Complex of the South (COPESUL), in the metropolitan region of Porto Alegre, Rio Grande do Sul. The geographic information system (GIS) was used to generate information plans for the variables used to evaluate and cross-match these plans and obtain the potential vulnerability index (PVI). The use of a flux model allowed the generation of the aquifer recharge map from the hydraulic loads observed and the creation of scenarios of leaks in the pipe, showing the advective displacement of contamination. The evaluation model for the potential of natural vulnerability was tested considering the hypotheses of small leaks and large short duration spills. In the latter, the potential vulnerability of the aquifer was evaluated inverting the scores of the depth factor of the N.A., obtaining the map of contamination opportunities by mass injection. The approach used in this study identified different hydrogeological situations along the pipeline. They must be known in order to plan preventive measures, contingency plans and monitoring.*

**Keywords:** pipeline, groundwater, aquifer vulnerability.