

**ESTUDO DO IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO POR NITROGÊNIO NUMA
BACIA HIDROGRÁFICA CÁRSTICA**
*STUDY OF THE IMPACT OF NITROGEN POLLUTION IN A CARSTIC
HYDROGRAPHIC BASIN*

Elenice Fritzsos¹

N. Rizzi²

André Virmond Lima Bittencourt³

Luiz Eduardo Mantovani⁴

RESUMO

A região cárstica curitibana vem despertando um notável interesse em termos de exploração de água subterrânea, visando o abastecimento urbano e industrial. Entretanto, cada uso e ocupação da terra gera impacto diferenciado no ambiente, impacto este que necessita ser avaliado para fins de zoneamento e conseqüente conservação do meio. Iniciando este estudo na microbacia de Fervida, no município de Colombo, componente da bacia superior do rio Capivari, foi possível identificar, graças à grande diversidade de sistemas de ocupação do solo e uso da terra presente e sua interação com as diferentes feições pedológicas, as principais modalidades de impactos ligados aos recursos hídricos. Neste trabalho, utilizando um sistema de pesos que levaram em conta a presença de horizonte B textural, profundidade do solo e relevo, obteve-se uma série de valores que conduziram à seguinte conclusão: as zonas de maior vulnerabilidade correspondem as que compõem os solos litólicos e hidromórficos sobre calcários, enquanto as de menor vulnerabilidade seriam as Terras Brunas Roxas Estruturadas Eutróficas, que ocorrem exclusivamente sobre diabásio. Quanto ao impacto causado às águas subterrâneas que estaria ocorrendo na bacia, também definido por um sistema de pesos, observou-se que as áreas de habitação teriam um peso maior (maior dano específico ao ambiente). As situações de impacto extremo seriam nos solos litólicos e hidromórficos sobre calcário e sob habitação e, as de impacto muito baixo, seriam na Terra Bruna Roxa Estruturada Eutrófica sobre diabásio e sob terras agrícolas.

1 Mestre, doutoranda em Engenharia Florestal, UFPR e bolsista do CNPq;

2 Professor Doutor do Departamento de Engenharia Florestal, UFPR;

3 Professor Doutor Titular do Departamento de Geologia;

4 Professor Doutor do Departamento de Geologia.

ABSTRACT

Since early nineties, there has been considerable interest in the exploitation of underground water supplies - for domestic and industrial use - in the Curitiba carstic region. Municipalities of the region have demonstrated considerable population growth which, accompanied by an expansion of urban areas, present some of the highest growth rates in the country. Given that this is a region that is still largely devoted to agro-forestry and livestock production activities, a new strategic dimension is added to the picture. Along the borders of the region, competition is generated between rural and urban-industrial activities, as well as mining activities linked to limestone extraction. Since all of these uses have different impacts on the quantity and quality of water resources, a complex situation requiring specialized methods of landscape analysis emerges. Such a study was initiated in the micro-basin of Fervida, municipality of Colombo, part of the upper Capivari river basin. Widely diverse systems of soil and land use were identified therein, as well as their forms of interaction with different pedologic features and the principal forms of impact on water resources. In this research, we have used a system of weights which, taking into account the presence of textural horizon B, soil depth and relief, produced a series of values leading to the following conclusion: the zones of greater vulnerability are those made of litholic and hydromorphic soils over limestone, while those of lesser vulnerability are the Terras Brunas Roxas that appear exclusively over diabase. In relation to the impact of developments within the basin, similarly defined by a system of weights in which inhabited areas have a greater weight (greater environmental damage), inhabited areas with litholic and hydromorphic soils over limestone manifest "extreme impact", whereas TBREE over diabase and under agricultural usage show low levels of impact.

INTRODUÇÃO

As microbacias de Fervida e Ribeirão das Onças situam-se no município de Colombo e ocupam uma área de 13,15 km² e 3,53 km², respectivamente, sendo a segunda uma sub-bacia da primeira. A localização geográfica das mesmas está compreendida pelas latitudes 25°15' a 25°17'(S) e longitudes de 49°9' a 49°14'(W). A altitude varia de 916 a 975 m, onde as maiores elevações ocorrem na porção noroeste da área da bacia de Fervida, coincidindo com o substrato geológico de filito e quartzito, enquanto que as menores cotas estão a sudeste. Estas bacias pertencem ao sistema aquífero cárstico e hidrograficamente à bacia do Ribeira.

Esse aquífero é de grande potencialidade hidráulica e já vem sendo explorado pela Sanepar para abastecimento de Curitiba, sendo a água de excelente qualidade. Entretanto, a atividade agrícola na região é constituída de pequenas propriedades produtoras de hortaliças que praticam a agricultura de forma intensiva utilizando uma grande quantidade de insumos orgânicos e minerais, dentre eles o nitrogênio, como verificou Fritzsons (1999).

Dentro desse contexto, ocorreu o desenvolvimento deste trabalho, relacionado à minimização do impacto causado por estas atividades ao ambiente.

REVISÃO DE LITERATURA

Foster (1993) lembra que as águas subterrâneas, por se encontrarem total ou parcialmente confinadas, são geralmente mais protegidas da poluição que as águas superficiais, devido à presença do solo atuando como meio filtrante. Quando estas águas se tornam poluídas e se concentram num aquífero, este, por estar mais protegido é também mais difícil de ser recuperado, pois não está sujeito aos processos de autodepuração comuns aos sistemas livres, tais como fotodecomposição, ampla oxigenação, transformações microbianas aeróbicas etc. Em função das variáveis dependentes do meio físico, dos poluentes e da interação entre ambos, a avaliação criteriosa do efeito poluidor e a recuperação dos aquíferos poluídos é uma operação cara e tecnicamente difícil.

Fica também difícil prever quanto tempo leva um poluente emitido na superfície do terreno para atingir a zona saturada. Muchovej & Recheigl (1995) atestam que o tempo de transporte pode ser de anos ou até de décadas, dependendo de fatores tais como: profundidade do nível freático, a permeabilidade do substrato, fissuração da zona não saturada e taxa de recarga da superfície. Montañó (1994) indica que o tempo de transporte pode ser de anos para aquíferos homogêneos e até de dias para aquíferos cársticos.

Em relação ao efeito poluidor, o sistema aquífero subterrâneo confere vantagem em relação ao sistema hídrico superficial, em decorrência dos poluentes atravessarem o solo para alcançar a zona saturada. Neste processo poderia ocorrer remoção ou purificação de elementos devido a aeração, decomposição aeróbica, filtração, troca de íons, adsorção e absorção (Jain 1993).

A zona insaturada do solo constitui a primeira linha de defesa e pode ser monitorada. Assim, os aspectos pedológicos precisam ser levados em consideração, numa avaliação de vulnerabilidade (Falkenmark & Allard 1991).

Os solos diferem significativamente em relação ao seu poder depurador. Cadillon & Portier (1977), em trabalho realizado com diferentes tipos de solos, consideraram que a espessura, a textura e a estrutura influenciam diretamente no poder de filtração, na capacidade de retenção de água e na permeabilidade.

Em trabalho realizado com a aplicação de água residual urbana em sedimento de solo argiloso, Rizzi (1991) constatou que solos com esta textura apresentam maior superfície de contato com os colóides, maior capacidade de troca iônica, maior capacidade de retenção de água e mais baixa taxa de percolação, sendo portanto, mais eficientes como meio depurador. Esta capacidade se amplia com o aumento da profundidade do solo.

Existe uma interação complexa entre os contaminantes em função de certas características do solo, Maldonado (1991) considera entre estas características: a capacidade de troca de cátions (CTC), o potencial hidrogeniônico (pH), a matéria orgânica (MO), a textura, a permeabilidade, a composição do perfil do solo, a condutividade hidráulica e a geometria dos poros do solo. Em termos de amortização química, o principal parâmetro citado pelo autor se refere à CTC, não somente da argila, mas também da matéria orgânica.

O mesmo autor considera que na zona não saturada há um maior potencial para: interceptação, sorção e eliminação de bactérias e de vírus; atenuação de metais pesados e outros químicos inorgânicos através de precipitação, sorção ou troca de cátions; sorção e biodegradação de muitos hidrocarbonetos e compostos orgânicos sintéticos. No solo, a maioria dos processos são mais efetivos na zona biologicamente ativa devido ao maior conteúdo de argila e de matéria orgânica e de sua maior população microbiana. O autor ainda considera que uma avaliação da vulnerabilidade (ou da atenuação do poluente) da zona insaturada passa por considerações a respeito do perfil pedológico, tais como textura, distinção entre horizontes do solo, presença de horizonte B textural (associado à transição abrupta ou

não), horizontes orgânicos (maior CTC), espessura do solo e porosidade.

Muchovej & Recheigl (1995), relatam estudos realizados em solos ferralíticos (latossólicos e podzólicos com argila de baixa atividade) na Ilha Maurício (Oceano Índico Tropical) mostrando a perda de nitrato por percolação, aumentando com a intensidade de chuva e decrescendo com um aumento do teor de argila e com a capacidade de troca de cátions (CTC). Os mesmos autores relatam um trabalho realizado na Suécia em que foi medida a percolação de nitrato em quatro solos diferentes. O solo argiloso foi o que reteve mais nitrato, juntamente com outro arenoso, porém com alto teor de matéria orgânica. No solo arenoso com pouca matéria orgânica, a perda de nitrato foi maior e no solo siltoso foi intermediária.

Quanto às perdas por desnitrificação, a drenagem interna do solo é um componente importante. Muchovej & Recheigl (1995), afirmam que em solos mal drenados devido ao processo de desnitrificação, o nitrato não constitui um problema, pois há redução e consequente volatilização do nitrogênio. A perda de nitrato é maior em solos bem drenados em relação aos solos com drenagem deficiente. Em histossóis (solos orgânicos), a água de drenagem pode conter alto conteúdo de nitrato mesmo em locais que não sofreram fertilização.

Para Assaad & Jordan (1994), no caso de aquíferos cársticos, a zona insaturada é muito mais efetiva no processo de atenuação de poluentes que a zona saturada, devido aos processos microbiológicos e físico-químicos. Isto ocorre porque o sistema de fissuras das rochas calcárias facilitam a rápida penetração dos poluentes no aquífero.

Assim, o aspecto litológico poderá apresentar uma suscetibilidade diferenciada com relação à poluição, como mostra esta classificação litológica simplificada (figura 1). Nesta figura, que indica a probabilidade de migração extensiva de poluentes microbiológicos e biodegradáveis, pode-se notar a alta suscetibilidade das rochas calcárias à contaminação.

A exemplo de trabalhos como os de Troppmair (1988) e de Hrkal & Trouillard (1994), a utilização de pesos é comum em avaliação e estudo de impacto ambiental.

Orea (1986) fornece inúmeros exemplos da utilização de pesos em fórmulas com este objetivo, a exemplo da "Matriz de Leopold", com suas duas entradas, as ações que podem causar impacto e os fatores ambientais.

Existe uma subjetividade inerente e, muitas vezes contestada, nesse tipo de avaliação referente aos pesos, que Orea (1986) coloca da seguinte forma:

Figura 1: Classificação litológica simplificada e sua relação com a contaminação de águas subterrâneas.

FONTE: Adaptado a partir de Foster (1993).

NOTAS: 1 Baixa vulnerabilidade

2 Alta vulnerabilidade (a menos que esteja coberto por 2 m de sedimentos finos)

3 Vulnerabilidade variável (dependente da fraturação)

A pesar de la carga de subjetividad que comporta, la puntuación atribuida, se apoya en hechos y su fiabilidad depende del grado de detalle con que se haya realizado o estudio del ambiental previo em que se basa. En todo caso su validez aumenta si se hace de forma interdisciplinar y se cuida la independencia de juicio en relación com preferencias y predisposiciones personales.

OBJETIVOS

Este estudo visa, essencialmente, avaliar de forma qualitativa e com a utilização de pesos, o impacto referente à entrada potencial do nitrogênio no solo e no subsolo dentro do sistema agrossilvopastoril das bacias de Fervida e Ribeirão das Onças. Isto se resume nos seguintes objetivos específicos:

- a) identificar características do terreno (pedológicas, de relevo e algumas geológicas) que favoreçam à infiltração e à circulação de poluentes e localizar, espacialmente, áreas mais vulneráveis;
- b) avaliar a interação entre o uso e ocupação da terra, a vulnerabilidade das áreas da bacia e classificar as áreas, de forma hierárquica, quanto ao impacto incidente.

MATERIAL

CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

O sistema aquífero está localizado no Primeiro Planalto, ao norte, noroeste e oeste de Curitiba, abran-

gendo uma área total regional de aproximadamente 5.740 km², equivalente à 2,87% do território paranaense (Fraga 1994).

A área de estudo está localizada sobre o aquífero cárstico paranaense, mais especificamente, no município de Colombo, o qual integra a região metropolitana de Curitiba. As microbacias de Fervida e Ribeirão das Onças, objetos deste estudo, localizam-se no município de Colombo, constituem duas bacias contíguas e ocupam uma área de 13,15 km² e 3,53 km², respectivamente (Fritzsons 1999).

A localização geográfica das mesmas é a seguinte: latitude 25°15' a 25°17'(S) e longitude 49°9' a 49°14'(W). A altitude varia de 916 a 975 m.

As principais atividades econômicas do município se concentram na extração de minerais não metálicos e horticultura. A produção agrícola é composta de culturas tradicionais de milho e feijão e do cultivo de tomate e hortaliças, mas de modo geral, a atividade produtiva econômica está alicerçada sobre a agricultura.

Na área de estudo, verifica-se a predominância de pequenas propriedades rurais, 84% em Colombo. Na região de Fervida, o tamanho médio das propriedades é de 5,5 ha e, para as áreas cultivadas, 3 ha. Para o Ribeirão das Onças, o tamanho médio das propriedades é de 5,69 ha e, para as áreas cultivadas 2,5 ha (Nascimento 1997).

Segundo a classificação de Köppen, baseada na temperatura e pluviosidade, o tipo climático da região é Cfb. Este clima se define como: pluvial temperado, com mês mais frio possuindo temperatura entre +18 e -3°C; sempre úmido, com chuva todos os meses do ano e temperatura do mês mais quente abaixo de 22°C e, no míni-

mo, quatro meses com mais de 10°C; pluvial quente temperado, apresentando o mês mais quente com médias inferiores a 22°C e 11 meses do ano com temperaturas maiores que 10°C. Está sujeito à precipitações regulares todos os meses do ano e a geadas severas, raramente neva e não apresenta (na média) estação seca (Maack 1981).

O histograma anual de distribuição das precipitações pluviométricas confeccionados com dados de duas estações pluviométricas mais próximas da área de estudo, Colombo e Juruqui (Almirante Tamandaré), fornecidos pelo DNAE (1995), apresentam uma precipitação média anual de 1475 mm, de 1975 a 1994 (período de 19 anos). Os menores índices pluviométricos ocorrem em abril, junho, julho e agosto e os maiores em dezembro e janeiro.

A evaporação, calculada a partir de dados da Estação Meteorológica da Fazenda Experimental da Faculdade de Agronomia, de 1986 a 1994 (08 anos), apresentou uma média anual de 692,4 mm. Os menores índices ocorreram em maio (média de 37,2 mm) e os maiores em novembro (média de 82,3 mm). A evaporação foi obtida com evaporímetro de campo tipo classe A. Sabe-se que a evapotranspiração potencial foi estimada multiplicando-se este valor por 0,75, que é o coeficiente do tanque classe A. Assim, a evapotranspiração média no período seria de 519,3 mm.

A diferença entre a precipitação média e a evapotranspiração média é de 955,7 mm. Esta representa o excedente médio anual, ou seja, a quantidade de água disponível para ser infiltrada no solo e escoada superficialmente. Este excedente deve alimentar o aquífero e os rios (infiltração e escoamento superficial). Apesar da existência de excedentes hídricos durante o ano, o balanço hídrico mensal indica a ocorrência de períodos secos curtos, o que ocasiona déficit de água em culturas mais sensíveis como as hortaliças, daí a necessidade de irrigação.

A região de estudo pertence Grupo Açungui, sendo constituída por rochas carbonáticas com mármores calcíticos e dolomíticos, intercalados a pacotes de composição silicatada, constituídos por filitos e quartzitos. Rochas ígneas na forma de granitos e diabásios intrusivos cortam esta unidade.

De acordo com Lisboa (1997), estas unidades se repetem na paisagem, num padrão tipicamente losangular, constituindo cada losango uma unidade semelhante às demais. Os compartimentos assim gerados, adquirem porém, comportamento hidráulico e condições de fluxo diferenciados e independentes. Quartzitos, filitos e até diabásios resistem mais do que as rochas carbonáticas ao intemperismo e à erosão de uma região úmida. So-

brepõem-se assim, na paisagem formando barreiras bastante nítidas ao escoamento de água subterrânea e impedem a comunicação entre uma célula e outra nesse nível.

Na região da microbacia de Fervida – Ribeirão das Onças –, em levantamento pedológico realizado na escala de 1: 10.000 (Emater/Embrapa 1996), foram identificadas diversas classes e associações de solos, separadas nas seguintes unidades:

a) Solos Litólicos Eutróficos, contato litóide e lítico, textura argilosa, A moderado, relevo manter como está ondulado (Re1); b) associação Solos Litólicos, contato litóide e lítico + Cambissolo raso, ambos eutróficos, textura argilosa, A moderado, relevo forte ondulado e montanhoso (Re2); c) Litólicos distróficos, contato litóide e lítico, textura argilosa, A moderado, relevo montanhoso (Rd1); d) associação de Solos Litólicos, contato litóide + Cambissolo raso, ambos distróficos, textura argilosa, A moderado, relevo forte ondulado e montanhoso (Rd2); e) associação Cambissolo raso e pouco profundo + Solos Litólicos, contato litóide, ambos textura argilosa, A moderado, relevo forte ondulado e montanhoso (Ce); contato litóide, ambos distróficos, textura argilosa, A moderado, de relevo forte ondulado e ondulado (Cd1); g) Cambissolo distrófico pouco profundo e profundo, textura argilosa, A proeminente, relevo ondulado (Cd2); h) Cambissolo distrófico, profundo, textura argilosa, A proeminente, relevo suave ondulado (Cd3); i) Cambissolo latossolizado álico, profundo, A húmico, de relevo suave ondulado e plano (Ca); j) associação Solos Hidromórficos gleizados + Cambissolo hidromórfico gleizado, ambos álicos, profundos, A húmico, relevo plano (HG) e k) Terra Bruna Roxa Estruturada Eutrófica, A moderado, profunda, relevo forte ondulado e ondulado (TBREE).

A vegetação natural e original da área do carste, incluindo as bacias de Fervida e Ribeirão das Onças, corresponde ao domínio da Floresta Ombrófila Mista, ou floresta com araucária, a qual é exclusiva do Planalto Meridional Brasileiro. Esta denominação foi definida por Veloso (1991), de acordo com seu sistema de classificação fisionômico-ecológico.

Em termos hidrográficos, as microbacias de Fervida e Ribeirão das Onças localizam-se nas cabeceiras do Rio Capivari o qual faz parte da grande bacia litorânea do Ribeira. A oeste e ao sul de Fervida/Ribeirão das Onças estão os limites que constituem os divisores de águas das Bacias do Ribeira e Iguaçu.

MÉTODO

O método elaborado pode ser visualizado na figura 2. Para tanto, dois aspectos foram delineados: a

vulnerabilidade e a carga poluente, também chamada de risco, que incide na bacia. A carta de Uso e Ocupação da Terra foi gerada para ser utilizada como instrumento auxiliar de avaliação do impacto.

Para avaliar o impacto do uso e ocupação da terra, partindo-se das entradas na bacia, foi necessário considerar o meio físico, uma vez que o ambiente apresenta respostas diferenciadas em relação ao risco. Quanto à vulnerabilidade, além do aspecto litológico, foi considerado o aspecto pedológico em termos de profundidade do solo, relevo associado ao solo e presença de horizonte B textural. Outros aspectos, apesar de serem considerados importantes, não foram utilizados devido à falta de análises suficientes ou então devido a sua pouca significância na área de estudo, como no caso dos fotolineamentos. Aos aspectos escolhidos (em negrito) foram conferidos pesos, baseados em informações de literatura.

Elaboradas as duas cartas, de vulnerabilidade e carga poluente (uso e ocupação da terra), as interações foram delineadas graficamente (cruzamento das cartas) e hierarquizadas, com a utilização de pesos, na tentativa de se localizar espacialmente e classificar áreas sob maior ou menor impacto, gerando a carta de impacto, produto final do trabalho.

Neste trabalho, foram utilizados pesos de valores mais altos para maiores riscos ou, então, maior vulnerabilidade.

A seguir, a seqüência será detalhadamente

explicada:

1. Definição da escala de trabalho

A escala de trabalho foi definida em 1: 10.000, em função dos materiais cartográficos disponíveis nesta escala (mapas planialtimétrico, geológico e de classificação da solos).

2. Cobertura vegetal, uso atual das terras e discriminação das áreas poluentes

A carta de uso e ocupação das terras foi elaborada a partir de fotos aéreas em escala de 1: 60.000, de maio de 1996, ampliadas em uma só foto, a qual resultou numa escala de aproximadamente 1: 8.000.

Após a delimitação das diferentes tipologias presentes, houve necessidade de um ajuste da escala original para 1: 10.000. As diferentes feições delimitadas na foto, resultaram em 9 diferentes tipologias, as quais, depois de definidas em fotos aéreas, foram verificadas em campo. Separaram-se as unidades onde havia potencialmente incidência de poluição. As tipologias discriminadas foram as "áreas agrícolas" e "áreas de habitações".

Na tipologia "áreas de habitações" foram consideradas apenas agrupamentos de construções. Foi conferido *peso 2*, às áreas de agricultura e *peso 3*, às de habita-

Figura 2: Esquema do método proposto para obter a carta de impacto. *Outline of the method designed to obtain impact charts.*

ção e nulo às demais, como mostra a tabela 1.

Tabela 1: Pesos conferidos ao uso e ocupação da terra. *Weights assigned to land use and occupation.*

3. Avaliação da vulnerabilidade

A vulnerabilidade foi avaliada no âmbito da geologia e da pedologia. Foram conferidos pesos aos atributos do solo e geologia previamente selecionados, como mostra a tabela 2.

Tabela 2: Pesos conferidos aos atributos do solo e geologia. *Weights assigned to soil and geological attributes.*

PESOS	SOLOS			GEOLOGIA
	B textural	Profundidade	Relevo	Litologia
1	Presença	Profundo	Montanhoso a forte ondulado	Diabásio
2		Pouco profundo a profundo	Ondulado	Filito e quartzito
3	Ausência	Raso a pouco profundo	Suave ondulado a plano	Calcário
4		Raso		

3.1 Solos, relevo e vulnerabilidade pedológica

A vulnerabilidade no âmbito pedológico, foi analisada com maiores detalhes, enfocando o solo como cobertura depuradora e amortizadora.

As informações de literatura enfatizam os seguintes aspectos: textura, estrutura, presença de B textural, CTC, pH, teor de matéria orgânica, porosidade, condutividade hidráulica e geometria de poros do solo.

Crítérios importantes referentes à CTC, porosidade e teor de matéria orgânica não foram considerados por não haverem amostragens de solos suficientes para caracterizar classes de vulnerabilidade.

A textura é outro atributo muito importante, pois influencia na capacidade de retenção de água, de cátions e na permeabilidade (Cadillon & Portier 1977). Apesar de sua importância, este critério não foi considerado, pois todos os solos presentes na área se caracterizam como sendo de textura argilosa, o que os colocaria num só grupo. Uma maior distinção entre eles seria interessante, mas necessitaria de análises físicas que discriminassem a textura argilosa, pois esta textura (argilosa) apresenta em sua composição granulométrica um teor variável de 35 a 60 % de argila (Curi et al., 1993).

Apesar dos horizontes A presentes na área serem distintos (A moderado, A proeminente e A húmico) e, estes por definição, apresentarem um teor diferenciado de matéria orgânica, que tem um importante poder de

retenção de poluentes, este critério não foi utilizado. Isto se deve ao fato de que os solos, destinados à horticultura são adubados fortemente com matéria orgânica o que torna este critério de validade discutível.

Assim, destes atributos foram discriminados a presença de B textural e profundidade. O horizonte B textural constitui uma camada mais adensada, restringindo a passagem de poluentes.

Quanto à profundidade, quanto mais espesso o solo, maior chance terá o poluente de ser retido no perfil, o que significa menor possibilidade de atingir a zona saturada.

Na área estudada, o mapa pedológico realizado pela Emater (1997) apresenta 11 unidades. Estas unidades constituem classes de solos e associações de classes que variam em função de características morfológicas, profundidade, infiltração, relevo, tipos de

horizontes diagnósticos, CTC etc.

Para se definir classes de vulnerabilidade entre os solos, primeiramente, estas 11 unidades pedológicas foram agrupadas em função da profundidade, presença de B textural e relevo.

Com relação à presença de horizonte B textural, apenas uma classe de solos, a Terra Bruna Roxa Estruturada Eutrófica apresenta este horizonte.

Em relação à profundidade foram consideradas 4 classes, de acordo com a descrição pedológica das mesmas: rasos, rasos a pouco profundos, pouco profundos a profundos e profundos.

De acordo com o Souza (1994), estes termos referentes à profundidade do solo são empregados para designar condições de solos em que um contato lítico ou litóide ou nível do freático permanente ocorra, conforme limites especificados a seguir:

Solo raso: menor ou igual a 50 cm.

Solo pouco profundo: maior que 50 cm e menor que 100 cm.

Solo profundo: maior que 100 ou menor que 200 cm.

Muito profundo: maior que 200 cm.

Assim, somando-se os pesos previamente definidos na tabela 2, encontrou-se as seguintes classes de vulnerabilidade, apresentadas na tabela 3:

Classe 1: solos rasos, sem B textural, englobando os solos Litólicos (Re1, Re2, Rd1, Rd2), cuja soma é

7 (3+4). O algarismo 3 é referente à ausência de B textural e o 4 é referente à profundidade, conforme definido na tabela 2.

Classe 2: solos rasos e pouco profundos, sem B textural, englobando associações de solos Litólicos e Cambissolos, Ce, Cd1, cuja soma é 6 (3+3).

Classe 3: solos pouco profundos a profundos, sem B textural, englobando Cambissolos, Cd2, Cd3, cuja soma é 5 (3+2).

Classe 4: solos profundos sem B textural, pertencendo a esta classe a Terra Bruna Roxa Estruturada Eutrófica, cuja soma é 4 (3+1).

Classe 5: solos profundos com B textural, pertencendo a esta classe a Terra Bruna Roxa Estruturada Eutrófica, cuja soma é 2 (1+1).

A posição do solo no relevo também é outro fator importante e foi considerado, pois quanto maior a declividade, menor a possibilidade de infiltração vertical, e portanto maior migração lateral sobre o terreno e maior tempo de exposição do poluente ao solo, conferindo maior chance de retenção ou imobilização (Montaño 1994). A posição relativa do solo no relevo está descrita no mapeamento pedológico.

As classes divididas em três foram as seguintes: montanhoso e forte ondulado; ondulado e suave ondulado e plano.

De acordo com Curi (1993), estas classes de relevo correspondem às seguintes classes de declividade:

Plano: declividade menor de 3%.

Suave ondulado: declividade de 3 a 8%.

Ondulado: declividade de 8 a 20%.

Forte ondulado: declive entre 20 e 45%.

Montanhoso: declives de 45 a 75%.

A tabela 3 apresenta o somatório das classes de solos em função da presença do horizonte B textural, da profundidade e do relevo.

Os valores não inteiros resultam da média entre os valores de determinada classe. Por exemplo, Cambissolos (Cd2 e Cd3) ocorrem em relevo ondulado(2) e suave ondulado (3), o que resulta numa média de 2,5

(5/2). O mesmo ocorre para a associação de Cambissolos e Litólicos, a qual ocorre em relevo forte (1) ondulado (2).

Existe, ainda, uma unidade de solo que não foi considerada para efeito desta classificação, por ser uma exceção aos critérios propostos. Trata-se dos Solos Hidromórficos, que podem ser profundos, e vias de regra o são, em relevo geralmente plano e predominantemente nas cotas mais baixas. A classificação destes solos no esquema proposto não foi possível, pois eles seriam enquadrados na classe de baixa vulnerabilidade. Isto não ocorre, pois estes solos situam-se em posição topográfica de relevo próxima ao nível de saturação da água sendo, portanto, altamente vulneráveis à poluição. Assim, optou-se por alocar-los na mesma classe de vulnerabilidade dos Litossolos (classe 2).

Assim, em termos de vulnerabilidade pedológica, em ordem crescente de suscetibilidade, podem ser classificados: Terra Bruna Roxa Estruturada na primeira classe, ou seja a menos vulnerável, Cambissolos Latossolizados na segunda, Cambissolos e Associações na terceira e Litólicos e Hidromórficos na quarta, a mais vulnerável compreendendo Litólicos e associações de Litólicos e Cambissolos.

3.2 Geologia e vulnerabilidade geológica

Em relação aos aspectos geológicos, a litologia é um dado importante (Foster 1993, Troppmair 1988). Existem três litologias distintas na microbacia: diques de diabásio, quartzitos associados a filitos e xistos, e rochas carbonáticas. Estas diferenciações litológicas, além de modularem diferenciações nas topossequências de solo, apresentam uma vulnerabilidade diferenciada e assim foram conferidos pesos também diferenciados, conforme mostra a tabela 2. Para referências sobre a litologia, utilizou-se a minuta da carta geológica da região do carste produzida pelo Laboratório de Pesquisas hidrogeológicas da UFPR (LPH), em escala 1: 10.000.

Tabela 3: Somatório resultante dos pesos para vulnerabilidade pedológica. Sums resulting from weights for (pedologic) vulnerability.

CLASSE	CLASSES DE SOLOS E ASSOCIAÇÕES	B TEXTURAL	PROFUNDIDADE	RELEVO	SOMATÓRIO
1	Litólicos e Assoc. de Litólicos e Cambissolos (Re1, Re2, Rd1, Rd2)	3	4	1	8
2	Cambissolos e Litólicos (Ce, Cd1)	3	3	1,5	7,5
3	Cambissolos (Cd2, Cd3)	3	2	2,5	7,5
4	Cambissolos Latossolizados (Ca)	3	1	3	7
5	Terra Bruna (TBREE)	1	1	1	3

Nesse mapa apenas foi assinalado o posicionamento e a direção dos diques de diabásio, mas não sua extensão lateral, o que impossibilitaria a delimitação espacial dessa classe. Assim, buscou-se auxílio no mapa pedológico para resolver tal questão.

Sabendo-se que a Terra Bruna Roxa Estruturada Eutrófica ocorre estritamente sobre a alteração de eventuais colúvios destes diques, considerou-se o limite de sua ocorrência como sendo a extensão total do diabásio. Além da Terra Bruna foram considerados como indicativos do diabásio o Cambissolo Eutrófico (CE) e Litólicos Eutróficos e associações de Litólicos e Cambissolos (RE1, RE2). Neste sentido, deve-se considerar que os Litólicos Eutróficos estão unicamente associados aos diabásios, pois as condições morfoclimáticas da região impedem a formação de rendzinas, isto é, litólicos derivados de calcário.

4. Confeção da carta de vulnerabilidade

Uma vez discriminados alguns aspectos de vulnerabilidade referentes aos solos e geologia e definidos os seus respectivos pesos, foi possível a confecção da carta de vulnerabilidade da área. Esta carta foi composta sobrepondo-se o mapa de solos ao de geologia, ambos na escala de 1: 10.000 e delimitando-se as áreas já com os seus respectivos pesos, mostrados na tabela 4.

Destas 10 classes resultantes possivelmente existentes (4, 5, 6, 8, 8,5, 9, 9,5, 10, 10,5, 11), as que realmente ocorrem na área são em número de 7, as quais estão em negrito na tabela 17. A diferença entre o esperado (10 classes) e o encontrado (7 classes) ocorre devido a alguns solos não se encontrarem em algumas litologias, como as Terras Brunas que somente ocorrem sobre diabásio e outros, como a exemplo do Cambissolo Latossólico, que ocorre predominantemente em calcário e não ocorre em diabásio.

Por outro lado, algumas associações entre classe de solo e litologia apresentam o mesmo peso, a exemplo da classe 9, resultante da associação de Litossolos derivados de diabásio e de Cambissolo Latossolizado derivado de quartzito e filito.

5. Avaliação do impacto

Para obter a carta de impacto, a carta de vulnerabilidade do meio físico com suas 7 classes resultantes e respectivos pesos, foi sobreposta à carta de uso e ocupação da terra, com suas 2 tipologias sobressalentes, a de áreas de agricultura e a de áreas de habitação com seus respectivos pesos. A tabela 5 apresenta os pesos atribuídos às classes de vulnerabilidade de uso e ocupação da terra e ilustra como foi realizado na prática o somatório que resultou nas classes de impacto. Exemplificando, quando a classe de vulnerabilidade 4 estiver sob o uso e ocupação da terra referente ao peso 2, o somatório resultante será 6 (2+4).

Apesar de potencialmente poderem ocorrer 11 classes de impacto diferenciados, na realidade ocorrem 9, pois uma classe de vulnerabilidade (8,5), correspondente ao Cambissolo Eutrófico (CE sobre diabásio), não está sendo utilizado para áreas agrícolas ou habitação. Um outro aspecto é que as algumas adições se repetem, caso de 12; 12,5 e 13.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao sobrepor o mapa de solos ao geológico, e associá-los ao planialtimétrico geológico, todos em escala 1: 10.000, as seguintes relações foram observadas:

Os Cambissolos Latossólicos Álicos (CA) ocupam as áreas de menores declividades, relevos aplainados, e de menores altitudes da litologia predominantemente carbonática.

As Terras Brunas Roxas Estruturadas Eutróficas sempre estão associadas aos diques de diabásio. As

Tabela 4: Pesos para confecção da carta de vulnerabilidade. *Weights for the elaboration of vulnerability charts.*

Tabela 5: Pesos para confecção da carta de impacto. *Weights for the elaboration of impact charts.*

unidades RE1, RE2, e CE apresentam pouca expressão em termos de ocorrência na bacia e estão associadas aos diques de diabásio, compondo-se de solos litólicos e de associações de litólicos e cambissolos e vice-versa. Todos os solos têm em comum o caráter eutrófico, em decorrência da riqueza em minerais do material de origem.

Os Litólicos e Cambissolos Distróficos (RD1 e RD2) refletem litologias mais quartzíticas, e os hidromórficos (Hg) ocupam o fundo de dolinas e de vales cársticos.

Na geração da carta de vulnerabilidade do meio físico foram obtidas 7 classes. Uma tentativa de avaliação qualitativa foi realizada dividindo-se estas classes em intervalos, os quais podem ser nomeados da seguinte forma:

Assim, as classes de vulnerabilidade obtidas estão descritas a seguir, na tabela 6, em ordem crescente de vulnerabilidade, de acordo com os pesos propostos.

Assim, a classe mais vulnerável compreende solos Litólicos e Hidromórficos sobre calcário. Os primeiros consistem em solos rasos, incipientes, geralmente pedregosos, ou cascalhentos e em posição de relevo mais acidentado, enquanto que os hidromórficos consistem geralmente em solos de deposição aluvial ou coluvial, localizando-se nas porções mais baixas do re-

levo, de profundidade variável, de drenagem limitada e com evidências de hidromorfia, que se reflete em colorações mais acinzentadas. Normalmente os solos hidromórficos possuem o sistema freático muito próximo à superfície.

O calcário é a litologia de maior grau de vulnerabilidade da área. As classes 10, 10,5 e 11 apresentam esta litologia, seguido do quartzito e filito associado a xistos e seguido do diabásio.

A classe menos vulnerável corresponde às Terras Brunas Roxas Estruturadas Eutróficas, são solos que apresentam o horizonte de subsuperfície B textural, são profundos, geralmente bastante argilosos, de fertilidade natural alta, e na área em questão, aparecem sobre os diques de diabásio, portanto nas altitudes mais elevadas.

Uma consideração importante a ser feita é que os cambissolos derivados de quartzitos e filitos são os solos mais comuns na área e, assim, no seu conjunto, a bacia apresenta uma vulnerabilidade considerada média.

Quanto ao estudo do meio físico face à vulnerabilidade, a pedologia, numa aproximação mais acurada deveria separar ainda mais estas classes mas, para tanto, informações de laboratório tais como CTC, granulometria e porosidade seriam indispensáveis. No âmbito geológico, a exemplo do trabalho de Hkral & Trouillard (1994), outras informações são igualmente importantes, tais como: espessura da zona saturada, da zona insaturada e da permeabilidade vertical. A figura 3 apresenta a carta de vulnerabilidade.

Tabela 6: Significado das classes de vulnerabilidade. *Meaning of types of vulnerability.*

Na geração da carta de impacto, foram obtidas 9 classes. Uma tentativa de avaliação qualitativa também foi realizada dividindo-se estas classes em intervalos, os quais podem ser nomeados da seguinte forma:

As classes de impacto obtidas estão descritas a seguir, na tabela 7, em ordem crescente de impacto, de acordo com os parâmetros (pesos) propostos:

Assim, a classe que está sendo mais impactada refere-se à classe 14 (impacto extremo), que possui os solos mais vulneráveis associados à litologias também vulneráveis e sob habitação. A classe menos passível de impacto se refere à classe 6 com TBREE, a qual tem por substrato o diabásio e está sob cultivo. Deve-se observar que as três classes mais vulneráveis estão sob concentração de habitação.

As áreas não demarcadas na carta se referem a locais, considerados, neste trabalho, como de impacto nulo.

A figura 4 apresenta a carta de impacto e um aspecto interessante dela é que pode ser atualizada em decorrência da alteração do Uso e Ocupação das Terras, pois em caso de mudança de uso basta adicionar (ou subtrair) à classe o número correspondente. Por exemplo, na classe de número 11, se o tipo de ocupação se altera de lavoura para habitação, automaticamente a clas-

se se altera para a 12, a qual representa um impacto maior que a anterior.

Uma consideração importante a ser feita é que esta carta configura locais que estão sendo mais impactados e que isto não se refere, necessariamente, ao impacto causado na água subterrânea naquele local. O reflexo do impacto na água subterrânea pode estar distante do local impactado. Para se saber onde ocorre a contaminação da água, deve-se conhecer o movimento da água sob o solo, bem como a capacidade de diluição do aquífero naquele local.

CONCLUSÕES

Quanto à vulnerabilidade, a área é bastante variável e as classes mais suscetíveis, de acordo com os pesos atribuídos são as dos solos litólicos e hidromórficos sobre calcário seguido dos cambissolos também sobre calcário. Os solos litólicos ocorrem em topos de morros, os hidromórficos em baixadas e os cambissolos em relevos mais suaves.

As classes menos vulneráveis são as Terras Brunas Roxas Estruturadas Eutróficas e Cambissolos Eutróficos sobre diabásio. Estes se encontram nas partes mais altas do relevo, nos topos de morros, sendo o Cambissolo Eutrófico de pouca expressão em termos de área.

Quanto ao impacto potencial que estaria ocorrendo na bacia, a classe mais impactada se refere aos litólicos, hidromórficos e cambissolos latossólicos sob

Tabela 7: Significado das classes de impacto. *Meaning of types of impact.*

habitação; e a que sofre menor impacto sob uso é a Terra Bruna Roxa Estruturada Eutrófica (TBREE) sob cultura, seguida da mesma sob habitação. Os cambissolos, solos que predominam na área, apresentam um potencial de impacto médio sobre o aquífero. As terras florestais foram consideradas como de impacto nulo.

As cartas obtidas podem e devem ser complementadas em estudos posteriores, com maiores informações sobre aspectos referentes aos solos, à geologia e à hidrogeologia, bem como devem ser modificadas de acordo com alteração no uso e ocupação da terra.

Quanto aos pesos atribuídos, constituiu-se uma forma de estabelecer parâmetros de comparação que de-

verão ser checados em campo e, quando necessário, corrigidos para uma maior aproximação da realidade.

A utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) seria adequada pela facilidade de alteração dos pesos e pela associação dos dados de informações espaciais, tendo em vista a grande quantidade de informações cartográficas a serem obtidas e sobrepostas, principalmente após se estabelecerem os modelos de uso e ocupação da terra. Neste sentido, as cartas principais, que se encontram em anexo, já foram digitalizadas.

A partir da carta de impacto, obtida neste trabalho, é possível subsidiar um modelo de uso da terra de forma a minimizar o impacto sobre as águas subterrâneas.

Figura 3: Carta de Vulnerabilidade da bacia de Fervida - Ribeirão das Onças. *Vulnerability chart for the Fervida - Ribeirão das Onças Basins.*

Figura 4: Carta de impacto da bacia de Fervida - Ribeirão das Onças. *Impact chart for the Fervida - Ribeirão das Onças Basins.*

REFERÊNCIAS

- Assaad F. & Jordan H. 1994. Karst terranes and environmental aspects. *Environmental Geology*, **23**: 228-237.
- Cadillon M. & Portier J. 1977. Quelques resultats experimentaux sur le pouvoir epurateur des sols soumis a l'èpandage déffluents. In: *Protection des eaux souterraines capteés pour l'alimentation humaine*. França, Service Geologique National, 93-98.
- Curi N. et al. 1993. *Vocabulário de ciência do solo*. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 90 p.
- Dalarmi O. 1995. Utilização futura dos recursos hídricos da região Metropolitana de Curitiba. *Sanare*, Curitiba, [s.n.], **4 (4)**: 33.
- Emater/Embrapa. 1996. *Mapa de solos da região do Karst*. Colombo, 1 mapa preto e branco, 59x102 cm, escala 1: 10.000.
- Falkenmark M. & Allard B. 1991. Water quality and genesis and disturbances of natural freshwaters. In: Hutzinger Otto. *The handbook of environmental chemistry*. Berlin, Spring-Verlag, **5**: 45-78.
- Foster S. 1993. *Poluição das águas subterrâneas*: um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável. São Paulo, Instituto Geológico, 54 p.
- Fritzsons E. 1999. *Avaliação do impacto da contaminação por nitrogênio na bacia hidrográfica cárstica de Fervida/Ribeirão das Onças – Colombo/Pr*. Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Dissertação de Mestrado.
- Hrkal Z. & Trouillard J.M. 1994. Use of GIS for optimization of human activity in a catchment area: an example of the Beauce region (France). *Environmental Geology*, Estocolmo, **24**: 22-27.

Jain R.K. 1993. *Environment assesment*. EUA, Mac Graw-Hill, 526 p.

Maldonado V.A.M. 1991. *Contaminación difusa en la cuenca del Rio Pas*: estudio del aporte de nitrogenio y fosforo al cauce. Universidade de Cantabria, Santander, Espanha, Dissertação de mestrado.

Montaño J.X. 1994. Vulnerabilidad de los recursos hidricos subterraneos. In: Curso sul-americano sobre avaliação e vulnerabilidade de aquíferos, 1, Curitiba, *Curso*, 95-166.

Muchovej M.C. & Recheigl J.E. 1995. Nitrogen fertilizers. In: *Soil Amendments and Environmental Quality*. Ona, Jack E. Recheigl, p 1-64.

Orea D.G. 1986. *Evaluación del impacto ambiental de proyotos agrarios*. Madrid, Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 286 p. (Estudios monográficos 6).

Rizzi N.E. 1991. *Aplicación de agua residual urbana en sedimentos de suelo forestal arcilloso*: estudio experimental. Universidad de Cantabria, Cantabria, Espanha, Tese de Doutorado.

Souza C.G. 1994. *Manual técnico de pedologia*. Rio de Janeiro, IBGE, 104 p.

Troppmair H. 1998. *Metodologias simples para pesquisar o meio ambiente*. Rio Claro, [s.n.], 232 p.

Recebido em 27 jun. 2000.

Aceito em 19 abr. 2001.