

**Modelos *screening* e simulação
de sistemas aplicados à
avaliação de risco de
contaminação da água por
herbicidas em área de cultivo
de cana-de-açúcar**

**Estudo de caso na Microbacia
do Córrego do Espriado**

Maria Conceição Peres Young Pessoa

Antonio Luiz Cerdeira

Marco Antonio Ferreira Gomes

Marcos Corrêa Neves

Manoel Dornelas de Souza

Regina Helena Costa Queiroz

Vera Lúcia Lanchote

Julieta Mieko Ueta

Introdução

A agricultura moderna, altamente dependente do uso de defensivos (agrotóxicos, fertilizantes e outros insumos) para assegurar ganho crescente de produtividade, vem expondo os recursos hídricos ao risco de contaminação por esses produtos. Incidentes freqüentes indicam que, geralmente, a origem desses problemas está associada à escolha, aplicação ou às práticas agrícolas inadequadas, mostrando que tais causas estão fortemente ligadas à falta de conhecimento não só em relação às características desses produtos, como também em relação ao meio onde são aplicados. Nesse sentido, reforça-se a necessidade de estabelecimento ou de avaliação da tendência potencial do risco de utilização desses produtos em diferentes ecossistemas, antes que qualquer decisão seja tomada no sentido de estimular, orientar ou priorizar o uso de agrotóxicos na produção agrícola (CHENG, 1990).

A Microbacia do Córrego do Espriado, em Ribeirão Preto, SP, objeto da presente abordagem, apresenta predominância de monocultivo de cana-de-açúcar, com demandas constantes de aplicações de diversos herbicidas. Por tratar-se de área de recarga do Aquífero Guarani¹, é crescente a preocupação com a conservação de seus recursos hídricos, a começar por essas áreas que são naturalmente frágeis e que exibem alta vulnerabilidade natural (SÃO PAULO, 1997; GOMES et al., 2002). Assim, uma das atividades do chamado Projeto Ribeirão Preto (EMBRAPA, 1998), da Embrapa Meio Ambiente, foi a de avaliar as tendências futuras às potenciais contaminações das águas subterrâneas por alguns desses herbicidas, já aplicados ou ainda em uso na área, com a adoção de técnicas de simulação de sistemas, modelagem matemática *screening* e de geoprocessamento.

A utilização dessas técnicas vem auxiliando a compreensão da dinâmica dos principais processos físico-químicos, bióticos e antrópicos, quando da utilização de herbicidas em cana-de-açúcar que, existentes nesse ambiente produtivo, não ocorrem de forma isolada. Desse modo, a partir de análises expeditas e integradas dos principais fatores que descrevem esses processos, foi possível viabilizar o acompanhamento de suas interações ao longo de um tempo pré-definido e dinâmico para a avaliação,

¹ O nome do aquífero foi alterado de Botucatu para Guarani, em virtude de sua abrangência geográfica incluir a maior parte das áreas ocupadas pelo povo indígena Guarani (ROCHA, 1996).

considerando as limitações de ordem financeira para investigações locais. Essas técnicas de simulação têm, também, proporcionado o conhecimento mais detalhado da dinâmica dos agrotóxicos em relação à influência climática, à utilização de dados médios de literatura e de dados calculados para as condições locais em relação à meia vida no solo ($t_{1/2}$) e à constante de adsorção ao carbono orgânico (Koc) dos seus princípios ativos.

Modelos matemáticos *screening* (PESSOA et al., 1997a), já consagrados mundialmente, tais como aqueles representados pelo Índice de GUS (GUSTAFSON, 1989), pelo Método de GOSS (GOSS, 1992) e pelos principais critérios de Cohen et al. (1995), utilizados pela *Environmental Protection Agency* (EPA), favoreceram uma identificação expedita inicial voltada à identificação de herbicidas, quanto ao potencial de lixiviação e de tendência de transporte (associado a sedimento ou dissolvido em água), prioritário às avaliações mais detalhadas realizadas posteriormente por simulação de sistemas.

O método de GOSS propiciou a avaliação do potencial de transporte do princípio ativo do agrotóxico associado a sedimento e dissolvido em água, enquanto o índice de GUS viabilizou a identificação do potencial de provável lixiviação, de não lixiviação ou do produto encontrar-se em faixa de transição (quando encontrado entre as duas últimas categorias anteriores). Já os critérios de Cohen (conhecido como do "EPA"), utilizados para a avaliação dessas tendências de transporte, forneceram uma avaliação bem mais rigorosa na priorização, em comparação aos modelos anteriores, por fazer uso de mais informações relativas às propriedades físico-químicas do princípio ativo e do ambiente local onde o agrotóxico é aplicado. Assim, para efeito das análises realizadas no âmbito das atividades da Embrapa Meio Ambiente na área do Córrego do Espriado, foi inicialmente utilizado apenas o índice de GUS, calculado em planilha eletrônica e, posteriormente, com o auxílio do programa computacional Agroscre (PESSOA et al., 2004b), possibilitou-se uma análise expedita do potencial de transporte dos princípios ativos dos herbicidas mais utilizados na área e em outras regiões de afloramento do Aquífero Guarani, como serão apresentados em outro capítulo, pelos três modelos *screening* citados, com maior rapidez na obtenção da resposta (GOMES et al., 2004; PESSOA et al., 2004).

Concomitantemente, avaliações da tendência futura de risco de contaminação dos lençóis subterrâneos locais foram realizadas por meio

de simulação de sistemas. Essa técnica possibilitou avaliar a dinâmica dos princípios ativos por meio da geração de cenários individuais que possibilitaram observar os seus respectivos deslocamentos no perfil vertical dos principais tipos de solos existentes no local, bem como igualmente sujeitos às suas condições climáticas. Essas simulações foram refinadas gradativamente a partir da disponibilidade de novas informações, resultantes de monitoramentos de solo e água locais e de análises de solo, água e de resíduos de herbicidas, realizadas em laboratórios pela Embrapa Meio Ambiente e da Universidade de São Paulo, campus de Ribeirão Preto.

Assim sendo, as simulações de sistemas realizadas ao longo dos últimos 12 anos na área de estudo utilizaram o simulador *Chemical Movement in Layered Soil* – CMLS94 (NOFZIGER; HONSBY, 1994). Esse simulador foi escolhido em função dos recursos financeiros necessários para obtenção dos seus dados de entrada e das respostas que propicia. Por meio delas, foi possível acompanhar a dinâmica espaço-temporal dos principais herbicidas aplicados em cana-de-açúcar cultivada nos diferentes tipos de solos, prioritariamente para Latossolo Vermelho Eutroférico (LVf), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico Órtico (RQ), realizada com informações coletadas in loco ou disponibilizadas na literatura (MELLO FILHO et al., 1985; PARANHOS, 1987; IPT, 1994; MUSUMECI et al., 1995; VAZ et al., 1995; MIKLÓS; GOMES, 1996; ROCHA, 1996; SÃO PAULO, 1997; LUCHINI, 1997; MONTEIRO, 1998; EMBRAPA, 1998; SOUZA et al., 2001, 1997). A partir desses resultados, fez-se a análise das tendências futuras do comportamento dos princípios ativos dos produtos comerciais, mais utilizados, com vistas à avaliação da tendência potencial de risco de contaminação para a água subterrânea. Esses resultados foram disponibilizados pelo Projeto Ribeirão (PESSOA et al., 1997a, 1997b; PESSOA et al., 1998; PESSOA et al., 1999; CERDEIRA et al., 2000; CERDEIRA et al., 2002a, 2002b; PESSOA et al., 2003; CERDEIRA et al., 2005a, 2005b, 2005c).

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) viabilizou a elaboração de mapas, que permitiram identificar as áreas de maior potencial de risco de contaminação da água subterrânea para três desses herbicidas, a saber, diuron, tebutiuron e atrazina, por meio do cruzamento das informações obtidas pelas simulações com aquelas disponibilizadas em mapas de solo, níveis de profundidade dos lençóis subsuperficiais e uso das terras, em formato georreferenciado do programa Idrisi (EASTMAN, 1995). Com a

utilização de outro recurso do Idrisi (AREA), foi possível estimar, nesses casos, a porcentagem da área da Microbacia do Córrego do Espraiado com maior potencial de risco para cada um desses princípios ativos dos herbicidas avaliados.

Este capítulo tem por objetivo apresentar as principais considerações obtidas a partir dos resultados dos trabalhos realizados na área do Córrego do Espraiado, região de Ribeirão Preto, SP, utilizando técnicas de modelagem *screening*, simulação de sistemas e georreferenciamento.

Material e métodos

Modelos matemáticos tipo *screening*

Foram utilizados os métodos de GOSS (GOSS, 1992), Índice de GUS (GUSTAFSON, 1989) e o método de Cohen et al. (1995), este utilizado regularmente pelo EPA. As análises iniciais pelo índice de GUS foram realizadas utilizando-se planilha eletrônica Excell e, posteriormente, para todos os três modelos *screening* concomitantemente, utilizando-se o programa Agroscre (PESSOA et al., 2004b) desenvolvido pela Embrapa Meio Ambiente.

Simulador CMLS94

O simulador CMLS-94 (NOFZIGER; HORNSBY, 1994) estima a concentração de agrotóxicos e o movimento desses compostos através do solo em reposta ao movimento da água para maiores profundidades do solo. Embora esse simulador possua uma base de dados de princípios ativos, de culturas e de alguns solos americanos, permite ao usuário entrar com informações de novos princípios ativos, ou dos já existentes em avaliações específicas, a partir da disponibilidade de dados de seus respectivos coeficientes de adsorção ao carbono orgânico ou coeficiente de partição (Koc) e de tempo de meia vida ($t_{1/2}$) do produto no solo. Requer, de fato, dados diários de temperaturas máxima e mínima, de pluviosidade, de evapotranspiração e de infiltração, assim como informações detalhadas do solo em diferentes horizontes (para cada horizonte: profundidade (m); % de carbono orgânico; densidade do solo (mg.m^{-3}); conteúdo volumétrico de

água (%) e, para as informações de capacidade de campo, ponto de murcha e saturação). Também possibilita a inserção de novas culturas em sua base de dados desde que apresentadas as informações sobre o coeficiente cultural (Kc). O CMLS-94 não possibilita avaliar o efeito de reaplicações sucessivas de produtos aplicados, em termos de concentrações residuais ainda presentes no solo advindas de aplicações anteriores, motivo pelo qual avaliou-se a tendência de movimentação para uma única aplicação ao longo do tempo de simulação especificado.

As informações sobre o Kc da cultura de cana-de-açúcar tipo anual (soqueira) foram obtidas em Paranhos (1987).

Os tipos de solos predominantes na área de estudo, a saber, Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef), Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ), típicos de regiões tropicais, apresentam peculiaridades que não são encontradas em solos similares americanos. Disponibilizados no Banco de Dados do CMLS-94, os tipos de solos foram inseridos na base de dados de solo do programa a partir de informações coletadas no local e analisadas pelo Laboratório de Solos da Embrapa Meio Ambiente.

Os dados climáticos diários de Ribeirão Preto, SP, fornecidos pela Estação de Climatologia do Instituto Agrônomo de Campinas, SP (IAC-APTA), foram digitados no formato exigido pelo CMLS-94 para o período de quatro anos.

As informações sobre os princípios ativos dos herbicidas avaliados, a saber atrazina, ametrina, simazina, 2,4-D, picloram, hexazinone, diuron e tebutiuron, foram obtidas em Mello Filho et al. (1985), Musumeci et al. (1995), Vaz et al. (1995), Luchini (1997), Monteiro (1998) e Souza et al. (1997, 2001), em bases de dados do CMLS-94 e de fontes internacionais disponíveis na Internet (EXTOXNET, SYRRES, PAN, entre outras) e em manuais de pesticidas. Assim sendo, as informações ainda não disponíveis nas bases do simulador foram gradativamente a elas incorporadas por Pessoa et al. (1998, 1999, 2003) e Cerdeira et al. (2000, 2002a, 2005a, 2005b, 2005c) para os trabalhos realizados na área de estudo.

O desempenho do CMLS-94 também foi avaliado ao longo desses trabalhos com relação aos resultados obtidos e dificuldades operacionais para a inclusão de dados nas condições brasileiras e outras facilidades computacionais por Pessoa et al. (1999).

Avaliação do uso dos herbicidas em cana-de-açúcar

As avaliações realizadas pelos modelos *screening* (PESSOA et al., 2001; GOMES et al., 2004; PESSOA et al., 2004) indicaram maior potencial de lixiviação para atrazina, hexazinone, tebutiuron, picloram, simazina e ametrina. Outros produtos também foram priorizados em função da quantidade e frequência de uso na área, a saber, diuron e 2,4-D.

Ao longo dos últimos 12 anos, a Embrapa Meio Ambiente realizou diversas simulações aplicadas ao estudo da dinâmica desses herbicidas no perfil vertical dos principais tipos de solos da Microbacia do Córrego do Espreado, inclusive em área no entorno, com a geração de vários trabalhos. Assim, foram disponibilizadas informações geradas na medida em que as ferramentas, métodos e análises de resíduos e de comportamento dos produtos aplicados, em laboratório, puderam ser usados e integrados (MELLO FILHO et al., 1985; BARRIUSO et al., 1992; SÃO PAULO, 1994; MUSUMECI et al., 1995; VAZ et al., 1995; ROCHA, 1996; MICKLÓS; PESSOA; GOMES 1996; SÃO PAULO, 1997; LUCHINI, 1997; PESSOA et al., 1997a, 1997b; CERDEIRA et al., 1998a, 1998b; MONTEIRO, 1998; PESSOA et al., 1998; SOUZA et al., 2001).

A seguir, são apresentados de forma resumida os avanços registrados que permitiram o refinamento gradativo das informações utilizadas como entrada de dados do simulador CMLS-94, bem como daquelas que foram resultantes das simulações realizadas e da integração das mesmas às técnicas de geoprocessamento ou de trabalhos que realizaram sua comparação com informações analíticas.

As primeiras avaliações por simulação, utilizando o simulador, foram realizadas para os herbicidas atrazina, simazina, ametrina, diuron e hexazinone por Pessoa et al. (1997b) a partir dos primeiros dados locais disponibilizados pelo Projeto Ribeirão Preto (SEP 11.94.221) (EMBRAPA, 1998). Apesar de não estar mais sendo utilizado na área, o herbicida atrazina foi empregado maciçamente em anos anteriores (até 1992/1993), justificando a investigação de tendências de transporte desse princípio ativo pelo índice de GUS (modelo *screening*) como pelos demais métodos, dada a possibilidade de ocorrência de resíduos na área. Dessa forma, o trabalho realizou simulações para um período de quatro anos consecutivos, sem considerar reaplicação sucessiva dos produtos, em cenários que levaram em

consideração a aplicação de apenas um produto e com a utilização de dados médios de literatura internacional para Koc e $t_{1,2}$ solo, disponíveis na base de dados do CMLS-94. Os dados climatológicos locais, necessários para uso do CMLS-94, foram fornecidos pela Seção de Climatologia do Instituto Agrônomo de Campinas (APTAVIAC). As dosagens iniciais simuladas obedeceram a limites superiores àquelas recomendadas, com exceção para diuron e hexazinone cujas dosagens foram representativas do produto comercial utilizado na área e que continua sendo amplamente utilizado desde 1994. Assim as dosagens foram: atrazina – 4,0 kg ha⁻¹; ametrina – 3,0 kg ha⁻¹; simazina – 4,0 kg ha⁻¹; diuron – 1,2 kg ha⁻¹ e hexazinone – 0,30 kg ha⁻¹. Esse trabalho avaliou a movimentação vertical dos produtos no perfil de quatro solos, a saber, Areia Quartzosa e nos Latossolos Vermelho-Escuro, Roxo e de Transição (PESSOA et al., 1997b).

Esses mesmos resultados foram comparados, posteriormente, com resultados obtidos por Cerdeira et al. (1998a) que agregaram maiores informações sobre as amostragens dos solos predominantes na área, bem como o mapa de solos conforme conteúdos de areia, de argila, de silte e textura. Ainda Cerdeira et al. (1998a), bem como Gomes et al. (1996a) e Gomes et al. (1996b), caracterizaram os solos quanto à condutividade hidráulica, declividade, infiltração e potencial de escoamento superficial. Cerdeira et al. (1998b) apresentaram considerações sobre métodos de determinação analítica dos produtos em água e solo e os resultados das análises de resíduos de águas superficiais e poços (para tebutiuron, diuron, simazina, atrazina e ametrina) realizadas pela Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade de São Paulo – USP de Ribeirão Preto, parceira do projeto (BONATO et al., 1999; QUEIROZ et al., 1999; LANCHOTE et al., 2000).

A partir desses estudos e à medida que os projetos da Embrapa Meio Ambiente e de outros centros de pesquisa nessa temática avançavam concomitantemente às apresentações de teses e de outras informações técnicas disponibilizadas em literatura nacional (a respeito dos solos locais e do comportamento dos herbicidas em cana-de-açúcar em solos da região ou em ambientes brasileiros), vários trabalhos foram realizados, outros continuam em andamento, por intermédio dos projetos subseqüentes da Embrapa Meio Ambiente em continuidade às ações do Projeto Ribeirão na área do Córrego do Espriado (PESSOA et al., 1998, 1999; UETA et al., 2001; CERDEIRA et al. 2002a, b; PESSOA et al., 2003; CERDEIRA et al., 2004a,

2004b; GOMES et al., 2004; PESSOA et al., 2004; CERDEIRA et al., 2005a, 2005b, 2005c). Alguns desses trabalhos apresentam métodos laboratoriais de avaliação de lixiviação em coluna, de análises de resíduos, de coletas de solo/água, de coleta e tratamento de informações georreferenciadas, de biodegradação e biorremediação, entre outros, e, assim, propiciaram a incorporação de seus resultados e discussões nesses trabalhos, como serão vistos a seguir.

Pessoa et al. (1999) realizaram as primeiras avaliações integrando os resultados obtidos pelas simulações da movimentação vertical de atrazina, diuron e tebutiuron, para um período de três anos consecutivos sem reaplicações de produtos, com técnicas de geoprocessamento que viabilizaram o cruzamento de informações georreferenciadas e a decorrente geração de mapas da tendência potencial de risco de contaminação da água subterrânea da área de estudo para esses produtos. Assim, foram simulados cenários para cada herbicida separadamente, nas respectivas dosagens máximas aplicadas na região (considerando o pior caso), em Latossolo Vermelho Eutroférico, Latossolo Vermelho Distrófico e Neossolo Quartzarênico (antiga Areia Quartzosa) recém disponibilizados pelas novas análises de solos coletados na área. Os dados de Koc e de $t_{1/2}$ nos solos utilizados foram calculados para os solos da área de estudo ou disponibilizados em trabalhos realizados por pesquisadores de outras instituições em São Paulo ou para avaliação do comportamento desses em ambiente brasileiro (MELLO FILHO et al., 1985; LUCHINI, et al., 1989; VAZ et al., 1995; MUSUMECI et al., 1995; LUCHINI, 1997; MONTEIRO, 1998; SOUZA et al., 2001). Os dados obtidos pelas simulações foram posteriormente cruzados com aqueles de uso das terras, níveis de profundidade dos lençóis subterrâneos e dos solos na área da microbacia, previamente digitalizados no Sistema de Informações Geográficas (Idrisi). O trabalho realizado por Pessoa et al. (1999) na Microbacia do Córrego do Espreado apresentou os primeiros mapas de localização das áreas onde os produtos químicos teriam maior possibilidade de serem encontrados, caso necessário monitoramento in loco. Posteriormente, Pessoa et al. (2003) realizaram novo trabalho, enriquecendo essa avaliação inicial com a inclusão de técnicas de interpolação matemática, realizada no SIG Idrisi (EASTEMAN, 1995) para as faixas de níveis de profundidade dos lençóis subterrâneos, possibilitando a geração dos mapas de interesse com um refinamento maior que o apresentado no trabalho original, onde, pela ausência desse detalhamento, não se tornavam perceptíveis algumas diferenças existentes entre as áreas

de risco potencial nos mapas de diuron e atrazina. Este trabalho também disponibilizou a porcentagem total de área de risco pela exposição a cada um desses princípios ativos. Tais resultados reforçaram também a investigação mais detalhada do comportamento dos herbicidas tebutiuron e hexazinone na área de estudo, com a intensificação de ações e de adoção de métodos analíticos mais sensíveis, de avaliação de K_{oc} e $t_{1/2}$ desses produtos nos solos da Microbacia do Córrego do Espriado. A partir de 2002, foram iniciados novos projetos na área, conduzidos pela Embrapa Meio Ambiente, com o intuito de dar continuidade aos trabalhos anteriores e também realizar investigação mais detalhada in loco dos produtos que vinham sendo monitorados, com a previsão de futuras simulações cada vez mais próximas da realidade local.

Cerdeira et al. (2004a) também intensificaram avaliações de atrazina em água, por cromatografia líquida HPLC, seguida de confirmação por cromatografia gasosa por espectrometria de massa GC-MS, para mais de 252 amostras de água superficial durante o período de 1995 a 1998; o mesmo procedimento foi adotado nos anos de 1999 e 2002 para amostras de água subterrânea provenientes de sete poços localizados próximo à Microbacia do Córrego do Espriado, sendo alguns deles fora da área afloramento do Aquífero Guarani. Nessas avaliações foram feitas algumas considerações dos resultados em relação às tendências de atrazina, verificadas pelo CMLS-94 por Pessoa et al. (2003).

Ueta et al. (2001) e Cerdeira et al. (2004b) também relataram a existência de estudos de atrazina voltados para a avaliação microbiológica e de biodegradação. Cerdeira et al. (2004b) amostraram solos coletados de 1996 a 1997, bem como realizaram análise de resíduos em águas superficial e subterrânea em 1999 e 2002, discutindo esses resultados em relação às informações obtidas pelas simulações com o CMLS-94 para esse produto em três anos consecutivos. Também em Cerdeira et al. (2005c) foram comparados resultados obtidos por análises de resíduo por método analítico de cromatografia gasosa-espectrometria de massa para atrazina em amostras de águas superficiais e subterrâneas (coletadas de 2000 a 2002) com os resultados gerais de tendências encontrados para esse herbicida por simulação pelo CMLS-94. Posteriormente Cerdeira et al. (2005b) apresentaram uma avaliação da mobilidade de atrazina, simazina e ametrina em ambiente brasileiro, considerando o sistema de plantio (plantio direto ou tradicional). Esse mesmo trabalho avaliou as propriedades do solo

submetidas a esses diferentes sistemas de plantio, bem como realizou estudos de coluna de solos para atrazina e simazina.

Gomes et al. (2004) também avaliaram a dinâmica de tebutiuron e hexazinone por simulação, apresentando considerações sobre a escolha desses produtos químicos em decorrência dos valores encontrados pelo índice de GUS, que indicaram potencial de lixiviação para ambos. O mesmo trabalho apontou a realização de monitoramentos dos herbicidas em sete poços de diversos tipos e em diferentes profundidades, localizados na área de afloramento do aquífero, e os respectivos padrões de potabilidade para esses produtos conforme a EPA, menos rigoroso do que aquele adotado pela Comunidade Econômica Européia. Também em Gomes (2003) foram apresentados resultados de avaliação de tebutiuron, ametrina, diuron e hexazinone por modelo *screening* (índice de GUS), dosagens utilizadas nesses produtos na área de estudo de 1993 a 1998 e resultados de avaliações por simulação CMLS-94 e monitoramento de água subterrânea de 1995 a 1999.

Pessoa et al. (2004) também apresentaram, em um dos exemplos de utilização do programa Agroscre, uma avaliação da utilização de dado médio de literatura e de informações calculadas para Koc em solos da área para tebutiuron, na resposta obtida pelos modelos *screening* (índice de GUS, Método de GOSS e Método de Cohen).

Em anos seguintes, Cerdeira et al. (2005a, 2002a) avaliaram a dinâmica do herbicida 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético) em cana-de-açúcar para fins de avaliação de potencial de transporte por lixiviação e para a determinação de metodologia de análise de resíduos e estudo de simulação pelo CMLS94. Cerdeira et al. (2002a) avaliaram a dinâmica do 2,4-D na dosagem de 2,0 kg ha⁻¹ de ingrediente ativo, utilizada desde 1996 na área. A simulação foi realizada em cenários independentes de aplicação nos tipos de solos Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo (atualmente classificados como Latossolo Vermelho Distrófico e Latossolo Vermelho Eutroférico respectivamente) para três anos consecutivos sem reaplicação do produto. Os dados relativos às características climáticas e dos solos simulados foram os mesmos já apresentados por Pessoa et al. (1999). Posteriormente, Cerdeira et al. (2005a) relataram detalhadamente a metodologia analítica utilizada para as avaliações de resíduos de 2,4-D, coletadas de água superficial e de poços existentes na área, e das simulações realizadas por Cerdeira et al. (2002a), utilizando valores médios

do produto fornecidos na base de dados do simulador (que corroboram com os fornecidos pelo fabricante do produto quanto ao perfil técnico do seu princípio ativo).

Cerdeira et al. (2002b) também disponibilizaram avaliações de resíduos e de potencial de transporte por lixiviação para picloram, na área de estudo. Além das simulações do herbicida realizadas para os solos de tipos Areia Quartzosa cinza, Areia Quartzosa amarela, Areia Quartzosa rosa, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro, esse trabalho também disponibilizou um método de análise de resíduo de picloram para amostras de águas coletadas na microbacia no período de 1996 a 2001. Os parâmetros físico-químicos do produto utilizado foram os reportados em Wauchope et al. (1992), uma vez que também não foram encontradas informações técnicas sobre esses valores na literatura para condições do Brasil. A aplicação do produto deu-se em outubro no primeiro ano simulado, um mês após a brotação da cana, na dosagem de $0,1 \text{ kg ha}^{-1}$. As simulações foram realizadas separadamente para os tipos de solos citados para um período de três anos consecutivos sem reaplicações sucessivas do produto, contando com os dados climáticos locais fornecidos pela Seção de Climatologia do IAC/Apta de Campinas, SP.

Resultados

Os resultados obtidos pelas primeiras simulações utilizando o CMLS-94 para os herbicidas atrazina, simazina, ametrina, diuron e hexazinone, realizadas por Pessoa et al. (1997b) a partir dos primeiros dados locais disponibilizados pelo Projeto Ribeirão Preto (SEP 11.94.221) (EMBRAPA, 1998), indicaram maior deslocamento do herbicida hexazinone no perfil vertical de Areia Quartzosa (atual Neossolo Quartzarênico órtico) onde, ao final do período de quatro anos simulados, atingiu 30,3 m de profundidade, embora em quantidade final na ordem de $10^{-5} \text{ kg ha}^{-1}$. Ao término desse mesmo período simulado, esse estudo também constatou que atrazina apresentou grande mobilidade vertical no perfil do solo arenoso, atingindo 20,5 m de profundidade e quantidade final na ordem de $10^{-6} \text{ kg ha}^{-1}$; simazina atingiu profundidade final de 16,8 m e quantidade final na ordem de $10^{-6} \text{ kg ha}^{-1}$; ametrina atingiu profundidade final de 8,0 m e quantidade final na ordem de $10^{-6} \text{ kg ha}^{-1}$; e diuron atingiu a profundidade final de 4,9 m e quantidade final na ordem de $10^{-4} \text{ kg ha}^{-1}$. As profundidades finais registradas nos Latossolos foram bem inferiores àquelas registradas para o solo arenoso

e menores em Latossolo Roxo, onde para hexazinone atingiu 4,7 m; atrazina atingiu 3,1 m; simazina atingiu 2,4 m; ametrina atingiu 0,99 m; e diuron atingiu 0,55 m. Embora as quantidades remanescentes de produtos fossem muito pequenas ao final do período simulado, as profundidades atingidas principalmente para hexazinone, atrazina e simazina tornaram esses herbicidas prioritários para uma maior investigação, uma vez que na área de estudo ocorre o afloramento do aquífero, existindo lençóis subterrâneos variando em níveis de profundidades de 0 m a 20 m. Em virtude dessa variação, optou-se por avaliar diuron também nos trabalhos posteriores, uma vez que esse produto vem sendo amplamente utilizado no local.

Assim, a partir de novas informações relativas às propriedades dos produtos nos solos estudados, foram refeitas novas simulações por Pessoa et al. (1999) que também fizeram uso de geoprocessamento, SIG Idrisi, para cruzar informações de planos georreferenciados contendo tipos de solos, uso das terras e níveis de profundidades dos lençóis. Nessa oportunidade, novamente foi enfatizada a necessidade de maior atenção ao potencial de risco de contaminação da água local à exposição por tebutiuron. O mesmo trabalho viabilizou mapas onde as amostragens deveriam ser orientadas para as coletas de água, particularmente aquelas destinadas às avaliações de resíduos em laboratório. Os resultados encontrados por Pessoa et al. (1999, 2003) são apresentados na Tabela 1. Esses resultados, refinados posteriormente pela inclusão de interpolações matemáticas para suavizar a troca de faixas de níveis de profundidades dos lençóis, propiciaram os resultados disponibilizados nos mapas apresentados nas Fig. 1, 2 e 3 viabilizados por Pessoa et al. (2003), apresentadas a seguir.

Tabela 1. Valores de profundidade (m) e de quantidade do herbicida (em 10^{-4} kg ha⁻¹) encontrados ao final das simulações realizadas para cada solo por Pessoa et al. (1999, 2003).

Solo	Atrazina		Diuron		Tebutiuron	
	PRO	QTD	PRO	QTD	PRO	QTD
LVd	1,67	0,0092	0,71	40,0	4,25	1.200,0
LVef	1,43	1.400,0	0,40	77,0	1,96	1.200,0
RQ	2,88	340,0	1,45	1,6	9,43	1.200,0

PRO = profundidade (m); QTD = quantidade de produto (em 10^{-4} kg ha⁻¹); LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVef = Latossolo Vermelho eutroférico; RQ = Neossolo Quartzarênico.

Fonte: Pessoa et al. (1999; 2003).

Fig. 1. Mapa do potencial de exposição da Microbacia do Córrego do Espraiado ao risco de contaminação da água subterrânea por diuron.

Fonte: Pessoa et al. (2003).

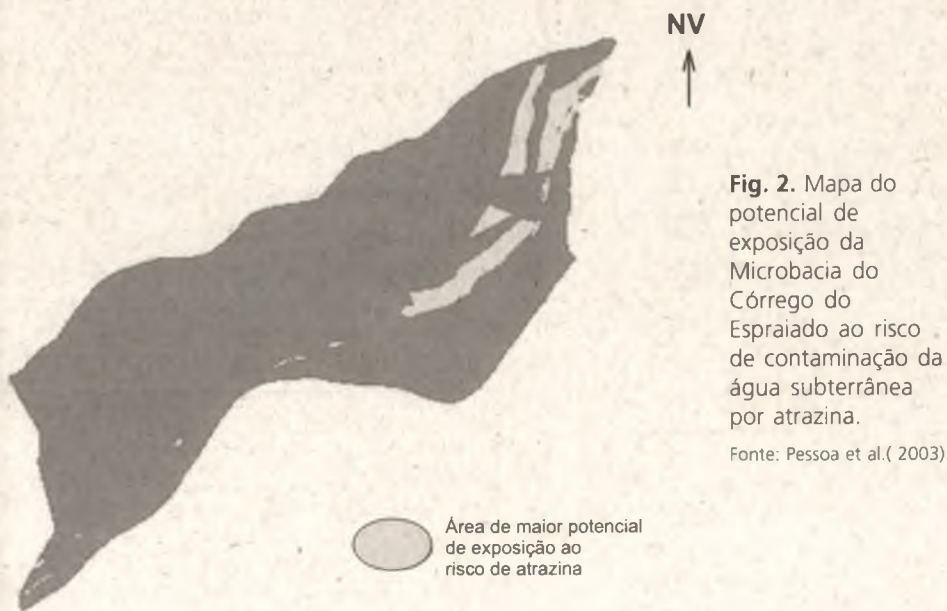
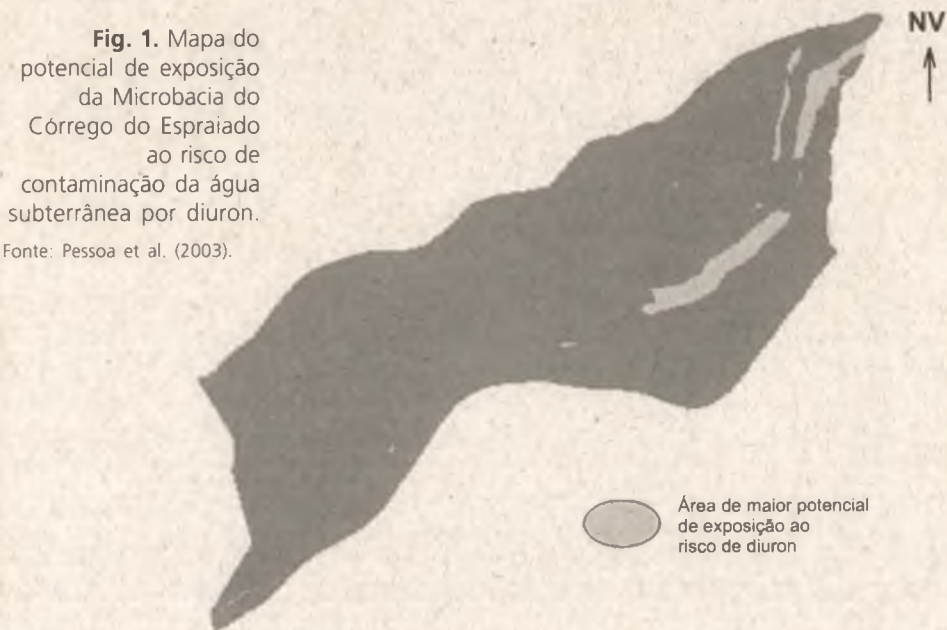


Fig. 2. Mapa do potencial de exposição da Microbacia do Córrego do Espraiado ao risco de contaminação da água subterrânea por atrazina.

Fonte: Pessoa et al. (2003).

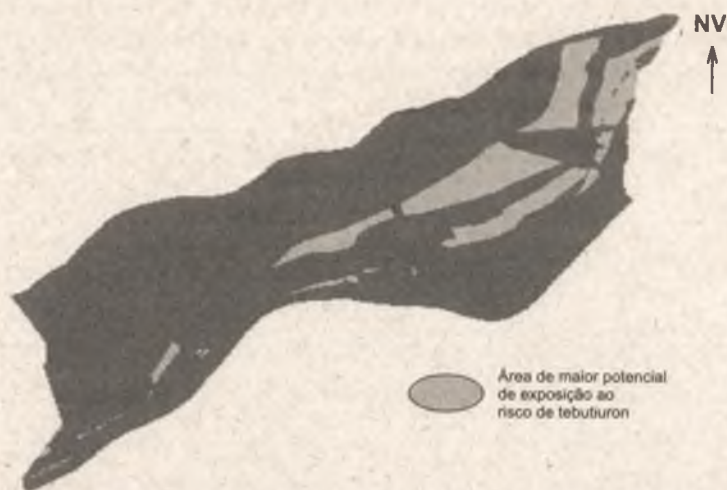


Fig. 3. Mapa do potencial de exposição da Microbacia do Córrego do Espreado ao risco de contaminação da água subterrânea por tebutiuron.

Fonte: Pessoa et al., 2003.

O trabalho de Pessoa et al. (2003) também indicou que cerca de 5,6 % da área de estudo apresentavam potencial de exposição ao risco de contaminação de água subterrânea para atrazina, 3,9 % para diuron e 13,1 % para tebutiuron. Entretanto, os autores não encontraram evidências de concentrações de risco para a saúde humana, conforme padrão de referência da diretiva 89/778/EEC para todos os produtos nos cenários analisados.

Cerdeira et al. (2004a) reportaram que os dados de simulação de atrazina pelo CMLS-94, que indicaram tendência de não chegar a regiões do aquífero confinado e de serem encontrados em quantidades próximas a zero, ficaram em conformidade com as avaliações de atrazina obtidas pelas análises de resíduos por cromatografia HPLC, seguida de confirmação por GC-MS para as 252 amostras de água superficial coletadas de 1995 a 1998, onde o herbicida não foi detectado, nem nas águas obtidas dos sete poços em 1999 e 2002.

Em Cerdeira et al. (2004b) foi relatado o potencial de risco encontrado por simulação CMLS-94 de atrazina entrar em contato com os lençóis sub-superficiais, encontrados na região de afloramento do aquífero e que variam de 0 m a 20 m de profundidade. A maior mobilidade do produto foi em Areia Quartzosa, vista por simulação. O mesmo trabalho também relatou que não foram detectados resíduos de atrazina em águas superficiais e subterrâneas (poços) das amostras coletadas em 1999 e 2002 pelas

avaliações realizadas pela Faculdade de Farmácia da USP, Ribeirão Preto, por cromatografia HPLC, seguida de confirmação por GC-MS. Os autores também ressaltaram a presença de biodegradadores de atrazina encontrados nas avaliações das amostras de solos coletadas na área no período de 1996 a 1997.

Nas avaliações de atrazina conduzidas por Cerdeira et al. (2005c), que contaram com financiamento parcial da Fapesp (Projeto 2002/05067-1) para a realização deste trabalho, foram amostrados solos para as análises físicas e de águas superficiais e subterrâneas para amostras coletadas de 2000 a 2002 e analisadas pela Faculdade de Farmácia da USP, Ribeirão Preto. Quatro amostras de águas superficiais avaliadas por cromatografia líquida de alta eficiência apresentaram resíduos de atrazina (duas com $0,04 \mu\text{g L}^{-1}$ e as demais com $0,05 \mu\text{g L}^{-1}$ e $0,09 \mu\text{g L}^{-1}$), que não foram confirmados, posteriormente, por cromatografia gasosa-espectrometria de massa (GC-MS). Nas amostras de água subterrânea, analisadas por cromatografia líquida de alta eficiência, somente uma amostra apresentou resíduo de $0,03 \mu\text{g L}^{-1}$ de atrazina, que também não foi confirmado por GC-MS. Os autores também relataram que os resultados obtidos por simulação para o período de quatro anos, sem reaplicação do produto após o lançamento inicial, indicaram que o produto não apresenta tendência de atingir profundidades comprometedoras ao aquífero confinado (40 m de profundidade), mas ressaltaram que, em função da presença dos lençóis sub-superficiais nas profundidades de 0 m a 20 m e dos demais resultados obtidos, existe necessidade de se priorizar avaliações do produto nos locais onde os lençóis estejam presentes principalmente nas profundidades de 0 m a 3 m em Areia Quartzosa.

A avaliação da dinâmica de atrazina, ametrina e simazina em função do sistema de cultivo (tradicional ou plantio direto) e dos estudos realizados em coluna de solo para atrazina e simazina por Cerdeira et al. (2005b) indicaram que, sob as condições de plantio direto, atrazina desceu mais que simazina, conforme esperado pelos resultados obtidos pelas simulações com o CMLS-94. Já para os resultados obtidos em coluna de solo, atrazina e simazina lixiviaram até 20 cm enquanto ametrina não foi detectada.

Gomes et al. (2004), apresentando resultados obtidos para avaliações de tebutiuron e hexazinone decorrentes do monitoramento de água amostrada em sete poços de diversos tipos e profundidades diferentes (4 m a 53 m), indicaram a não detecção dos dois herbicidas em níveis

comprometedores à potabilidade ($500 \mu\text{g L}^{-1}$ para tebutiuron e $400 \mu\text{g L}^{-1}$ para hexazinone, conforme padrão de potabilidade do EPA). O índice de GUS indicou potencial de lixiviação para ambos herbicidas.

Gomes (2003) também relatou avaliação do índice de GUS para tebutiuron, ametrina, diuron e hexazinone, que indicou potencial de lixiviação para tebutiuron e hexazinone. Os resultados de simulação CMLS-94 apresentados neste trabalho indicaram que para tebutiuron as maiores quantidades remanescentes, após o período simulado, foram encontradas em Areia Quartzosa em profundidades próximas a 10 m, ainda significativas à avaliação local. A avaliação simulada de hexazinone indicou um maior potencial de lixiviação para maiores profundidades, próximas a 22 m, mas com valores finais já pouco significativos. Entretanto, a grande mobilidade inicial do hexazinone causou preocupação principalmente nas áreas mais próximas ao afloramento. O autor também apresentou as dosagens aplicadas na área no período de 1993 a 1998 para ametrina, tebutiuron e hexazinone e resultados de monitoramento da água subterrânea de 1995 a 1999 por amostragem e análise de resíduo por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC).

Pessoa et al. (2004) apresentou o resultado da implicação da modificação da entrada de dados de Koc e $t_{1/2}$ solo para o herbicida tebutiuron, considerando o dado médio de literatura e os dados obtidos para os solos da área alvo. A avaliação foi feita pelo programa Agroscre que disponibiliza a avaliação dos índices de GUS, método de GOSS e critérios de Cohen et al. (1995) adotado pelo EPA. Em todas as avaliações realizadas, tebutiuron atingiu potencial de lixiviação por GUS e pelo critério *screening* do EPA (COHEN et al., 1995), este último muito mais rígido em termos de seleção que os demais. Pelo método de GOSS, o herbicida apresentou médio potencial de transporte adsorvido a sedimento e alto potencial de transporte dissolvido em água. Os resultados finais obtidos pelos modelos *screening* acima foram os mesmos para avaliações considerando solo arenoso (NQ), Latossolos (LVd e LVef) e para o dado médio de literatura.

Cerdeira et al. (2002a), apresentando resultados obtidos para avaliação da dinâmica de 2,4-D em Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro utilizando simulação CMLS-94, relataram que ao final do segundo ano simulado a lixiviação do produto atingiu 60 cm quando se evidenciavam quantidades do produto em valores próximos ao zero absoluto. Os métodos analíticos e protocolos, bem como as análises de resíduos por HPLC,

realizados pela Faculdade de Farmácia da USP, Ribeirão Preto, possibilitaram evidenciar que nenhum resíduo de 2,4-D foi detectado para as amostras coletadas de águas superficiais e subterrâneas (poços). Posteriormente, Cerdeira et al. (2005a) apresentaram resultados obtidos por simulação de 2,4-D (Tabela 2) que indicaram que o produto possui baixa persistência nos solos simulados, bem como baixo potencial de lixiviação, permanecendo, ao final de três anos simulados, em profundidades inferiores a um metro e em quantidades já muito próximas a zero absoluto. Assim, o produto não apresentou tendência a risco de contaminação de água subterrânea local já a partir do segundo ano, quando foram registrados valores imperceptíveis de concentrações.

Tabela 2. Profundidades atingidas por 2,4-D nos diferentes anos simulados, em Latossolo Roxo e em Latossolo Vermelho-Escuro presentes na área do Córrego do Espiraído, Ribeirão Preto, SP. (Prof = Profundidade em metros; Qtd = Quantidade em kg ha⁻¹).

Período	Latossolo Roxo		Latossolo Vermelho-Escuro	
	Prof. (m)	Qtd. (kg ha ⁻¹)	Prof. (m)	Qtd. (kg ha ⁻¹)
Ano 1	0,453	3,4x10 ⁻¹²	0,463	3,4x10 ⁻¹²
Ano 2	0,601	2,2x10 ⁻²⁴	0,591	1,4x10 ⁻²³
Ano 3	0,847	0	0,877	0

Fonte: Pessoa et al. (1999; 2003).

O herbicida picloram foi avaliado por Cerdeira et al. (2002b). Os resultados obtidos indicaram grande mobilidade inicial do herbicida no perfil vertical do solo, atingindo profundidades de até 3,0 m já na metade do primeiro ano de aplicação do produto para todos os cinco tipos de solos avaliados, a saber, Latossolo Roxo (atual Latossolo Vermelho Distrófico), Areia Quartzosa cinza (atual Neossolo Quartzarênico Órtico), Areia Quartzosa amarela (atual Neossolo Quartzarênico Órtico), Areia Quartzosa rosa (atual Neossolo Quartzarênico Órtico) e Latossolo Vermelho-Escuro (Latossolo Vermelho Distrófico psamítico) da área. Entretanto, a profundidade alcançada no mesmo período de tempo foi maior quando picloram foi simulado em Areia Quartzosa cinza, onde alcançou 5,18 m de profundidade. Neste trabalho também pode ser verificado que nas areias avaliadas foram registradas as maiores profundidades para esse mesmo

período, a saber, 4,3 m em Areia Quartzosa amarela, e 4,62 m em Areia Quartzosa rosa, sendo que os valores obtidos para Latossolo Roxo de 3,2 m e para Latossolo Vermelho-Escuro de 3,5 m.

Essa informação é importante para o monitoramento local da área de estudo, pois nela também se encontram lençóis com níveis de profundidade de 0 m a 5,0 m. Após essa rápida movimentação inicial, pode ser observado, também por simulação, que picloram sofreu uma desaceleração na movimentação, muito embora ele ainda tenha persistido até o final do período simulado. Para todos os solos a quantidade simulada de produto após o primeiro ano foi da ordem de 10^{-3} kg ha⁻¹. Ressalta-se que não foi encontrado resíduo nas medições laboratoriais com cromatografia realizadas pela Faculdade de Ciências Farmacêuticas da USP, Ribeirão Preto, também apresentadas em Cerdeira et al. (2002a). Ao final do segundo ano simulado, o produto novamente registrou maiores profundidades nas areias tendo sido a maior delas encontrada na simulação em Areia Quartzosa cinza (6,4 m). Aqui vale ressaltar que os valores encontrados para os Latossolos (4,4 m para Latossolo Vermelho-Escuro e 4,2 m para Latossolo Roxo) já se encontravam mais próximos ao observado para Areia Quartzosa amarela, a saber 5,2 m. A quantidade de produto simulada após o segundo ano foi da ordem de 10^{-4} kg ha⁻¹. Nessas simulações também foram apontados potenciais de risco para a água nas áreas onde predominam os lençóis subterrâneos de 0 m a 5 m. Já ao final do terceiro ano simulado, os resultados indicaram maiores profundidades em Areia Quartzosa cinza (8,2 m), Areia Quartzosa rosa (7,3 m) e Areia Quartzosa amarela (6,7 m), seguidas pelos Latossolos Vermelho-Escuros (5,7 m) e Roxo (5,3 m) que indicam potencial para atingir os lençóis da área de afloramento encontrados nos níveis de 0 m a 5 m e de 5 m a 10 m, muito embora a quantidade simulada de produto, ainda presente nessa profundidade (na ordem de 10^{-4} kg ha⁻¹), não seja significativa para influenciar na saúde. Desse modo, o trabalho de Cerdeira et al. (2002b) indicou que, devido à maior mobilidade inicial do produto, existe necessidade de monitoramento in loco do mesmo desde a sua aplicação, prioritariamente nos solos arenosos (onde os maiores registros simulados foram em Areia Quartzosa cinza), quando as quantidades dos produtos simuladas ainda são significativas durante o primeiro ano até o quarto ano de aplicação. Esse resultado também corroborou com as avaliações realizadas por Pessoa et al. (2001) que acompanhou o picloram utilizando modelos *screening*, como o índice de GUS (GUSTAFSON, 1989) e o método de GOSS (GOSS, 1992), onde foi

verificado que esse herbicida apresentou também potencial para provável lixiviação por GUS bem como potencial de transporte dissolvido em água pelo método de GOSS. Esses métodos são também muito utilizados pela Environmental Protection Agency (EPA) para priorizar e selecionar produtos a serem monitorados em campo.

Conclusões

Foram realizados vários trabalhos para a área da Microbacia do Córrego do Espriado, região de Ribeirão Preto, SP, abordando técnicas de simulação de sistemas pelo CMLS-94 e modelagem *screening* (índice de GUS, método de GOSS e critérios de Cohen utilizados pela EPA) que integradas, ou não, às técnicas de geoprocessamento e de avaliações analíticas laboratoriais de solo e água, possibilitaram a realização de trabalhos de análise da dinâmica dos principais herbicidas aplicados na área, com relação à sua provável movimentação no perfil vertical dos principais solos nela encontrados. Assim, foi possível avaliar a tendência potencial ao risco de contaminação da água subterrânea pela exposição da área aos herbicidas atrazina, simazina, ametrina, 2,4-D, diuron, tebutiuron, hexazinone e 2,4-D.

À medida que surgiram ou foram geradas novas informações, também foram realizados refinamentos nas avaliações.

Mapas georreferenciados também foram gerados a partir das informações disponibilizadas pelas simulações, subsidiando a identificação de áreas de maior tendência potencial ao risco de contaminação da água pela exposição aos herbicidas tebutiuron, atrazina e diuron utilizados em cana-de-açúcar, orientando assim pontos ou locais prioritários para as coletas de solo e de água.

O principal problema encontrado ao longo dos anos foi em relação à dificuldade em se obter informações das propriedades físico-químicas dos herbicidas estudados nos tipos de solos encontrados na área de estudo, nas suas condições climáticas e sob cultivo de cana-de-açúcar. Assim, vários trabalhos foram iniciados após os primeiros resultados obtidos por simulação e modelagem *screening*, também por pesquisadores ligados à área de análise de resíduos na tentativa de determinação dos principais parâmetros desses produtos para uso nos modelos e simuladores, ou seja, Koc e $t_{1/2}$ em solo.

De forma geral, os herbicidas aplicados na área de recarga do Aquífero Guarani localizada na Microbacia do Córrego do Espreado e avaliados pela Embrapa Meio Ambiente, fazendo uso do CMLS-94, não apresentaram tendências de risco potencial de contaminação das águas subterrâneas locais em níveis prejudiciais ao consumo humano. Cabe ressaltar que essas análises, mesmo realizadas em estudos de pior caso (dosagens máximas e priorizando a descida do produto), não consideraram reaplicações sucessivas dos produtos por limitação, para esse fim, do simulador utilizado.

Devido à maior mobilidade inicial de picloram, verificada por simulação, existe necessidade de seu monitoramento in loco desde a sua aplicação até o final do primeiro ano nos solos arenosos (prioritariamente em Areia Quartzosa cinza).

Também foi identificada, por simulação, uma grande mobilidade de hexazinone, atrazina e simazina em Areia Quartzosa (que variou de 17 m a 30 m de profundidade), embora as quantidades finais obtidas não sejam comprometedoras à qualidade da água. O que preocupa, no entanto, é a grande mobilidade inicial para profundidades maiores, justificando avaliações maiores desses produtos em Areia Quartzosa. Cita-se também que, nos Latossolos avaliados, a maior mobilidade deu-se em Latossolo Vermelho-Escuro. Devem ser priorizados, entretanto, os produtos ainda em uso na área estudada.

Também deve ser dada atenção em novos trabalhos ao herbicida tebutiuron, que apresentou grande potencial de lixiviação pelos modelos *screening* utilizados e pelas simulações realizadas, em que ainda foram registradas quantidades significativas que devem ser investigadas com mais propriedade.

Os trabalhos de simulação realizados pela Embrapa Meio Ambiente e aqui citados foram viabilizados graças ao esforço da equipe multidisciplinar e dos parceiros externos que os integraram.

Recomendações finais

Os estudos de simulação de sistemas e de modelagem para fins do tipo de avaliação apresentada neste capítulo são muito dependentes de pesquisas básicas e, principalmente, da disponibilidade de informações em

literatura ou meios de fácil acesso a informações. A entrada de dados da maioria dos simuladores e modelos *screening* utilizados mundialmente requerem acesso mais amplo aos valores dos parâmetros físico-químicos dos princípios ativos dos agrotóxicos aplicados nos solos, além de informações mais detalhadas das áreas de estudo para a melhor representação dos processos associados à dinâmica desses produtos no ambiente. Várias iniciativas brasileiras indicam a existência de um aumento gradativo na disponibilidade dessas informações, mas que ainda carecem de ferramentas que as tornem acessíveis de forma mais rápida e atualizada, a exemplo das bases de dados internacionais.

Referências

- BARRIUSO, E.; FELLER, C. H.; CALVET, R.; CERRI, C. Sorption of atrazine, terbutryn and 2,4-D herbicides in two Brazilian Oxisols. **Geoderma**, Amsterdam, v. 53, n. 1-2, p.155-167, 1992.
- BONATO, P. S.; LANCHOTE, V. L.; GOMES, M. A. F.; DREOSSI, S. A. C.; CARVALHO, D. de; CERDEIRA, A.L. High performance liquid chromatographic screening and gas chromatography-mass spectrometry confirmation of tebuthiuron residues in drinking water. **Journal of High Resolution Chromatography**, Weinheim, v. 22, n. 4, p. 239-241, 1999.
- CERDEIRA, A. L.; SANTOS, N. A. G. dos; PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; LANCHOTE, V. L. Herbicide leaching on a recharge área of the Guarany aquifer in Brazil. **Journal of Environmental Science and Health, Part B, Pesticides, food contaminants, and agricultural wastes**, New York, v. 40, p. 159-165, 2005a.
- CERDEIRA, A. L.; SOUZA, M. D. de; BOLONHEZI, D.; QUEIROZ, S. C. N. de; FERRACINI, V. L.; LIGO, M. A. V.; PESSOA, M. C. P.Y.; SMITH JUNIOR., S. Effects of sugar cane mechanical harvesting followed by no-tillage crop systems on leaching of triazine herbicides in Brazil. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v. 75, n. 4, p. 805-812, 2005b.
- CERDEIRA, A. L.; PESSOA, M. C. P. Y.; SANTOS, N. A. G.; LANCHOTE, V. L. Lixiviação de atrazina em solo em área de recarga do aquífero Guarani. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Brasília, DF, v. 2, p. 92-101, 2005c.
- CERDEIRA, A. L.; SANTOS, N. A. G.; PESSOA, M. C.; SMITH JUNIOR., S.; LANCHOTE, V. L. Presence of atrazine in water in a recharge área of Guarany aquifer in Brasil. In: MISSISSIPPI WATER RESOURCES RESEARCH CONFERENCE, 34., 2004, Raymond. **Proceedings...** Baton Rouge: USDA-ARS, 2004a. 2 p.

CERDEIRA, A. L.; SANTOS, N. A. G.; UETA, J.; SHUHAMA, I. K.; PESSOA, M. C. P. Y.; SMITH JUNIOR, S.; LANCHOTE, V. L. Atrazine in water and biodegradation in a recharge área of Guarany Aquifer in Brazil. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v. 73, n. 1, p. 117-124, 2004b.

CERDEIRA, A.; PESSOA, C.; ROCHA, A.; COSTA, F.; SHUHAMA, I.; LANCHOTE, V. L.; UETA, J. Soil type and 2-4D leaching on a sugarcane waterched in Brazil. In. MISSISSIPPI WATER RESOURCES CONFERENCE, 32., 2002a, Raymond. **Proceedings...** Raymond, 2002a. Baton Rouge: USDA-ARS, 10 p.. (Manuscript number 25)

CERDEIRA, A. L.; PESSOA, M. C. P. Y.; BONATO, P. S.; QUEIROZ, R. H. C.; LANCHOTE, V. L. Resíduos e lixiviação do herbicida picloram em água, em área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Brasília, DF, v. 3, n. 1, p. 75-81, 2002b.

CERDEIRA, A. L.; GOMES, M. A. F.; PESSOA, M. C. P. Y.; BONATO, P. S.; LANCHOTE, V. L. Tebuthiuron in soil and groundwater in sugarcane area in Brazil. **Bollettino dei Chimici Igiesnisti**, Torino, v. 51, n. 4, p. 51-57, 2000.

CERDEIRA, A. L.; LANCHOTE, V. L.; QUEIROZ, R. C.; GOMES, M. A. F.; UETA, J. Resíduos de herbicidas em amostras de solo e água de área de cana-de-açúcar no Brasil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE AGRICULTURE IN TROPICAL AND SUBTROPICAL HIGHLANDS WITH ESPECIAL REFERENCE TO LATIN AMERICA, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1998a. 1 CD-ROM.

CERDEIRA, A. L.; LANCHOTE, V. L.; QUEIROZ, R. H. C.; GOMES, M. A. F.; UETA, J. Herbicide residues in soil and water from sugar cane area in Brazil. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16., Montpellier, 1998. **Proceedings...** Montpellier: ISSS: AISS: SICS: AFES: INRA, 1998b. 7 p. 1 CD-ROM.

CHENG, H. H. (Ed.). **Pesticides in the soil environment**: processes, impact and modeling. Madison: Soil Science Society of America, 1990. 230 p.

COHEN, S. Z.; WAUCHOPE, R. D.; KLEIN, A. W.; EADSPORTH, C. V.; GRANCY, R. Offsite transport of pesticides in water: mathematical models of pesticide leaching and runoff. **Pure and Applied Chemistry**, London, v. 67, n. 12, p. 2109-2148, 1995.

EASTEMAN, J. R. **IDRISI**: user guide, version 4.1. Worcester: Clark University, 1995. 128 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental. **Impacto ambiental e aplicações sócio-econômicas da agricultura intensiva em água subterrânea**: relatório final de atividades. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1998. 36 p. Projeto Ribeirão Preto - SEP11.0.94.221, relatório final 1998.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1999. 412 p.

GOMES, M. A. F. Potencial de contaminação das águas subterrâneas pelo herbicida Tebuthiuron: estudo de caso na microbacia do Córrego Espraiado, Ribeirão Preto-SP. In: SEMINÁRIO AQUÍFERO GUARANI, 2003, Ribeirão Preto. **Memória...** Ribeirão Preto: Faculdades COC, 2003. p. 98-102.

GOMES, M. A. F.; NEVES, M. C.; SPADOTTO, C. A.; LUIZ, A. J. B. Mapeamento expedito dos potenciais de infiltração e de escoamento superficial da água para os solos da microbacia do Córrego Espraiado em Ribeirão Preto-SP. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Campinas: SBCS: ESALQ, 1996a. 4p. 1 CD-ROM.

GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; LUIZ, A. J. B.; NEVES, M. C. Método de classificação preliminar dos potenciais de infiltração e de escoamento superficial da água do solo: subsídio à avaliação do risco de contaminação por agroquímicos. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Campinas: SBCS: ESALQ, 1996b. 4 p. 1 CD-ROM.

GOMES, M. A. F.; QUEIROZ, S. C. do N.; FERRACINI, V. L.; PESSOA, M. C. P. Y.; PEREIRA, A. S.; FILIZOLA, H. F.; SOUZA, M. D. de. Ocorrência dos herbicidas Tebutiuron e Hexazinone e implicações na qualidade da água subterrânea: estudo de caso na microbacia do córrego Espraiado, Ribeirão Preto-SP In: CONGRESSO DE MEIO AMBIENTE DEPAULÍNIA E REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS, 1., 2004, Paulínia. **Anais...** Paulínia: Prefeitura Municipal: Região Metropolitana de Campinas, 2004. p.150-151.

GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; PESSOA, M. C. P. Y. Avaliação da vulnerabilidade natural do solo em áreas agrícolas: subsídio à avaliação do risco de contaminação do lençol freático por agroquímicos. **Pesticidas; Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 12, p. 169-179, 2002.

GOSS, D. W. Screening procedure for soils and pesticides for potential water quality impacts. **Weed Technology**, Champaign, v. 6, n. 3, p. 701-708, 1992.

GUSTAFSON, D. I. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. **Environmental Toxicology and Chemistry**, Elmsford, v. 8, n. 4, p. 339-357, 1989.

IPT. Caracterização do potencial de contaminação das águas subterrâneas por agroquímicos. São Paulo: IPT, 1994. 15 p. (Relatório n. 32605).

LANCHOTE, V. L.; BONATO, P. S.; CERDEIRA, A. L.; SANTOS, N. A. G.; CARVALHO, D. de; GOMES, M. A. F. HPLC screening and GC-MS confirmation of triazine herbicides residues in drinking water from sugar cane area in Brazil. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 118, n. 3-4, p. 329- 337, 2000.

LUCHINI, L. C.; WIENDL, F. M.; RUEGG, E. F. Comportamento sortivo de herbicidas em solos. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 2., 1989, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: CENA: USP, 1989. p. 339-347.

LUCHINI, L. C. Adsorptive behaviour of herbicides in Brazilian soils. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 64, n. 1, p. 43-49, 1997.

MELLO FILHO, A. T. de; ROCHA, C. L.; SILVA, S. A. da; HONDA, T. Estudo de lixiviação e degradação de Tebuthiuron em solos dos estados de São Paulo e Alagoas. **Stab: Açúcar Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 2, n. 3, p. 47-51, 1985.

MIKLÓS, A. A. W.; GOMES, M. A. F. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia hidrográfica do Córrego do Espriado, Ribeirão Preto-SP**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1996. 48 p. (Relatório técnico).

MONTEIRO, R. T. S. **Meia vida de degradação de atrazina em solos brasileiros** [mensagem pessoal], Mensagem recebida por <young@cnpma.embrapa.br> em 25 set. 1998.

MUSUMECI, M. R.; NAKAGAWA, L. E.; LUCHINI, L. C.; MATALLO, M. B.; ANDREA, M. M. de. Degradação do Diuron-14C em solo e em plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 6, p.775-778, 1995.

NOFZIGER, D. L.; HORNSBY, A. G. **CMLS-94: chemical movement in layered soils**. Oklahoma: University of Florida, 1994. 76 p.

PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 856 p.

PESSOA, M. C. P. Y.; FERRACINI, V. L.; CHAIM, A.; SCRAMIN, S. Programa computacional de apoio a avaliação de tendências de transporte de princípios ativos de agrotóxicos: AGROSCRE. In: CONGRESSO DE MEIO AMBIENTE DEPAULÍNIA E REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS, 1., 2004, Paulínia. **Anais...** Paulínia: Prefeitura Municipal: Região Metropolitana de Campinas, 2004a. p. 196-197.

PESSOA, M. C. P. Y.; FERRACINI, V. L.; CHAIM, A.; SCRAMIN, S. **Software AGROSCRE: apoio à avaliação de tendências de transporte de princípios ativos de agrotóxicos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004b. 24 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 26).

PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F. Visão holística do impacto da cultura de cana-de-açúcar na Microbacia do Córrego do Espriado, Ribeirão Preto, SP: uma abordagem preliminar. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Resumos...** Águas de Lindóia: Sociedade Brasileira de ciência do Solo, 1996. 1 CD-ROM.

PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; NEVES, M. C.; CERDEIRA, A. L.; SOUZA, M. D. de. Identificação de áreas de exposição ao risco de contaminação de águas subterrâneas pelos herbicidas Atrazina, Diuron e Tebutiuron **Pesticidas; Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 13, p. 111-122, 2003.

PESSOA, M. C. P. Y.; SCRAMIN, S.; FERRACINI, V. L.; CHAIM, A.; SILVA, A. de S.; CERDEIRA, A. L.; GOMES, M. A. F.; GUSSAKOV, K. C. **Impacto ambiental do uso de agrotóxicos na**

qualidade das águas das bacias hidrográficas brasileiras: estado da arte. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. 222 p.

PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de; CERDEIRA, A. L.; NEVES, M. C.; NICOLELLA, G. **Estudos de simulação da movimentação vertical de herbicidas em solos com cana-de-açúcar na microbacia do córrego Espreado, Ribeirão Preto-SP.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 44 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa, 1).

PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de; NICOLELLA, G.; CERDEIRA, A. L.; MONTICELLI, A. Simulação do movimento de herbicidas utilizados no monocultivo de cana-de-açúcar em Areia Quartzosa da área de recarga do Aquífero Guarani (antigo Botucatu) em Ribeirão Preto, SP. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 3, n. 2, p. 11-19, 1998.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. de. **Principais modelos e simuladores usados em análise de impacto ambiental da agricultura.** Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997a. 87 p. (Embrapa-CNPMA. Documentos, 8).

PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; NICOLELLA, G.; SOUZA, M. D. de; CERDEIRA, A. L.; MONTICELLI, A. Simulação do movimento vertical dos herbicidas hexazinone, diuron, atrazina, ametrina e simazina aplicados na cultura de cana-de-açúcar em solos da Microbacia do Córrego Espreado, Ribeirão Preto-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997b. p. 479.

QUEIROZ, R. H. C.; LANCHOTE, V. L.; BONATO, P. S.; TOZZATO, E.; CARVALHO, D.; GOMES, M. A. F.; CERDEIRA, A. L. Determination of ametryn herbicide by bioassay and gas chromatography-mas spectrometry in analysis of residues in drinking water. **Bolletino Chimico Farmaceutico**, Milano, v. 138, n. 5, p. 251-254, 1999.

ROCHA, G.A. **Mega reservatório de água subterrânea do Cone Sul:** bases para uma política de desenvolvimento e gestão. Curitiba: UFPR/IDRC, 1996. 25p.

SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. **Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo.** São Paulo: Instituto Geológico: CETESB, 1997. 176 p. (Série Documentos).

SOUZA, M. D. de; BOEIRA, R. C.; GOMES, M. A. F.; FERRACINI, V. L.; MAIA, A. H. N. Adsorção e lixiviação de tebutiuron em três tipos de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 25, p. 1053-1061, 2001.

UETA, J.; PEREIRA, N. L.; SHUHAMA, I. K.; CERDEIRA, A. L. Biodegradação de herbicidas e biorremediação: microrganismos degradadores de atrazina provenientes de solos da região do aquífero Guarani. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 24, p. 25-30, 2001.

VAZ, C. M. P.; MACHADO, S. A. S.; MAZO, L. H.; AVACA, L. A.; CRESTANA, S. Adsorção do herbicida atrazina em diferentes solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., 1995. **Resumos...** Florianópolis: SBCS, 1995. p. 356-357.