

Nº 9, dez/96, p.1-6

## UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA QUANTIFICAR O MOVIMENTO DE SOLUTOS NO SOLO EM UMA ESCALA DE BACIA HIDROGRÁFICA<sup>1</sup>

Sander J. T. Eskes<sup>2</sup>  
Silvio Crestana<sup>3</sup>

Na última década aumentou o número de pesquisas que visam avaliar os impactos ambientais causados pelos agrotóxicos em uma escala de bacia hidrográfica. Um dos impactos mais estudados é a lixiviação de pesticidas e fertilizantes ao lençol freático, com a justificativa de que os aquíferos são fontes de água potável e também meios de deslocamento dos poluentes nas áreas ecologicamente sensíveis tais como as várzeas (áreas inundadas).

A maior parte dos modelos científicos de lixiviação foram desenvolvidos para descrever processos em pequena escala, i.e. em colunas de solo no laboratório (i.e. 0.1 m), lisímetros (i.e. 1 m) ou campos experimentais (i.e. 10 m). Em pequena escala, é possível dividir o sistema água-solo-planta-atmosfera em *volumes elementares representativos*, que podem ser bem amostrados sem obrigatoriamente envolver altos custos.

Entretanto, as heterogeneidades encontradas em condições naturais em escalas maiores, por exemplo, em uma bacia hidrográfica, fazem com que o transporte de água e solutos no solo seja altamente irregular. Portanto, geralmente não há muita confiança na aplicação de um modelo de transporte em escalas maiores quando este modelo foi desenvolvido e testado somente em pequena escala. Além disto, a disponibilidade de informações a respeito da variabilidade espacial e temporal das propriedades relevantes é limitada, exigindo uma avaliação da incerteza dos parâmetros de entrada e saída de qualquer modelo operando nesta escala.

Nas últimas décadas surgiu a tendência de descrever meios físicos extensos como *campos aleatórios*, ou seja, realizações de um processo estocástico com propriedades probabilísticas bem definidas, tal como a média, variância e covariância. Neste caso, os parâmetros associados com um volume elementar representativo não tem um único valor determinístico, mas são definidos como funções de densidade de probabilidade. Modelos que permitem a entrada de parâmetros probabilísticos, são chamadas de *modelos estocásticos*.

---

<sup>1</sup> Pesquisa financiada com recursos da FAPESP através do projeto n.º 90/3773-7 e n.º 94/0476-2, e da EMBRAPA através do projeto n.º 12.093.094.

<sup>2</sup> Eng.º, M. Sc., USP/Escola de Engenharia de São Carlos, SP.

<sup>3</sup> Físico, Dr., EMBRAPA/CNPIDIA, Caixa Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP.

PA/9, CNPDIA, dez/96, p.2

Embora tenha-se obtido muito progresso no aspecto estático da abordagem probabilística, (principalmente na área de geoestatística), até hoje o aspecto dinâmico (ou seja, o emprego de modelos estocásticos) tem sido pouco entendido. Por exemplo, ainda existem grandes dificuldades na descrição do fluxo de água lateral e troca de soluto entre colunas de solo onde assume-se que a direção principal do movimento do fluido é vertical. Considerando estas dificuldades na descrição detalhada dos aspectos físicos do transporte de água e solutos no solo, alguns autores introduziram o conceito de *função transferência* (Jury & Roth, 1990). Se o único fator do processo de transporte a ser caracterizado, é a vazão de saída do fluido (e.g. de um campo de 1 ha), então uma função transferência pode ser usada como uma alternativa para descrever o sistema através de um modelo de processo interno. As funções transferência são usadas para modelar sistemas complexos de uma maneira simples, caracterizando-se o fluxo de saída como uma função do fluxo de entrada.

Apresentaremos agora uma metodologia probabilística para quantificar a lixiviação de solutos no solo em uma escala de bacia hidrográfica. O conceito de função transferência também é empregado neste trabalho. No entanto, ao invés de se usar funções transferência analíticas como no modelo de Jury & Roth (1990) foi desenvolvido um modelo numérico, permitindo-se obter muito mais flexibilidade no emprego deste conceito, quando se pretende calcular o transporte de soluto em escala de campo. Em seguida, será apresentado o novo modelo onde sua integração com um sistema de informações geográficas será posteriormente discutido.

Neste estudo, somente o transporte de soluto é considerado estocástico, porque existem modelos determinísticos para o fluxo de água e o fluxo de calor que podem ser calibrados em uma escala de campo (Jury & Roth, 1990). Portanto, a variabilidade espacial e a incerteza associadas com os fluxos de água e de calor são transferidas para o modelo numérico estocástico de transporte de soluto.

O modelo numérico estocástico desenvolvido, pode ser caracterizado como um modelo Lagrangeano descontínuo. O adjetivo *Lagrangeano* quer dizer que no modelo desenvolvido, ao invés de se calcular a concentração em cada profundidade (conceito Euleriano), a concentração é calculada em função do movimento de uma dada parcela de água (conceito Lagrangeano). O uso do conceito Lagrangeano permite fazer simulações *descontínuas*, ao invés de simulações contínuas, empregando assim muito menos tempo de computação. Um modelo descontínuo, recebe a informação sobre o estado das condições de contorno e os parâmetros, na forma de *eventos* no espaço e no tempo (ou seja, a chegada de uma molécula de soluto no fim de uma camada homogênea, ou o término de um período estacionário, durante o tempo de percurso desta molécula) (veja figura 1).

PA/9, CNPDIA, dez/96, p.3

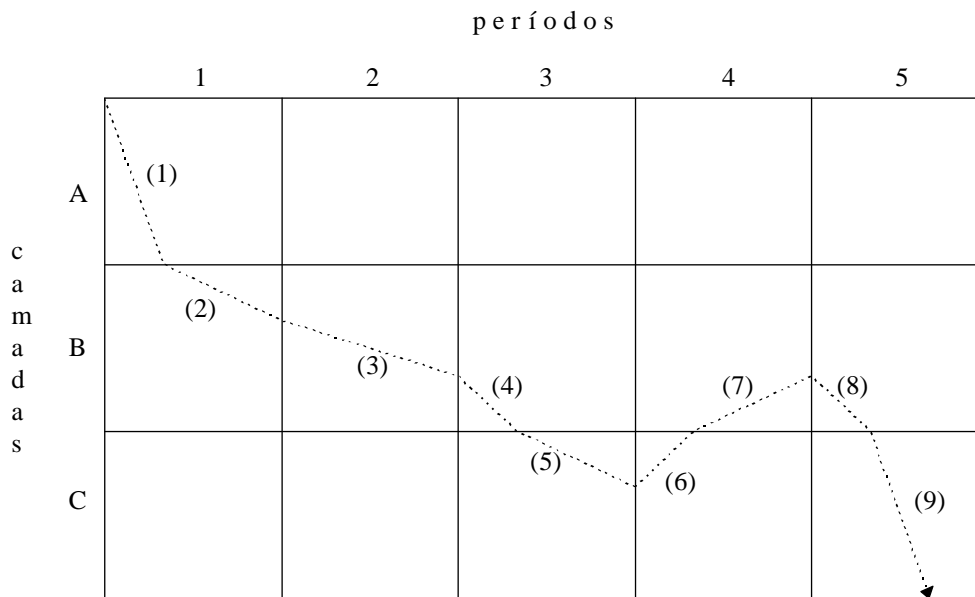


FIGURA 1. Exemplo de uma matriz de eventos no espaço e no tempo. A linha pontilhada indica a posição de uma molécula de soluto num perfil do solo, em função do tempo. Os índices (1) até (9) indicam os intervalos da série de eventos na qual esta molécula está sujeita.

A dispersão do soluto no solo é simulada, usando um conjunto de moléculas de soluto, onde cada molécula tem uma velocidade relativa diferente. As velocidades das moléculas são obtidas utilizando-se uma distribuição do tempo de percurso que foi medido no campo, por exemplo, com extratores de solução de solo e um traçador conservativo como Brometo (Kutílek & Nielsen, 1994). Qualquer distribuição do tempo de percurso pode ser usado no modelo. Na prática, a distribuição *log-normal* é muito conveniente, porque esta distribuição tem um domínio maior ou igual à zero (assim evitando tempos de percurso negativos) e a distribuição é inteiramente definida com apenas a média e a variância conhecidas (ou seja, medidas no campo).

Suponha agora que a distribuição do tempo de percurso é medida para cada horizonte de solo (i.e. A, B e C na figura 1). Como a distribuição é conhecida em cada horizonte, podemos considerar o tempo de percurso no horizonte A, perfeitamente correlacionado com o tempo de percurso no horizonte B, e assim por diante. Um processo de lixiviação que obedece a esta suposição é chamado de *convectivo-estocástico* (Jury & Roth, 1990). Para este tipo de processo, pode-se acompanhar moléculas de soluto individuais, de um evento para outro, como mostrado na figura 1. Observe que cada molécula com uma velocidade relativa diferente, produz uma *série* diferente de eventos.

Em seguida, um *pulso* pode ser definido como a parte da massa do soluto aplicada, que está entre duas moléculas próximas. A concentração do soluto pode ser determinada através de uma simples aproximação numérica de primeira ordem, usando estas duas moléculas. Para gerar uma série temporal de concentrações, basta seguir uma série de pulsos.

PA/9, CNPDIA, dez/96, p.4

Para efeito de simulação, foi realizada uma comparação entre uma solução analítica de um processo convectivo-estocástico e o modelo numérico apresentado. Como pode ser visto na figura 2, a aproximação é muito boa.

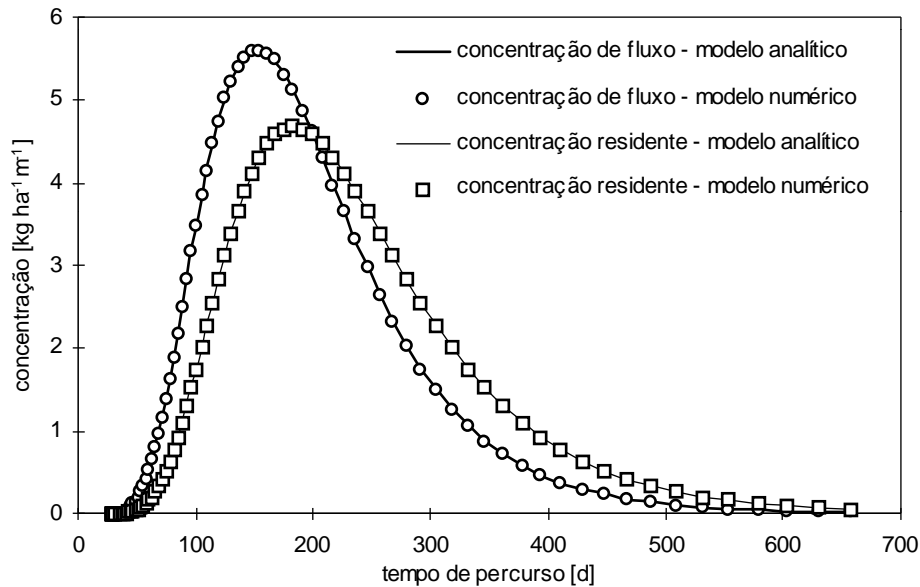


FIGURA 2. Comparação entre o modelo Lagrangeano numérico e uma solução analítica para um processo convectivo-estocástico. O tempo de percurso até uma profundidade de 1,0 m de um soluto conservativo foi simulado, empregando os seguintes parâmetros: massa aplicada de soluto 1,0 kg/ha; fluxo de água 0,1 cm d<sup>-1</sup>; umidade do solo 0,2 cm cm<sup>-1</sup>, tempo médio de percurso 200 d; variância no tempo de percurso 8000 d<sup>2</sup>.

Embora o modelo tenha sido apresentado para um soluto conservativo, processos aleatórios lineares como os de *transformação de primeira ordem* e *adsorção linear*, podem ser facilmente incluídos, através de uma integração numérica de cada pulso com as próprias funções de densidade de probabilidade marginais.

Nas últimas décadas, houve uma grande evolução na área de geoprocessamento, principalmente no desenvolvimento de sistemas computacionais. As tarefas fundamentais de um sistema de geoprocessamento são armazenar, recuperar e analisar mapas num ambiente computacional. Hoje em dia, existem vários *sistemas de informações geográficas* (SIGs) que fazem estas tarefas. Uma característica básica e geral de um SIG é a sua capacidade de tratar as relações espaciais entre os objetos geográficos.

Porém, no caso da aplicação de modelos numéricos, as necessidades são geralmente diferentes daquelas dos usuários típicos de um dado SIG e, até hoje, a integração de sistemas de informações geográficas com modelos numéricos tem sido problemática. Por isso, a integração mais comum é do tipo onde o SIG e o modelo usam diferentes interfaces de usuários (Sunday Tim, 1996). Este tipo de integração também foi adotada neste trabalho. Uma característica deste tipo de

PA/9, CNPDIA, dez/96, p.5

integração é a necessidade de uma *interface* para a troca de dados entre o SIG e o modelo.

A metodologia está sendo testada na microbacia do córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP), usando os dados de vários trabalhos realizados pelo *Instituto Agrônomo de Campinas* (Lombardi Neto & Camargo, 1992) (veja figura 3). Para o geoprocessamento de dados desta microbacia, está sendo usado o sistema de informações geográficas *IDRISI for Windows*®, com uma resolução espacial de 20 metros.

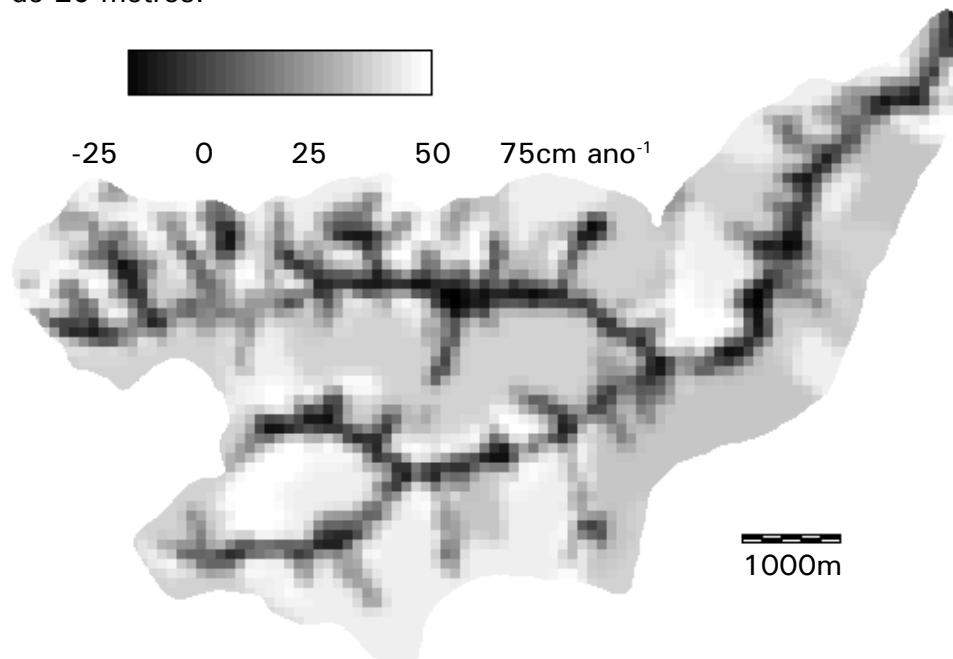


FIGURA 3. Divisão da microbacia do córrego São Joaquim (Município de Pirassununga, SP) em células de grade. Cada célula representa um campo aleatório de 1 ha, com estacionaridade na média e na variância. O exemplo mostra o valor esperado para o fluxo de água em  $\text{cm ano}^{-1}$ .

Neste caso, tratam-se de várias interfaces de dados, porque foram aplicados três modelos numéricos diferentes, i.e. para o transporte de água, calor e soluto. Os primeiros dois modelos são determinísticos e usados para fornecer dados de entrada para o modelo estocástico de transporte de soluto apresentado nesta publicação. A aplicação destes modelos na microbacia está sendo realizado, usando três escalas espaciais diferentes:

- Escala regional - a área inteira da microbacia (i.e.  $100 \text{ km}^2$ ). Nesta escala são encontradas tendências regionais nos parâmetros aleatórios e determinísticos;
- Escala de campo - a área de uma célula de grade (i.e. 1 ha). Nesta escala supomos estacionaridade na média e na variância dos parâmetros aleatórios, e constância dos parâmetros determinísticos e
- Escala local - a área de uma amostra, usada para medir parâmetros físicos, químicos ou biológicos do solo (i.e.  $1 \text{ m}^2$ ).

De modo geral, a metodologia adotada pode ser entendida como “interpola-se primeiro e calcula-se depois” (Kutflék & Nielsen, 1994), permitindo assim a determinação da incerteza dos parâmetros de entrada e saída dos modelos. Os vários passos da metodologia são os seguintes:

PA/9, CNPDIA, dez/96, p.6

1. A divisão da microbacia em *células de grade* (veja figura 3) e a coleta de  $n$  (i.e. 1, 2, 4 ou 16) amostras de solo, em cada célula;
2. O uso da técnica geoestatística chamada de *simulação condicional*, para estimar as funções de densidade de probabilidade dos parâmetros físicos e químicos, condicionados aos valores obtidos das amostras, para cada célula;
3. A geração de *séries temporais* (registradas e/ou simuladas) da precipitação, evaporação e temperatura do ar e de vários cenários de aplicação de pesticida (i.e. atrazina);
4. A determinação do fluxo de água e da temperatura do solo com modelos determinísticos, calibrados separadamente para cada célula e
5. A determinação da lixiviação de cada célula com o modelo estocástico apresentado, usando os dados dos itens anteriores.

No momento, a metodologia apresentada está sendo usada para a determinação do número ideal de amostras por célula e o tamanho ótimo das células. Em geral, estes valores dependem do alcance da correlação espacial dos parâmetros físicos e químicos do solo e da precisão desejada dos parâmetros de saída do modelo de lixiviação.

Uma das limitações da metodologia apresentada, é que o modelo de transporte de soluto usado, só é válido para processos lineares. No presente momento, uma pesquisa está sendo desenvolvido para incluir processos não lineares, tal como a adsorção com isoterma de Freundlich.

#### Referências Bibliográficas

- JURY, W.A.; ROTH, K. **Transfer functions and solute movement through soil: theory and applications**. Basel: Birkhäuser, 1990.
- KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D.R. **Soil hydrology**. Cremlingen: Catena, 1994.
- LOMBARDI NETO, F.; DE CAMARGO, O.A. **Microbacia do córrego São Joaquim (município de Pirassununga-SP)**. Campinas: IAC, 1992. (IAC Documentos, 29).
- SUNDAY TIM, U. Coupling vadose zone models with GIS: emerging trends and potential bottlenecks. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.25, n.3, p.535-544, 1996.