

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Meio Ambiente  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

# **A**grotóxicos e ambiente

Editores Técnicos

*Célia Maria Maganhotto de Souza Silva*

*Elisabeth Francisconi Fay*

**Embrapa Informação Tecnológica**  
Brasília, DF  
2004

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Informação Tecnológica**

Parque Estação Biológica – PqEB – Av. W3 Norte (final)

Caixa Postal 040315

CEP 70770-901 Brasília, DF

Fone: (61) 340-9999

Fax: (61) 340-2753

vendas@sct.embrapa.br

www.sct.embrapa.br

**Embrapa Meio Ambiente**

Rodovia SP 340 – Km 127,5 – Tanquinho Velho

Caixa Postal 69 – CEP 13820-000 Jaguariúna, SP

Fone: (19) 3867-8750 – Fax: (19) 3867-8740

sac@cnpma.embrapa.br

www.cnpma.embrapa.br

**Embrapa Informação Tecnológica**

Coordenação editorial: *Lillian Alvares e Lucilene Maria de Andrade*

Revisão de texto e tratamento editorial: *Francimary de Miranda e Silva*

Normalização bibliográfica: *Cecília MacDowell e Dawi Antunes Corrêa*

Projeto gráfico e editoração eletrônica: *Júlio César da Silva Delfino*

Capa: *Itamar Soares de Melo*

Fotos da capa: *Aderaldo de Souza Silva e Itamar Soares de Melo*

**1ª edição**

1ª impressão (2004): 1.000 exemplares

**Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.160)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Embrapa Informação Tecnológica

---

Agrotóxico e ambiente / editores técnicos, Célia Maria Maganhoto de Souza  
Silva, Elisabeth Francisconi Fay. – Brasília, DF : Embrapa Informação  
Tecnológica, 2004.  
400 p. : il.

ISBN 85-7383-282-7

1. Agricultura. 2. Agrotóxico. 3. Impacto ambiental. 4. Meio ambiente. I. Silva,  
Célia Maria Maganhoto de Souza. II. Fay, Elisabeth Francisconi. III. Embrapa  
Meio Ambiente. IV. Título.

**CDD 577.279**

---

© Embrapa 2004

# Apresentação

Foi com prazer que recebi o convite para apresentar este livro. Além de ser um assunto que me remete à origem da minha carreira como pesquisador e depois como chefe da Embrapa Meio Ambiente, tenho aqui a oportunidade de ficar novamente ao lado, pelo menos nestas páginas, de vários colegas com quem tive o privilégio de trabalhar por muitos anos.

O assunto não é simples e isso pode ser visto pela grandeza, qualitativa e quantitativa, da equipe, que foi necessário mobilizar para chegar a este resultado. Entretanto, a complexidade dos temas foi suavizada por uma organização adequada, que apresenta alguns tópicos, em separado, para facilitar a compreensão, sem que se perca a noção do conjunto.

É notável a variedade dos temas abordados nos capítulos, nos quais se revelam os aspectos mais gerais dos agrotóxicos e do ambiente solo, descreve-se o comportamento e o destino dos agrotóxicos no ambiente solo-água, são definidas a biotransformação, a biodegradação e a biorremediação, é abordada a tecnologia de aplicação dos agrotóxicos e seus efeitos em organismos não-alvo, e abrangem até tópicos tão específicos como a modelagem matemática e o uso de radioisótopos no estudo do comportamento dos agrotóxicos no ambiente.

A oportunidade do lançamento desta publicação coincide com a intensificação do interesse público nos impactos ambientais gerados pelo uso de agrotóxicos no ambiente, geralmente relacionados aos aspectos de segurança dos alimentos, aos direitos do consumidor e também às barreiras fitossanitárias impostas às nossas exportações.

Existe, ainda hoje, uma lacuna de informação compilada sobre os processos envolvidos na dinâmica dos agrotóxicos no ambiente onde são aplicados. Os textos aqui apresentados irão facilitar aos estudantes de graduação e de pós-graduação, bem como aos pesquisadores e outros profissionais interessados nessa temática, o acesso a essa informação. Este material fornece os subsídios necessários à compreensão desses processos, bem como as ferramentas para inferir tendências futuras de comportamento em diferentes ambientes.

Mais uma vez, os pesquisadores da Embrapa e de seus parceiros demonstram seu empenho em elevar o patamar de excelência da pesquisa agropecuária nacional, com foco nas fronteiras da ciência, e em gerar resultados que se reflitam de maneira benéfica no meio rural brasileiro.

A elaboração de uma obra como esta é uma empreitada que exige grande dose de dedicação e competência. É com satisfação, portanto, que apresento esta obra, que certamente se configurará como uma importante referência para todos que pretendem abordar a questão da relação entre agrotóxicos e ambiente.

*Clayton Campanhola*  
Diretor-Presidente da Embrapa

# Prefácio

Os agrotóxicos são compostos sintetizados com a premissa de exercerem o mínimo de impacto sobre os organismos não-alvo e de garantir a eficácia agronômica no controle de pragas, doenças e plantas daninhas. No entanto, alguns desses compostos podem afetar a vida selvagem, a saúde do homem do campo, as qualidades do solo e da água, entre outros, se persistentes e/ou recalcitrantes. Acrescenta-se que a tecnologia de aplicação utilizada também exerce influência nos aspectos econômicos, ecológicos e sociais resultantes, sejam os já citados anteriormente, ou em outros efeitos ambientais em áreas não-alvo. A demanda pela produção de alimentos, aliada à necessidade de manutenção da qualidade ambiental fomentada pela Agenda 21, trouxe para este século o desafio da integração das várias áreas do conhecimento (química, física, biologia, matemática e toxicologia) na compreensão e determinação de processos ambientais desencadeados nos diferentes compartimentos (ar, água e solo), enfatizando a necessidade fundamental de interdisciplinaridade no campo das ciências ambientais aplicada a agricultura.

Esta publicação agrega a experiência de profissionais dessas diversas áreas de conhecimento aplicada à avaliação de impacto ambiental em função da atividade agrícola, imbuídos no objetivo de propiciar aos estudantes de graduação e pós-graduação, profissionais da área ambiental, técnicos e demais interessados, uma revisão bibliográfica atualizada para a compreensão das relações existentes entre os agrotóxicos e o ambiente. Pretende suprir a lacuna de livros técnicos na língua portuguesa, apesar da já existente massa crítica de especialistas nas áreas abordadas pelos mesmos no País.

A organização dos capítulos dispõe ao leitor uma melhor seqüência lógica conceitual que proporciona uma melhor compreensão do seu conteúdo.

Ressalta-se que o material apresentado não foi elaborado objetivando o seu uso por especialistas de qualquer das disciplinas tradicionais abordadas, mas para incentivar que esses reconheçam o papel fundamental que exercem na abordagem sistêmica da

compreensão do problema. Assim, o nível de detalhes apresentados é o desejável para aqueles que pretendem discutir a relação entre as moléculas orgânicas-microrganismos-ambiente.

Editores Técnicos

*Célia Maria Maganhotto de Souza Silva*

*Elisabeth Francisconi Fay*

# Sumário

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo 1 – Agrotóxicos: Aspectos Gerais</b> .....    | 17 |
| <b>Formulação</b> .....                                   | 19 |
| Pó-seco .....   | 20 |
| Pó-molhável .....   | 21 |
| Granulados .....  | 22 |
| Formulações líquidas .....                                | 22 |
| Formulações para tratamento de sementes .....             | 24 |
| Grânulos dispersivos em água .....                        | 24 |
| Líquidos de ultrabaixo volume .....                       | 25 |
| Suspensão concentrada dispersível em óleo .....           | 25 |
| Produtos microencapsulados .....                          | 26 |
| Única dose pré-medida (tabletes) .....                    | 26 |
| Tecnologias emergentes .....                              | 27 |
| <b>Classificação dos Agrotóxicos</b> .....                | 29 |
| Inseticidas .....   | 30 |
| Fungicidas .....  | 33 |
| Herbicidas .....  | 34 |
| Nematicidas .....   | 37 |
| Moluscidas .....  | 38 |
| <b>Propriedades Físico-Químicas dos Agrotóxicos</b> ..... | 38 |
| Densidade .....   | 40 |
| Solubilidade .....  | 41 |
| Constante de dissociação .....                            | 42 |
| Pressão de vapor .....                                    | 43 |
| Lei de Henry (H) .....                                    | 45 |
| Coeficiente de partição octanol-água ( $K_{OW}$ ) .....   | 46 |
| Meia-vida .....   | 48 |
| <b>Agrotóxicos no Ambiente</b> .....                      | 49 |
| Persistência no ambiente .....                            | 50 |
| Cadeia alimentar .....                                    | 51 |
| Resistência .....   | 54 |
| Restrições .....  | 58 |

|  |     |
|--|-----|
| Efeitos à saúde .....  | 62  |
| <b>Considerações Finais</b> .....  | 65  |
| <b>Referências</b> .....   | 67  |
| <br>Capítulo 2 – Características do Ambiente Solo .....                                | 75  |
| <b>Fases do Solo</b> .....   | 76  |
| Fase sólida .....  | 76  |
| Fase líquida .....   | 77  |
| Fase gasosa .....  | 78  |
| <b>Perfil do Solo</b> .....  | 79  |
| <b>Propriedades dos Solos</b> .....  | 80  |
| Características físicas .....  | 80  |
| Características mineralógicas .....  | 81  |
| Características eletroquímicas .....   | 87  |
| <b>Constituintes Orgânicos do Solo</b> .....   | 90  |
| Matéria orgânica .....   | 90  |
| Mineralização .....  | 91  |
| Humificação .....  | 92  |
| Biota do solo .....  | 95  |
| Macrofauna .....   | 96  |
| Microfauna .....   | 96  |
| Macroflora .....   | 97  |
| Microbiota .....   | 99  |
| <b>Heterogeneidade dos Micro-habitats do Solo</b> .....                                | 102 |
| <b>Considerações Finais</b> .....  | 103 |
| <b>Referências</b> .....   | 104 |
| <br>Capítulo 3 – Comportamento e Destino<br>de Agrotóxicos no Ambiente Solo-Água ..... | 107 |
| <b>Partição Multifases nos Poros</b> .....   | 110 |
| Processo de retenção .....   | 111 |
| Processo de transporte .....   | 117 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Considerações Finais</b> .....  | 130 |
| <b>Referências</b> .....   | 131 |
| <b>Capítulo 4 – Biotransformação de Agrotóxicos e Biorremediação</b> .....                 | 145 |
| <b>Xenobióticos</b> .....  | 146 |
| <b>Microrganismos Degradadores</b> .....   | 149 |
| <b>Metabolismo Microbiano</b> .....  | 151 |
| <b>Reações de Degradação</b> .....   | 155 |
| Reações oxidativas .....   | 156 |
| Reações de redução .....   | 161 |
| Reações hidrolíticas .....   | 163 |
| <b>Avaliação e Desenvolvimento de Novas Capacidades Biodegradativas</b> .....              | 165 |
| <b>Biorremediação</b> .....  | 167 |
| Tecnologias de biorremediação .....  | 172 |
| <b>Considerações Finais</b> .....  | 181 |
| <b>Referências</b> .....   | 182 |
| <b>Capítulo 5 – Biodegradação Acelerada de Agrotóxicos</b> .....                           | 193 |
| <b>Implicações Genéticas e Enzimáticas</b> .....   | 194 |
| Plasmídeos catabólicos .....   | 198 |
| <b>Biodegradação Acelerada</b> .....   | 201 |
| Estudos de laboratório x estudos em campo .....  | 204 |
| Efeito da concentração .....   | 205 |
| Transferência da biodegradação acelerada .....   | 205 |
| Ocorrência da biodegradação acelerada cruzada .....  | 206 |
| Estabilidade da biodegradação acelerada .....  | 208 |
| <b>Efeito dos Parâmetros Físico-Químicos do Solo sobre a Biodegradação Acelerada</b> ..... | 209 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Ineficiência no Controle Fitossanitário .....</b>   | <b>210</b> |
| <b>Considerações Finais .....</b>  | <b>211</b> |
| <b>Referências .....</b>   | <b>212</b> |
| <br>   |            |
| <b>Capítulo 6 – Persistência<br/>de Moléculas Xenobióticas .....</b>   | <b>221</b> |
| <b>Persistência .....</b>  | <b>224</b> |
| Ordem de persistência entre classes de agrotóxicos .....   | 227        |
| Dependência do tempo na perda do agrotóxico .....  | 228        |
| Fatores que influenciam a persistência de um agrotóxico .....  | 233        |
| <b>Considerações Finais .....</b>  | <b>249</b> |
| <b>Referências .....</b>   | <b>250</b> |
| <br>   |            |
| <b>Capítulo 7 – Efeito de Agrotóxicos<br/>em Organismos Não-Alvo do Solo .....</b>                                 | <b>259</b> |
| <b>Efeito de Agrotóxicos em Alguns<br/>Parâmetros Microbianos do Solo .....</b>                                    | <b>262</b> |
| Respiração básica .....  | 262        |
| Enzimas .....  | 262        |
| Conteúdo de ergosterol no solo .....   | 266        |
| Degradação da celulose .....   | 268        |
| Carbono (C) da biomassa microbiana .....   | 268        |
| Transformações do nitrogênio mediadas por microrganismos ....  | 270        |
| Índices específicos .....  | 271        |
| <b>Efeitos de Agrotóxicos sobre as Micorrizas Arbusculares<br/>e na Fixação de Nitrogênio em Leguminosas .....</b> | <b>272</b> |
| Micorrizas arbusculares (MA) .....   | 272        |
| Fixação de nitrogênio em leguminosas .....   | 274        |
| <b>Adição de Matéria Orgânica na Reversão do Efeito<br/>Danoso de Agrotóxicos em Microrganismos Não-Alvo .....</b> | <b>276</b> |
| <b>Considerações Finais .....</b>  | <b>277</b> |
| <b>Referências .....</b>   | <b>278</b> |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Capítulo 8 – Tecnologia de Aplicação de Agrotóxicos: Fatores que afetam a eficiência e o impacto ambiental</b> ..... | 289 |
| <b>Fatores que Afetam a Eficiência da Aplicação</b> .....   | 293 |
| <b>Alvo Biológico</b> .....   | 295 |
| Volume de aplicação .....   | 298 |
| Gotas produzidas durante a pulverização .....   | 299 |
| <b>Eficiência de Técnicas de Aplicação Utilizadas no Brasil</b> .....   | 308 |
| <b>Considerações Finais</b> .....   | 313 |
| <b>Referências</b> .....  | 315 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Capítulo 9 – Modelagem Matemática e Simulação da Exposição do Ambiente à Aplicação de Agrotóxicos: Apoio à Avaliação de Risco Ambiental</b> ..... | 319 |
| <b>Modelagem Matemática e Simulação de Sistemas: Aspectos Gerais</b> .....   | 326 |
| <b>Características e Processos Inseridos em Modelos Matemáticos e Simuladores</b> .....  | 332 |
| <b>Modelos Matemáticos e Simuladores na Avaliação de Risco de Agrotóxicos no Ambiente</b> .....  | 338 |
| <i>CMLS-94-Chemical Movement in Layered Soils</i> (Nofziger & Hornsby, 1994) .....   | 343 |
| PRZM2- <i>Pesticide Root Zone Model</i> (Estados Unidos, 1994) ....  | 344 |
| NLEAP – <i>Nitrate Leaching and Economic Analysis Package</i> (Shaffer et al., 1991a, 1991 b) .....  | 345 |
| LEACHM – <i>Leaching Estimation and Chemistry Model</i> (Wagenet & Hudson, 1989) .....   | 345 |
| EPIC – <i>Erosion-Productivity Impact Calculator</i> (Sharpley & Williams, 1990) .....   | 346 |
| PELMO – <i>Pesticide Leaching Model</i> (Klein, 1994) .....  | 347 |
| SWRRB – <i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i> (Arnold et al., 1990) .....   | 348 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Limitações de uso de Simuladores para as Condições Brasileiras</b> ..... | 348 |
| <b>Considerações Finais</b> .....   | 351 |
| <b>Referências</b> .....  | 352 |

**Capítulo 10 – Uso do Radioisótopo <sup>14</sup>C em Estudos de Comportamento e Destino de Agrotóxicos no Ambiente** ..... 365

|   |     |
|---|-----|
| <b>Conceitos Básicos</b> .....              | 366 |
| Raios X .....                               | 366 |
| Radioatividade .....                        | 367 |
| Isótopos .....                              | 368 |
| Processos de desintegração .....            | 368 |
| Constante de desintegração radioativa ..... | 371 |
| Meia-vida .....                             | 371 |
| Atividade .....                             | 372 |
| Atividade específica .....                  | 375 |
| Meia-vida efetiva e biológica .....         | 375 |
| Radiomarcção .....                          | 377 |
| Radiotraçador .....                         | 378 |
| Espectrômetro de cintilação líquida .....   | 379 |
| <i>Quenching</i> .....                      | 381 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Monitoração de Agrotóxicos no Ambiente Envolvendo a Utilização de <sup>14</sup>C</b> ..... | 382 |
| Radiorespirometria .....  | 382 |
| Lisímetros .....  | 385 |
| Auto-radiografia .....  | 387 |
| Fracionamento químico do solo .....   | 388 |
| Cromatografia de camada delgada .....   | 391 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Aplicações de Agrotóxico - <sup>14</sup>C</b> .....              | 394 |
| <b>Utilização de Outros Radioisótopos e Isótopos Estáveis</b> ..... | 395 |
| <b>Considerações Finais</b> .....                                   | 396 |
| <b>Referências</b> .....  | 397 |