

Campinas, SP / Dezembro, 2024

## Cálculo do indicador de risco ambiental (IRA) de pesticidas na agricultura

Claudio Aparecido Spadotto<sup>(1)</sup><sup>(1)</sup> Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP.

### Introdução

O risco ambiental (ou risco ecológico) de pesticidas é função da sua toxicidade, para os seres humanos e para outros organismos, e da exposição dos organismos, considerando as incertezas envolvidas na caracterização desses dois componentes. Toxicidade é a capacidade do pesticida produzir efeito nocivo nos organismos e os efeitos podem ser agudos, crônicos e subcrônicos. A exposição se refere à concentração (ou dose) à qual os organismos de um dado compartimento ambiental (solo, água, atmosfera, vegetação) estão ou estariam expostos.

No âmbito da avaliação prognóstica de riscos ambientais de pesticidas na agricultura, a toxicidade é caracterizada a partir de parâmetros obtidos nos estudos em laboratório (condições controladas); enquanto a exposição é caracterizada em função de propriedades ambientais do pesticida e das condições de uso agrícola.

A avaliação de risco ambiental é organizada em fases sucessivas de refinamento, partindo-se de uma fase mais simples e conservadora (ou seja, com maior margem de segurança), evoluindo, se necessário, para fases mais complexas e realísticas (Spadotto, 2006). Na fase inicial, os cálculos das concentrações ambientais invariavelmente superestimam a exposição e, conforme a avaliação é refinada, com estimativas mais prováveis das concentrações

ambientais, critérios menos conservadores e mais realistas podem ser usados (Spadotto et al., 2004). Pela característica conservadora da fase inicial da avaliação, adotam-se valores mais restritivos dos parâmetros de toxicidade.

Há uma distinção entre os termos 'impacto', 'perigo' e 'risco', conforme sugerido por diferentes autores (Levitan, 2000; Maud et al., 2001). Risco é função da probabilidade de um evento ocorrer e da magnitude do efeito desse evento (Grã Bretanha, 1995). Por esse motivo, adotou-se aqui o termo 'indicador' para caracterizar não o risco propriamente dito, mas sim o potencial de risco ambiental de pesticidas agrícolas.

Um exemplo de tecnologia disponível para ser utilizada ainda em fase inicial da avaliação de risco ambiental de pesticidas é o software ARAquá (Spadotto et al., 2009; Spadotto; Mingoti, 2014; ARAquá [...], 2017), atualmente disponível na versão ARAquáWeb<sup>1</sup>. Por ter sido desenvolvida para uma fase inicial da avaliação de risco ambiental, a tecnologia ARAquá utiliza expressões matemáticas relativamente simples, no entanto, demanda dados que por vezes não estão prontamente disponíveis em escala local, ao nível de propriedade agrícola.

Uma alternativa ao uso de modelos matemáticos de simulação na avaliação de riscos ambientais de

<sup>1</sup> Disponível em: <http://sistemas-novo.sede.embrapa.br/AraquaWeb>.

pesticidas são os indicadores. Simplicidade é uma característica geralmente desejada nos indicadores (Feola et al., 2011) e isso frequentemente os torna utilizáveis, mesmo com dados escassos (Van der Werf, 1996). Nesse sentido, métodos de avaliação de risco baseados em indicadores apresentam uma vantagem comparativa sobre avaliações mais complexas, como medições diretas a campo ou modelagem e simulação, os quais exigem maior conhecimento especializado, mais recursos financeiros e dados que podem não estar disponíveis (Feola et al., 2011).

Vários indicadores de risco ambiental de pesticidas já foram desenvolvidos (Higley; Wintersteen, 1992; Hornsby, 1992; Kovach et al., 1992; Penrose et al., 1994; Gutsche, 1995; Lewis et al., 1997; Van der Werf; Zimmer, 1998; Reus; Leendertse, 2000; Padovani et al., 2004; Zhan; Zhang, 2012) e revisados por vários autores (Maud et al., 2001; Reus et al., 2002; Feola et al., 2011).

Os indicadores variam em relação à metodologia adotada, variáveis envolvidas e aspectos dos riscos considerados. Entre as abordagens adotadas, o método de “razão de risco” é o mais robusto (Reus et al., 2002). Esse método é baseado na razão entre a exposição ambiental ao pesticida (geralmente a concentração do pesticida em um compartimento ambiental) e a toxicidade do pesticida para organismos daquele compartimento ambiental (Linders et al., 1994).

Portanto, os indicadores podem dar suporte à avaliação de riscos ambientais associados ao uso de pesticidas (Feola et al., 2011), particularmente na fase inicial, numa primeira abordagem, e especialmente em nível de campo. Os indicadores podem auxiliar no processo de tomada de decisão para a seleção e o uso de pesticidas, ponderando entre a eficácia agrônômica, o custo financeiro e os riscos ambientais. Assim, os indicadores de risco ambiental podem ser utilizados por produtores agrícolas e profissionais que atuam na recomendação de pesticidas.

O presente Comunicado Técnico descreve e demonstra a aplicação de um indicador desenvolvido para apontar potenciais problemas ambientais do uso de pesticidas, considerando os compartimentos solo, água subterrânea e água superficial. O indicador é uma simplificação do conhecimento científico e é relativamente fácil de aplicar, demandando informações sobre o uso dos pesticidas em área agrícola, dados sobre seu comportamento ambiental, parâmetros de potabilidade de água para consumo humano e de proteção de organismos de solo e aquáticos.

## Descrição do indicador

O indicador foi concebido para ser usado em escala local (área da lavoura) e foi desenvolvido com base na razão exposição/toxicidade. A exposição é caracterizada pela concentração ambiental estimada (*CAE*) no solo, água de superfície e água subterrânea. Inicialmente são considerados os efeitos agudos em organismos aquáticos (peixes, algas e crustáceos) e organismos do solo (minhocas), assim os parâmetros toxicológicos utilizados são de curto prazo. Pode-se, no entanto, adaptar o indicador para considerar toxicidades crônicas e subcrônicas. Como não há dados toxicológicos confiáveis para organismos em águas subterrâneas, o indicador considera o ser humano como organismo não alvo e os efeitos ocorreriam pelo consumo da água. A potabilidade também é considerada para água superficial.

Para o cálculo do Indicador de Risco Ambiental (*IRA*) do uso de pesticidas em uma dada área agrícola, são necessárias as seguintes informações:

- Cultura agrícola.
- Ingrediente ativo (i.a.) do pesticida aplicado ou a ser aplicado.
- Dose do pesticida utilizada ou a ser utilizada (g i.a./ha).
- Número de aplicações do pesticida na área durante o ciclo da cultura agrícola.

Inicialmente, esses dados são usados para o cálculo da *CAE* nos respectivos compartimentos (solo, água superficial e água subterrânea), considerando o índice de permanência do pesticida no solo (*iP*) ou o índice de mobilidade do pesticida no solo (*iM*). O cálculo do *IRA* necessita também de dados de meia-vida ( $T_{1/2}$ ) e de coeficiente de sorção normalizado pelo teor de carbono orgânico ( $K_{oc}$ ) do pesticida, ambos no solo.

Os parâmetros de toxicidade (potabilidade da água para consumo humano e toxicidade para organismos aquáticos e de solo) e os parâmetros de comportamento no solo (dados de  $T_{1/2}$  e de  $K_{oc}$ ) podem ser coletados em bases de dados e na literatura, como citado na seção com exemplo de aplicação do *IRA*. Para condições locais específicas, os dados de  $T_{1/2}$  e de  $K_{oc}$  do pesticida podem ser determinados em laboratório, a partir de amostras de solo, ou estimados utilizando modelos matemáticos. As informações sobre dose e número de aplicações, assim como a concentração de cada ingrediente ativo componente da formulação, estão prontamente disponíveis nos rótulos e bulas dos pesticidas comercializados.

Quanto maior o *IRA*, maior é o potencial de risco ambiental e os cálculos são feitos como segue.

Para solos:

$$CAE_{solo} = \frac{D \times N \times iP}{d \times z \times 10}$$

em que

$CAE_{solo}$  = concentração estimada do pesticida no solo (mg/kg).

$D$  = dose do ingrediente ativo do pesticida (g i.a./ha).

$N$  = número de aplicações do pesticida.

$iP$  = índice de permanência do pesticida no solo.

$d$  = densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>).

$z$  = profundidade de distribuição do pesticida no solo (m).

$iP$  é calculado como segue:

$$iP = 1 + \exp\left(\left(\frac{-0,693}{T_{1/2}}\right)K_{oc}\right)$$

em que

$T_{1/2}$  = meia-vida do pesticida no solo (dias).

$K_{oc}$  = coeficiente de sorção do pesticida normalizado pelo teor de carbono do solo (mL/g).

E o *IRA* do uso de um dado pesticida em solo agrícola é calculado com a seguinte equação:

$$IRA_{solo} = \frac{CAE_{solo}}{P_{solo}}$$

em que

$P_{solo}$  = parâmetro de proteção de organismos de solo.

Para águas superficiais:

$$CAE_{agsup} = \frac{D \times N \times iM}{z' \times 10^3}$$

em que

$CAE_{agsup}$  = concentração estimada do pesticida na água superficial (mg/L).

$D$  = dose do ingrediente ativo do pesticida (g i.a./ha).

$N$  = número de aplicações do pesticida.

$iM$  = índice de mobilidade do pesticida no solo.

$z'$  = profundidade de distribuição do pesticida na coluna d'água (m).

$iM$  é calculado como segue;

$$iM = \exp\left(\left(\frac{-0,693}{T_{1/2}}\right)K_{oc}\right) \quad \text{no solo (dias).}$$

ção do pesticida  
normalizado pelo teor de carbono do solo (mL/g).

A estimativa da concentração do pesticida na água superficial considera uma área agrícola de 10 ha ao redor de um lago com 1 ha de superfície e 1 m de profundidade. O *IRA* do uso de um dado pesticida em água superficial é calculado da seguinte maneira:

$$IRA_{agsup} = \frac{CAE_{agsup}}{P_{agsup}}$$

em que

$CAE_{agsup}$  = concentração estimada do pesticida na água subterrânea (mg/L).

$P_{agsup}$  = parâmetro de proteção de organismos aquáticos (água doce) ou de potabilidade de água superficial para consumo humano.

Para águas subterrâneas:

$$CAE_{agsub} = \frac{D \times N \times iM}{p \times z'' \times 10^4}$$

em que

$CAE_{agsub}$  = concentração estimada do pesticida na água subterrânea (mg/L).

$D$  = dose do ingrediente ativo do pesticida (g i.a./ha).

$N$  = número de aplicações do pesticida.

$iM$  = índice de mobilidade do pesticida no solo.

$p$  = porosidade na zona saturada do solo (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>).

$z''$  = profundidade de distribuição do pesticida na zona saturada do solo (m).

$iM$  é calculado como mostrado anteriormente e o *IRA* do uso de um dado pesticida em água subterrânea para consumo humano é assim calculado:

$$IRA_{agsub} = \frac{CAE_{agsub}}{P_{agsub}}$$

em que

$CAE_{agsub}$  = concentração estimada do pesticida na água subterrânea (mg/L).

$P_{agsub}$  = parâmetro de potabilidade de água subterrânea para consumo humano.

Como descrito, o *IRA* é calculado para três compartimentos ambientais, a partir da quantidade aplicada de um dado ingrediente ativo de pesticida por hectare (g i.a./ha). Pode-se também fazer uso do

*IRA* agregado, calculado como a soma dos valores de *IRA* para os compartimentos ambientais.

Pesticidas são aplicados no solo ou atingem o solo, em alguma proporção, depois da aplicação. Na fase inicial da avaliação de risco ambiental, assumir que todo o pesticida aplicado chega à superfície do solo é adequado em cenário de “pior caso” e confere característica conservadora à avaliação. Na atual versão do *IRA* não se considera o transporte do pesticida por deriva para fora da área tratada ou a sua volatilização para a atmosfera.

Herbicidas pré-emergentes (aplicados antes da emergência de plantas daninhas), nematicidas e alguns inseticidas e fungicidas são aplicados diretamente na superfície do solo e os cálculos do *IRA* consideram que toda a dose (i.a.) aplicada chega ao solo. Se for recomendada a incorporação no solo (como no caso de herbicidas da modalidade pré-plantio incorporado), a profundidade de incorporação pode ser considerada para cálculos mais refinados. Por outro lado, se houver presença de palha na superfície (como em áreas de plantio direto e de cana-de-açúcar com colheita mecanizada), parte do que for aplicado não atingirá diretamente o solo, o que pode ser levado em conta para refinamento dos cálculos.

Herbicidas pós-emergentes e outros pesticidas (inseticidas, fungicidas, acaricidas etc.) são aplicados visando atingir a parte aérea das plantas; no entanto, parte da quantidade aplicada acaba atingindo o solo. Nesse caso, para refinamento do cálculo do *IRA*, a quantidade de pesticida que atinge o solo pode ser considerada. Esse dado, que depende da espécie e cultivar agrícola e do seu estágio de crescimento-desenvolvimento, pode ser obtido na literatura ou, em condições específicas, por meio de experimentação a campo.

Os pesticidas usados no campo são produtos formulados, obtidos a partir de um ou mais produtos técnicos, acrescidos de componentes da formulação. Os produtos técnicos têm nas suas composições teores definidos de ingredientes ativos. Uma prática frequente dos produtores é fazer mistura de mais de um produto formulado, que não sejam incompatíveis, na mesma calda de aplicação.

Para um dado pesticida (produto formulado), o *IRA* pode ser calculado para cada ingrediente ativo (com o procedimento mostrado anteriormente), assim como para qualquer componente da formulação que tenha importância ambiental. O *IRA* pode ser expresso em valores absolutos

para cada pesticida (i.a.) ou em valores relativos ao conjunto de pesticidas (i.a.) considerados.

Na interpretação do *IRA*, valores acima de 1,0 indicam risco ambiental. Para se garantir maior rigor na avaliação do risco, pode-se adotar um nível de segurança como sendo o maior valor aceitável do *IRA* (abaixo de 1,0), por exemplo 0,5.

Na aplicação genérica do *IRA* (não específica para uma situação de campo), podem ser usadas as maiores doses recomendadas dos pesticidas. Em situações locais específicas (p. ex. para um talhão ou mesmo para uma fração de um talhão), a dose de cada pesticida pode ser ajustada às condições de campo e, se reduzida (desde que a eficácia agrônômica seja garantida), levará à diminuição do *IRA*. Essa característica do *IRA* faz com que o indicador seja uma solução tecnológica que contribui para o uso ambientalmente adequado dos pesticidas.

### Exemplo de aplicação do indicador

Como exemplo, o *IRA* foi aplicado para sete ingredientes ativos de herbicidas pré-emergentes registrados para cultura de soja. Foram consideradas as maiores doses recomendadas e foi assumido que para esses herbicidas apenas uma aplicação é realizada. Como parâmetros de toxicidade foram considerados os valores mais restritivos encontrados e os dados de  $T_{1/2}$  e  $K_{oc}$  dos herbicidas foram coletados em bases de dados e na literatura (Tabela 1).

Na Tabela 2, estão as concentrações ambientais estimadas usando as equações apresentadas na descrição do *IRA*. A densidade do solo foi assumida como 1.300 kg/m<sup>3</sup> e foi adotada a profundidade de 0,05 m para distribuição do pesticida no solo. A profundidade de distribuição do pesticida na coluna d'água superficial considerada foi de 1 m. A porosidade na zona saturada do solo assumida foi 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> e a profundidade de distribuição do pesticida na zona saturada do solo adotada foi 1 m.

Os valores do *IRA* calculados estão na Tabela 3. Nesse exemplo, de um modo geral, os herbicidas apresentam risco potencialmente baixo para organismos de solo e a maioria dos valores do *IRA* indicam risco baixo também para organismos aquáticos e para consumo humano.

**Tabela 1.** Dados dos herbicidas pré-emergentes na cultura de soja, usados para o cálculo do indicador de risco ambiental (IRA).

Herbicida <sup>(1)</sup>	Dose (g i.a./ha)	Parâmetros de Toxicidade			Parâmetros no Solo	
		Organismos de Solo (mg/kg)	Organismos Aquáticos (mg/L)	Potabilidade (mg/L)	$T_{1/2}$ <sup>(2)</sup> (dias)	$K_{oc}$ <sup>(3)</sup> (mL/g)
Acetocloro	3.600	105,5	0,19	0,1	14	156
Alacloro	3.360	386,8	0,9	0,002	15	170
Imazaquim	150	23,5	140	1,6	60	20
Imazetapir	100	10.000	50	16	90	10
Metribuzim	490	427	2,1	0,35	40	60
S-Metolacloro	2.400	570	1,6	3,5	90	200
Trifluralina	2.000	500	0,01	0,7	60	8.000

<sup>(1)</sup> Ingrediente ativo.

<sup>(2)</sup> Meia-vida de degradação no solo.

<sup>(3)</sup> Coeficiente de sorção normalizado pelo teor de carbono orgânico do solo.

Fonte: Hornsby et al. (1996), Lewis et al. (2016), Estados Unidos (2018, 2023?) e Smith e Nowell (2024).

**Tabela 2.** Índices de persistência ( $iP$ ) e mobilidade ( $iM$ ) e concentrações ambientais estimadas (CAE) para os herbicidas considerados.

Herbicida <sup>(1)</sup>	$iP$	$iM$	CAE (mg/kg <sub>solo</sub> ou mg/L <sub>água</sub> )		
			Solo	Água superficial	Água subterrânea
Acetocloro	1,00	0,00	5,54	0,00	0,00
Alacloro	1,00	0,00	5,17	0,00	0,00
Imazaquim	0,21	0,79	0,05	0,12	0,04
Imazetapir	0,07	0,93	0,01	0,09	0,03
Metribuzim	0,65	0,35	0,49	0,17	0,06
S-Metolacloro	0,79	0,21	2,90	0,51	0,17
Trifluralina	1,00	0,00	3,08	0,00	0,00

<sup>(1)</sup> Ingrediente ativo.

Cálculos feitos com os dados apresentados na Tabela 1.

**Tabela 3.** Indicador de Risco Ambiental (*IRA*) para os herbicidas considerados.

Herbicida <sup>(1)</sup>	<i>IRA</i>				
	Organismos de solo	Água superficial Organismo aquáticos	Água superficial consumo humano	Água subterrânea consumo humano	Agregado <sup>(2)</sup>
Acetocloro	0,05	0,01	0,02	0,01	0,08
Alacloro	0,01	0,00	0,65	0,22	0,88
Imazaquim	0,00	0,00	0,07	0,02	0,10
Imazetapir	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Metribuzim	0,00	0,08	0,50	0,17	0,74
S-Metolacoloro	0,01	0,32	0,15	0,05	0,52
Trifluralina	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01

<sup>(1)</sup> Ingrediente ativo.

<sup>(2)</sup> Calculado considerando conjuntamente organismos de solo e aquáticos e água superficial e subterrânea para consumo humano.

Cálculos feitos com os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Quanto maior o *IRA*, maior é o potencial de risco ambiental.

Adotando-se o nível de segurança  $\leq 0,5$ , os valores do *IRA* agregado para Alacloro (0,88) e Metribuzim (0,74) indicam haver risco ambiental na sua utilização em cultura de soja, particularmente para o Alacloro em água superficial para consumo humano. Para o S-Metolacoloro, o valor do *IRA* agregado (0,52) está pouco acima do nível de segurança, contribuindo para isso o *IRA* para água superficial, tanto para organismos aquáticos como para água superficial para consumo humano. Deve-se lembrar que se trata somente de um exemplo de uso do *IRA*, utilizando parâmetros genéricos obtidos em bases de dados e na literatura, e a maior dose recomendada de cada herbicida considerado.

Garantindo a eficácia agrônômica, a redução, se possível, da dose do Alacloro para 2400 g i.a./ha (a menor dose recomendada), resulta no *IRA* agregado de 0,63 e para água superficial para consumo humano seria 0,47 (atendendo o nível de segurança). Da mesma maneira, se for agronomicamente possível reduzir a dose do Metribuzim para a menor dose recomendada (350 g i.a./ha), o *IRA* agregado seria de 0,53 e para água superficial para consumo humano seria 0,35.

Dessa forma, o *IRA* pode ser usado como suporte à decisão no uso de herbicidas (e pesticidas, no geral), na escolha do produto a ser usado e no ajuste de dose que garanta a eficácia agrônômica e concomitantemente diminua o risco ambiental. Como visto anteriormente, refinamento dos cálculos

pode ser feito nas situações em que houver palha na superfície ou for feita a incorporação no solo e nos casos de uso de herbicidas pós-emergentes e outros pesticidas que são aplicados visando atingir a parte aérea das plantas.

## Considerações finais

A solução tecnológica apresentada nesse Comunicado Técnico está em fase final de desenvolvimento. O *IRA* é um indicador para ponderar sobre riscos ambientais de pesticidas na tomada de decisão para recomendação e uso desses químicos na produção agrícola. Na concepção do *IRA* foi adotado o conceito de razão de risco ambiental (exposição/toxicidade), que o torna mais robusto que outros indicadores e faz com que seja adequado para uso no prognóstico de riscos ambientais de pesticidas. O *IRA* pode ainda ser usado, numa primeira aproximação, na avaliação de riscos ambientais de pesticidas para fins regulatórios. Sempre que dados necessários estejam disponíveis, o uso de modelos matemáticos de simulação, no lugar de indicadores, é recomendado.

Esse Comunicado Técnico e a solução tecnológica apresentada estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos” (ODS 6) e

“Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis” (ODS 12), da Organização das Nações Unidas (ONU)<sup>2</sup>.

## Referências

ARAQUÁ - Avaliação de Risco Ambiental de Agrotóxico. [2017]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2024/araqua---avaliacao-de-risco-ambiental-de-agrotoxico>. Acesso em: 27 ago. 2024.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **2018 edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories**. Washington, DC, 2018. EPA 822-F-18-001. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-01/dwttable2018.pdf>. Acesso em: 25 set. 2024.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Aquatic life benchmarks and ecological risk assessments for registered pesticides**. [Washington, DC, 2023?]. Disponível em: <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/aquatic-life-benchmarks-and-ecological-risk>. Acesso em: 26 jul. 2024.

FEOLA, G.; RAHN, E.; BINDER, C. R. Suitability of pesticide risk indicators for Less Developed Countries: a comparison. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 142, n. 3-4, p. 238-245, Aug. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.014>.

GRÃ BRETANHA. Department of the Environment. **A guide to risk assessment and risk management for environmental protection**. London, 1995.

GUTSCHE, V. The influence of pesticides and pest management strategy on wildlife. In: Sustainable Farming Systems Symposium, 63., 1995, Edinburgh. **Integrated crop protection: towards sustainability?: proceedings**. Farnham: British Crop Protection Council, 1995. p. 469-480.

HIGLEY, L. G.; WINTERSTEEN, W. K. A novel approach to environmental risk assessment of pesticides as a basis for incorporating environmental costs into economic injury levels. **American Entomologist**, v. 38, n. 1, p. 34-39, Spring 1992. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/ae/38.1.34>.

HORNSBY, A. G. Site specific pesticide recommendations: the final step in environmental impact prevention. **Weed Technology**, v. 6, n. 3, p. 736-742, Sept. 1992. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0890037X00036137>.

HORNSBY, A. G.; WAUCHOPE, R. D.; HERNER, A. E. **Pesticide properties in the environment**. New York: Springer, 1996. 227 p.

2 Mais informações em: <https://www.embrapa.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>.

KOVACH, J.; PETZOLDT, C.; DEGNIL, J.; TETTE, J. A method to measure the environmental impact of pesticides. **New York's Food and Life Sciences Bulletin**, n. 139, p. 1-8, 1992.

LEVITAN, L. “How to” and “why”: Assessing the enviro-social impacts of pesticides. **Crop Protection**, v. 19, n. 8-10, p. 629-636, Sept. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00083-1).

LEWIS, K. A.; NEWBOLD, M. J.; HALL, A. M.; BROOM, C. E. Eco-rating system for optimizing pesticide use at farm level. Part 1: theory and development. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 68, n. 3, p. 271-279, Nov. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0202>.

LEWIS, K. A.; TZILIVAKIS, J.; WARNER, D. J.; GREEN, A. An international database for pesticide risk assessments and management. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 22, n. 4, p. 1050-1064, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>.

LINDERS, J. B. H. J.; JANSMA, J. W.; MENSINK, B. J. W. G.; OTERMANN, K. **Pesticides: benefaction or Pandora's box? A synopsis of the environmental aspects of 243 pesticides**. Bilthoven: National Institute of Public Health and Environmental Protection, 1994. 204 p. Report n° 679101014.

MAUD, J.; EDWARDS-JONES, G.; QUIN, F. Comparative evaluation of pesticide risk indices for policy development and assessment in the United Kingdom. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 86, n. 1, p. 59-73, July 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00258-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00258-9).

PADOVANI, L.; TREVISAN, M.; CAPRI, E. A calculation procedure to assess potential environmental risk of pesticides at the farm level. **Ecological Indicators**, v. 4, n. 2, p. 111-123, June 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2004.01.002>.

PENROSE, L. J.; THWAITE, W. G.; BOWER, C. C. Rating index as a basis for decision making on pesticide use reduction and for accreditation of fruit produced under integrated pest management. **Crop Protection**, v. 13, n. 2, p. 146-152, Mar. 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(94\)90166-X](https://doi.org/10.1016/0261-2194(94)90166-X).

REUS, J.; LEENDERTSE, P.; BOCKSTALLER, C.; FOMSGAARD, I.; GUTSCHE, V.; LEWIS, K.; NILSSON, C.; PUSSEMIER, L.; TREVISAN, M.; VAN

DER WERF, H.; ALFARROVA, F.; BLÜMEL, S.; ISART, J.; MCGRATH, D.; SEPPÄLÄ, T. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 90, n. 2, p. 177-187, July 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00197-9).

REUS, J. A. W. A.; LEENDERTSE, P. C. The environmental yardstick for pesticides: a practical indicator used in the Netherlands. **Crop Protection**, v. 19, n. 8-10, p. 637-641, Sept. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00084-3](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00084-3).

SMITH, C. D.; NOWELL, L. H. **Health-Based Screening Levels for evaluating water-quality data**. 3. ed. U.S. geological survey, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5066/F71C1TWP>.

SPADOTTO, C. A. **Avaliação de riscos ambientais de agrotóxicos em condições brasileiras**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 20 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 58). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/15967>. Acesso em: 16 ago. 2024.

SPADOTTO, C. A.; GOMES, M. A. F.; LUCHINI, L. C.; ANDREA, M. M. de. **Monitoramento do risco ambiental de agrotóxicos: princípios e recomendações**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 29 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 42). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/14523>. Acesso em: 13 set. 2024.

SPADOTTO, C. A.; MINGOTI, R. **Base técnico-científica do ARAquá 2014**: software para avaliação de risco ambiental de agrotóxico. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2014. 6 p. (Embrapa Gestão Territorial. Circular técnica, 2). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1009417>. Acesso em: 25 set. 2024.

SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. de C.; BALLARIN, A. W.; LAPERUTA FILHO, J.; COLENCI, R. A. **ARAquá**: software para avaliação de risco ambiental de agrotóxico. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. 15 p (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 7). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/662332>. Acesso em: 16 ago. 2024.

VAN DER WERF, H. M. G. Assessing the impact of pesticides on the environment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 60, n. 2-3, p. 81-96, Dec. 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(96\)01096-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(96)01096-1).

VAN DER WERF, H. M. G.; ZIMMER, C. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. **Chemosphere**, v. 36, n. 10, p. 2225-2249, Apr. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)10194-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)10194-1).

ZHAN, Y.; ZHANG, M. PURE: a web-based decision support system to evaluate pesticide environmental risk for sustainable pest management practices in California. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 82, p. 104-113, Aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.019>.

#### Embrapa Agricultura Digital

Av. Dr. André Tosello, 209 - Cidade Universitária  
Campinas, SP, Brasil  
CEP. 13083-886  
[www.embrapa.br/agricultura-digital](http://www.embrapa.br/agricultura-digital)  
[www.embrapa.br/fale-conosco/sac](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sac)

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Júlio Esquerdo*

Secretária-executiva: *Sônia Ternes*

Membros: *Adauto Mancini, Alan Nakai, Carla Osawa, Geraldo Cançado, Graziella Galinari, Joice Bariani, Juliana Yassitepe, Luiz Cunha, Magda Cruciol e Paula Falcão*

#### Comunicado Técnico 139

e-ISSN 2764-7412  
Dezembro, 2024

Revisão de texto: *Graziella Galinari*

Normalização bibliográfica: *Carla Cristiane Osawa (CRB-8/10421)*

Projeto gráfico: *Leandro Sousa Fazio*

Diagramação: *Magda Cruciol*

Publicação digital: PDF



Ministério da  
Agricultura e Pecuária

Todos os direitos reservados à Embrapa.