

OBJETIVOS DE  
DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL

**6** ÁGUA POTÁVEL  
E SANEAMENTO

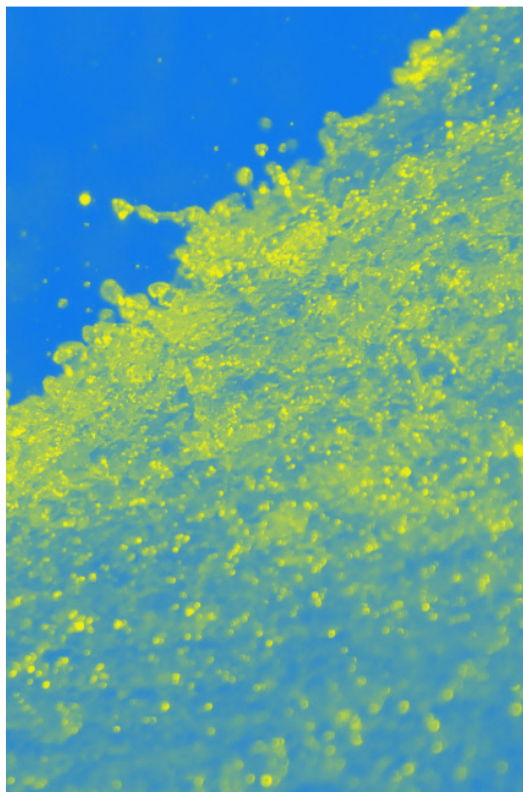
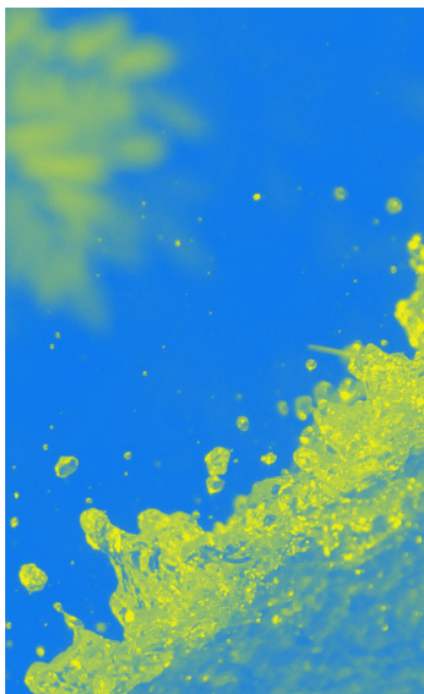


OBJETIVOS DE  
DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL

**12** CONSUMO E  
PRODUÇÃO  
RESPONSÁVEIS



## Identificação Remota de Cenários Críticos para Contaminação de Água Subterrânea em Áreas Agrícolas



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Agricultura Digital  
Ministério da Agricultura e Pecuária*

**BOLETIM DE PESQUISA  
E DESENVOLVIMENTO  
55**

**Identificação Remota de Cenários  
Críticos para Contaminação de Água  
Subterrânea em Áreas Agrícolas**

*Claudio Aparecido Spadotto  
Rafael Mingoti  
Giovanna Naves Beraldo*

**Embrapa Agricultura Digital**  
*Campinas, SP  
2023*

**Embrapa Agricultura Digital** Comitê Local de Publicações

Av. Dr. André Tosello, 209 - Cidade Universitária Presidente  
Campinas, SP, Brasil *Carla Geovana do Nascimento Macário*  
CEP. 13083-886  
Fone: (19) 3211-5700 Secretária-Executiva  
www.embrapa.br *Maria Fernanda Moura*

Membros

*Alexandre de Castro, membro indicado, Carla Cristiane Osawa, membro nato, Debora Pignatari Drucker, membro eleito, Graziella Galinari, membro nato, Ivan Mazoni, membro eleito, João Camargo Neto, membro indicado, Joao Francisco Goncalves Antunes, membro eleito, Magda Cruciol, membro nato.*

Revisão de texto

*Graziella Galinari*

Normalização bibliográfica

*Carla Cristiane Osawa*

Projeto gráfico da coleção

*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica

*Magda Cruciol*

Foto da capa

*Fabio Torresan - Rio Camanducaia (com filtro)*

Publicação digital: PDF (2023)

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Agricultura Digital

---

Spadotto, Claudio Aparecido.

Identificação remota de cenários críticos para contaminação de água subterrânea em áreas agrícolas / Claudio Aparecido Spadotto, Rafael Mingoti, Giovanna Naves Beraldo. – Campinas : Embrapa Agricultura Digital, 2023

PDF (21 p.) : il. color. - (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Agricultura Digital, ISSN 2764-2623 ; 55).

1. Avaliação do risco ambiental. 2. Identificação de cenários. 3. Contaminação de água. 4. Agrotóxico. I. Mingoti, Rafael. II. Beraldo, Giovanna Naves. III. Título. IV. Embrapa Agricultura Digital. V. Série.

CDD (21. ed.) 333.7

## Sumário

---

Introdução.....	7
Material e métodos .....	9
Resultados e discussão.....	11
Conclusões.....	17
Agradecimentos.....	18
Referências .....	18

## Identificação Remota de Cenários Críticos para Contaminação de Água Subterrânea em Áreas Agrícolas

---

Claudio Aparecido Spadotto<sup>1</sup>

Rafael Mingoti<sup>2</sup>

Giovanna Naves Beraldo<sup>3</sup>

**Resumo** - Para verificar as condições realísticas para contaminação de água subterrânea em áreas agrícolas e contribuir para maior consistência nos processos decisórios na avaliação de riscos ambientais, um método inovador de identificação remota de cenários críticos, utilizando dados geoespaciais, é apresentado e aplicado. O método é aplicável e adequado para identificação das áreas agrícolas mais vulneráveis à contaminação de água subterrânea, utilizando o índice de tempo de retenção, em base territorial e em escala exploratória. Os cenários identificados, para culturas de citros e cana-de-açúcar em áreas com Neossolos Quartzarênicos órticos (NQo) e para cultura de soja em Latossolo Vermelho distrófico (LVd), podem ser utilizados na avaliação e gerenciamento de riscos ambientais de agrotóxicos e outros contaminantes químicos. O método, inicialmente desenvolvido para o estado de São Paulo, pode ser aplicado, com os devidos ajustes, em outras regiões do Brasil.

**Termos para indexação:** recursos hídricos, vulnerabilidade, cenário de pior caso, contaminação, SIG, pesticidas, agrotóxicos.

---

<sup>1</sup> Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Soil and Water Science, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP.

<sup>2</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, analista da Embrapa Territorial, Campinas, SP.

<sup>3</sup> Geógrafa, bolsista da Embrapa Territorial, Campinas, SP.

## Remote Identification of Critical Scenarios for Groundwater Contamination in Agricultural Areas

---

**Abstract** – In order to verify realistic conditions for groundwater contamination in agricultural areas and contribute to greater consistency in decision-making processes in the assessment of environmental risks, an innovative method of remote identification of critical scenarios, using geodata, is presented and applied. The method is applicable and suitable for identifying the most vulnerable agricultural areas to groundwater contamination, using the retention time index, on territorial basis and exploratory scale. The identified scenarios, for citrus crops and sugarcane crops in areas with Neossolos Quartzarênicos órticos - NQo (Arenosols; Psamments) and for soybean crops in areas with Latossolos Vermelhos distróficos – LVd (Ferralsols; Oxisols), can be used in the assessment and management of environmental risks of pesticides and other chemical contaminants. The method, initially developed for the state of São Paulo, can be applied, with due adjustments, in other regions in Brazil.

**Index terms:** water resources, vulnerability, worst-case scenario, contamination, GIS, pesticides.

## Introdução

---

O Brasil tem cerca de 12% da água doce da Terra (Grassi, 2001), sendo que mais de 80% estão na região Amazônica e os 20% restantes se distribuem desigualmente pelo País (Rebouças et al., 1999; Agência Nacional de Águas, 2019). Água é essencial para a manutenção de todas as formas de vida sobre a Terra e para o funcionamento dos ecossistemas. Os recursos hídricos são fundamentais para várias atividades humanas. Além da disponibilidade hídrica, a qualidade das águas vem sendo amplamente debatida. Os recursos hídricos subterrâneos vêm sendo utilizados de forma mais intensiva no Brasil, uma vez que os recursos hídricos superficiais têm sofrido deterioração considerável.

A utilização de agroquímicos (fertilizantes e agrotóxicos) pode gerar resíduos que coloquem em risco a saúde humana e os organismos nos diferentes compartimentos ambientais (Spadotto; Gomes, 2006). Considerando os processos de transporte entre compartimentos ambientais aos quais os agrotóxicos são submetidos depois de aplicados em áreas agrícolas, a lixiviação merece destaque, pois pode resultar em contaminação de água subterrânea, o que, no Brasil, tem sido constatado em alguns trabalhos (Souza et al., 2004; Dores et al., 2006; Carbo et al., 2008; Dores et al., 2008; Nogueira et al., 2012).

O inverso do tempo de convecção pode ser usado como índice de vulnerabilidade intrínseca de corpos de água subterrâneos (Spadotto, 2014). Assim, o tempo de retenção do contaminante no solo fornece uma estimativa da vulnerabilidade. Quanto mais retido na zona não saturada (zona vadosa) do solo, maior é o tempo em que o contaminante fica exposto aos processos de degradação em condições aeróbicas.

Em estudos exploratórios com grande abrangência geográfica e pouco detalhados (escala cartográfica reduzida), os dados de entrada de um índice de vulnerabilidade de corpos de água subterrâneos podem ser obtidos remotamente, integrando-os, posteriormente, em um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Combinar a localização de áreas mais vulneráveis e os tipos de culturas agrícolas existentes nesses locais propicia a identificação de cenários críticos para a contaminação de águas subterrâneas. Um cenário consiste da combi-

nação de parâmetros de solo, clima e cultura agrícola (Van der Linden et al., 2003) e cenários padrões aumentam a consistência do processo regulatório minimizando a influência subjetiva da pessoa que realiza a avaliação.

A avaliação de risco ambiental (ARA) de agrotóxicos no Brasil realizada pelo Ibama, no Ministério do Meio Ambiente, para fins de registro (Santos, 2012), segue os procedimentos da Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, que é apresentada em Estados Unidos (1998). A avaliação é organizada sequencialmente em quatro níveis, sendo que no primeiro nível métodos matemáticos simples são usados em combinação com cenários agrícolas padrões, conhecidos como cenários críticos ou de “pior caso”. Métodos de análise de dados e sistematização de informações possibilitam a ampla adoção da ARA no âmbito da regulamentação e do gerenciamento do uso de agrotóxicos, pois asseguram maior consistência e realismo nos processos decisórios.

Tanto a direta adoção de tecnologias desenvolvidas em outros países quanto o uso de cenários não realísticos levam ao distanciamento das condições brasileiras na ARA (Spadotto, 2006). Sabe-se que as condições edafoclimáticas do Brasil são diferentes das norte-americanas (Amorim, 2004; Amorim et al., 2010) e, devido à diversidade de solos e de climas do Brasil, é necessária a melhoria da representatividade dos cenários utilizados (Scorza Júnior et al., 2010).

De modo a apoiar a avaliação e o gerenciamento dos riscos ambientais de produtos químicos e especificamente de agrotóxicos, nesse trabalho é apresentado e aplicado um método inédito de identificação remota de cenários, especialmente cenários críticos para contaminação de água subterrânea em áreas agrícolas. O método se diferencia por empregar equações matemáticas para cálculo de um índice de vulnerabilidade de água subterrânea distribuído no espaço geográfico, integrando dados de diferentes fontes e escalas cartográficas diversas, métodos indiretos para estimativa de outras variáveis e imagens de satélite. O método é para ser aplicado em trabalhos com grande abrangência geográfica.



## Material e métodos

A partir do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (Oliveira, 1999; Oliveira et al., 1999), foi gerado um plano de informação da vulnerabilidade de água subterrânea à contaminação, por meio do Tempo de Retenção – TR, baseado no conceito de tempo de convecção ou de percurso (Davidson et al., 1968; Rao et al., 1985) (Equações 1 e 2). É assumido que quanto menor o TR, maior é a vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação.

$$TR = T \cdot RF \quad (1)$$

$$TR = \left( L \cdot \frac{FC}{Q} \right) \cdot RF \quad (2)$$

Em que:

T = tempo de percolação da água no solo (ano);

L = profundidade do aquífero ou lençol freático (m);

FC = umidade do solo na capacidade de campo ( $m^3/m^3$ );

Q = recarga hídrica líquida anual (m/ano);

RF = fator de retenção do contaminante (agrotóxico) no solo (adimensional).

Adotou-se a forma do TR que considera diferentes horizontes (camadas) do solo e que não depende de propriedades de um agrotóxico específico.

A Equação 3 expressa matematicamente o RF para contaminantes químico-orgânicos, como os agrotóxicos.

$$RF = 1 + \left( \frac{BD \cdot OC}{FC} \right) \quad (3)$$

Onde:

BD = densidade do solo ( $kg/m^3$ );

OC = teor de carbono orgânico do solo (kg/kg);

FC = umidade do solo na capacidade de campo ( $m^3/m^3$ ).

Os cálculos do TR foram realizados utilizando os valores médios de espessura (Z) dos horizontes, FC, BD e OC, para o horizonte “A” e para o horizonte subsuperficial diagnóstico “B” ou “C”, de cada classe de solo presente no Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (Oliveira et al., 1999).

Os valores de Z, BD e OC foram obtidos diretamente da descrição das classes registradas por Oliveira (1999). Os valores de FC foram estimados utilizando a metodologia de Mingoti et al. (2016), a qual, por sua vez, adota funções de pedotransferência apresentadas por Tomasella et al. (2000) e parâmetros de retenção de água nos solos, os quais foram estimados por meio do software Qualisolo (Naime et al., 2006), utilizando valores médios de granulometria, densidade de partículas e BD provenientes de Oliveira (1999).

A recarga hídrica líquida anual (Q) foi estimada por meio da diferença entre as médias históricas de chuva (Alvares et al., 2015) e a evapotranspiração (Alvares et al., 2013). A profundidade do lençol freático foi estimada por meio da aplicação do modelo Height Above the Nearest Drainage - HAND (Nobre et al., 2011) nos dados do Modelo Digital de Elevação - DEM do projeto Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM, disponibilizados pelo United States Geological Survey – USGS, em seu portal na internet, no formato raster com resolução espacial de 90 m.

Todos os dados de entrada foram convertidos para formato raster com resolução espacial de 90 m (resolução espacial da evapotranspiração) no Sistema de Referência SIRGAS 2000 e no Sistema de Projeção Policônica, utilizando o aplicativo de Sistemas de Informação Geográfica ESRI ArcGIS v. 10.3. As equações foram processadas e os resultados obtidos nesse SIG, utilizando os padrões de resolução espacial, sistemas de referência e de projeção citados.

Nas regiões com maior vulnerabilidade de água subterrânea, foram delimitadas as áreas com culturas agrícolas temporárias, semipermanentes e permanentes. Essa delimitação foi obtida a partir do mapeamento da cobertura e uso do solo do Brasil de 2018, do projeto MapBiomass (Souza Júnior et al., 2020), o qual foi produzido a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite (Projeto MapBiomass, 2020).

## Resultados e discussão

Os valores médios de características físicas, químicas e hidráulicas dos solos no estado de São Paulo foram organizados em banco de dados georreferenciado em escala 1:750.000, que está disponível na Infraestrutura de Dados Espaciais da Embrapa - GeoInfo <sup>4</sup>.

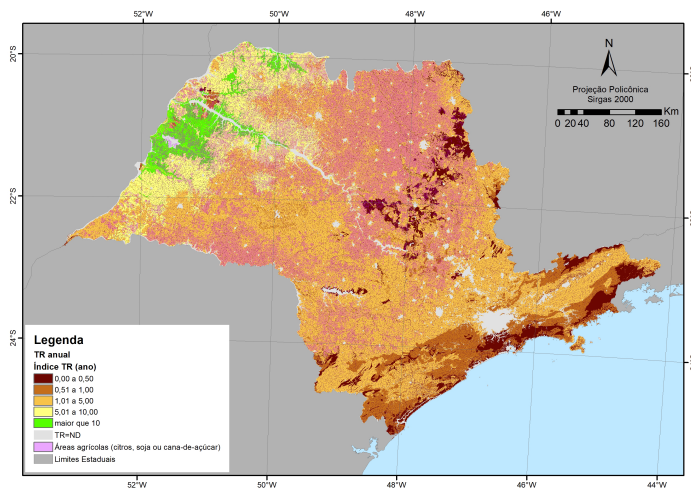
Os valores de TR para o estado de São Paulo foram calculados e as proporções do território paulista em classes de TR estão na Tabela 1.

**Tabela 1.** Proporções da área do estado de São Paulo em classes do Tempo de Retenção (TR).

Classe de TR	Proporção da Área na Classe de TR (%)
$TR \leq 0,5$ ano	13,2
$0,5 < TR \leq 1$ ano	8,3
$1 < TR \leq 5$ anos	62,7
$5 < TR \leq 10$ anos	12,1
$TR > 10$ anos	3,7

A distribuição geográfica das áreas do estado de São Paulo nas classes de TR está apresentada na Figura 1. Pode-se destacar uma área com  $TR \leq 0,5$  ano, o que representa maior vulnerabilidade de águas subterrâneas, na região centro-nordeste do estado, onde ocorrem importantes atividades agrícolas (IBGE, 2017; Garcia; Vieira Filho, 2021).

<sup>4</sup> Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#!/dataset/1721>



**Figura 1.** Distribuição de classes de vulnerabilidade à contaminação de água subterrânea, com base no Tempo de Retenção (TR), e das áreas agrícolas com citros, soja ou cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

Os resultados do cruzamento do mapeamento da cobertura e uso do solo do Brasil em 2018, do projeto MapBiomass, com as diferentes classes de vulnerabilidade à contaminação de água subterrânea, com base no TR no estado de São Paulo, são apresentados na Tabela 2. Nota-se uma área de cana-de-açúcar proporcionalmente grande na classe de TR crítico ( $TR \leq 0,5$  ano). As maiores proporções das áreas com citros e soja estão nas classes de TR maior que 1 ano e menor ou igual a 5 anos ( $1 < TR \leq 5$ ). Componentes dos cenários críticos ( $TR \leq 0,5$  ano) mais representativos para as áreas com culturas de citros, cana-de-açúcar e soja estão na Tabela 3.

**Tabela 2.** Proporções da área do estado de São Paulo nas classes de Tempo de Retenção (TR) para as culturas de citros, cana-de-açúcar e soja.

Cultura Agrícola	Proporção da Área na Classe de TR <sup>(1)</sup> (%)				
	TR ≤ 0,5	0,5 < TR ≤ 1	1 < TR ≤ 5	5 < TR ≤ 10	TR > 10
Citros <sup>(2)</sup>	7,4	0,3	86,5	5,1	0,8
Cana <sup>(3)</sup>	76,9	1,1	0,2	17,6	4,1
Soja <sup>(4)</sup>	2,9	0,4	92,5	3,7	0,6

<sup>(1)</sup>Expresso em ano(s). Cultura agrícola: <sup>(2)</sup>permanente; <sup>(3)</sup>semipermanente; <sup>(4)</sup>temporária.

**Tabela 3.** Combinações de cultura agrícola e classe de solo e representatividade dos cenários mais críticos para contaminação de água subterrânea nas áreas com culturas de citros, cana-de-açúcar e soja no estado de São Paulo, com base no Tempo de Retenção (TR).

Cultura Agrícola	Classe de Solo <sup>(1)</sup>	Representatividade <sup>(2)</sup> (%)
Citros <sup>(3)</sup>	Neossolos Quartzarênicos órticos (NQo)	4,1
Cana <sup>(4)</sup>	Neossolos Quartzarênicos órticos (NQo)	1,6
Soja <sup>(5)</sup>	Latossolos Vermelhos distróficos (LVd)	1,0

<sup>(1)</sup>Classe de solo no 3º. nível categórico (grande grupo), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018). <sup>(2)</sup>Proporção da área com TR crítico ( $TR \leq 0,5$  ano) em relação à área total da respectiva cultura agrícola no estado de São Paulo. Cultura agrícola: <sup>(3)</sup>permanente; <sup>(4)</sup>semipermanente; <sup>(5)</sup>temporária.

Com base em Almeida et al. (2021), tem-se que Neossolos Quartzarênicos ocorrem em relevo plano ou suave ondulado e apresentam textura arenosa ao longo do perfil. São solos profundos com reduzida quantidade de água disponível. A percolação de água é favorecida devido à textura essencialmente arenosa. Os teores de matéria orgânica são muito baixos, o que favorece a lixiviação de agrotóxicos. Neossolos Quartzarênicos órticos (NQo) não apresentam restrições à drenagem. Neossolos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018) são equivalentes aos Arenossolos no sistema *World Reference Base – WRB* (FAO, 2014) e aos Psamments no sistema *Soil Taxonomy* (Estados Unidos, 1999, 2014).

Como descritos por Santos e Zaroni (2021), Latossolos Vermelhos apresentam textura e estrutura uniformes em profundidade e ocorrem predominantemente em áreas de relevo plano e suave ondulado. Em menor expressão, podem ocorrer em áreas de relevo ondulado. São solos profundos e porosos ou muito porosos, com baixa quantidade de água disponível às plantas e a pouca susceptibilidade à compactação. Latossolos Vermelhos distróficos (LVd) apresentam baixa fertilidade natural. Latossolos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018) são equivalentes aos Ferralossolos no sistema *World Reference Base – WRB* (FAO, 2014) e aos Oxisols (exceto Aquox) no sistema *Soil Taxonomy* (Estados Unidos, 1999, 2014).

O lençol freático em áreas com NQo e com LVd, especialmente na época chuvosa, dependendo da posição na topografia, podem chegar temporariamente próximo da superfície do solo. As profundidades do lençol freático representativas em áreas com esses solos e culturas de citros, cana-de-açúcar e soja, determinadas pelo mé-

todo empregado, são apresentadas na Tabela 3. Os valores da recarga hídrica líquida anual, representativos nos cenários críticos, também estão na Tabela 3. Com base na série histórica, os valores médios são menores que 1 m/ano; no entanto, a recarga hídrica líquida estimada para áreas com citros e NQo chega a 1,04 m/ano.

Nas Figuras 2, 3 e 4 estão, respectivamente, os registros fotográficos de cenários críticos de cultura de citros (laranja) em NQo, de cana-de-açúcar também em NQo e de soja em LVd.



Foto: Rafael Mingoti

**Figura 2.** Registro fotográfico de cenário crítico para contaminação de água subterrânea em área com cultura de citros (laranja) em Neossolo Quatzarênico órtico (NQo).



Foto: Rafael Mingoti

**Figura 3.** Registro fotográfico de cenário crítico para contaminação de água subterrânea em área com cultura de cana-de-açúcar em Neossolo Quatzarênico órtico (NQo).



Foto: Rafael Mingoti

**Figura 4.** Registro fotográfico de cenário crítico para contaminação de água subterrânea em área com cultura de soja em Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

Com base nos resultados obtidos, são propostos os componentes de cenários críticos para avaliação e gerenciamento de riscos ambientais de agrotóxicos para água subterrânea nas áreas agrícolas com citros, cana-de-açúcar e soja no estado de São Paulo, apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4, 5 e 6. Para os cálculos de TR, assume-se que os valores das propriedades do horizonte C1 no NQo e do BA no LVd se mantêm até o topo do lençol freático.

Os dados de entrada com o menor detalhamento (menor escala cartográfica) foram obtidos a partir do mapa de solos na escala 1:750.000, classificada, segundo Santos et al. (1995), como de nível exploratório de levantamento pedológico. Resultados mais detalhados podem ser obtidos se dados de entrada em escala cartográfica maior estiverem disponíveis.

**Tabela 4.** Componentes do cenário crítico para contaminação de água subterrânea proposto para a cultura de citros no estado de São Paulo, com base no Tempo de Retenção (TR).

Q (m/ano)	L (m)	Solo					
		Classe <sup>(1)</sup>	Horizonte	Z (m)	BD (kg/m <sup>3</sup> )	OC (kg/kg) <sup>(2)</sup>	FC (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
0,46	2,17	Neossolos Quartzarênicos órticos (NQo)	A	0,57	1470	0,004	0,17
			C1	0,33	1570	0,003	0,17

Q = recarga hídrica líquida anual; L = profundidade do lençol freático; Z = espessura do horizonte; BD = densidade do solo; OC = teor de carbono orgânico; FC = capacidade de campo. <sup>(1)</sup>Classe de solo no 3º. nível categórico (grande grupo), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018). <sup>(2)</sup>Usualmente expresso em g/kg, precisa ser convertido para kg/kg para o cálculo de TR.

**Tabela 5.** Componentes do cenário crítico para contaminação de água subterrânea proposto para a cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, com base no Tempo de Retenção (TR).

Q (m/ano)	L (m)	Solo					
		Classe <sup>(1)</sup>	Horizonte	Z (m)	BD (kg/m <sup>3</sup> )	OC (kg/kg) <sup>(2)</sup>	FC (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
0,45	2,17	Neossolos Quartzarênicos órticos (NQo)	A	0,57	1470	0,004	0,17
			C1	0,33	1570	0,003	0,17

Q = recarga hídrica líquida anual; L = profundidade do lençol freático; Z = espessura do horizonte; BD = densidade do solo; OC = teor de carbono orgânico; FC = capacidade de campo. <sup>(1)</sup>Classe de solo no 3º. nível categórico (grande grupo), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018). <sup>(2)</sup>Usualmente expresso em g/kg, precisa ser convertido para kg/kg para o cálculo de TR.

**Tabela 6.** Componentes do cenário crítico para contaminação de água subterrânea proposto para a cultura de soja no estado de São Paulo, com base no Tempo de Retenção (TR).

Q (m/ano)	L (m)	Solo					
		Classe <sup>(1)</sup>	Horizonte	Z (m)	BD (kg/m <sup>3</sup> )	OC (kg/kg) <sup>(2)</sup>	FC (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
0,81	1,36	Latossolo Vermelho distrófico (LVd)	Ap	0,13	1000	0,024	0,62
			AB	0,15	1340	0,017	0,39
			BA	0,36	1200	0,013	0,50

Q = recarga hídrica líquida anual; L = profundidade do lençol freático; Z = espessura do horizonte; BD = densidade do solo; OC = teor de carbono orgânico; FC = capacidade de campo. <sup>(1)</sup>Classe de solo no 3º. nível categórico (grande grupo), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos et al., 2018). <sup>(2)</sup>Usualmente expresso em g/kg, precisa ser convertido para kg/kg para o cálculo de TR.



Os valores apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6 serão incluídos na base de dados da tecnologia ARAquá (Spadotto et al., 2009; Spadotto; Mingoti, 2014; ARAquá..., 2017), atualmente disponível na versão ARAquáWeb<sup>5</sup>.

O método apresentado utiliza dados, disponíveis previamente ou estimados pelos procedimentos descritos, provenientes de mapeamentos de solos, séries históricas de chuva e evapotranspiração e levantamentos planialtimétricos. Com esses dados e técnicas de distribuição dos mesmos na superfície terrestre são produzidos resultados georreferenciados. A profundidade do lençol freático, variável de determinação difícil e custosa, é estimada e os resultados são apresentados de modo distribuído no espaço geográfico. A compatibilização e interpretação visual de imagens de satélite permitem a delimitação das áreas com culturas permanentes, semipermanentes e temporárias. Assim, é possível a identificação dos cenários fundamentais para a tomada de decisão nos processos regulatórios e no ordenamento territorial de atividades potencialmente poluidoras.

## Conclusões

---

O método apresentado mostra-se aplicável e adequado para identificação remota de cenários críticos para contaminação de água subterrânea nas condições de escassez de dados e informações. A aplicação do Índice TR possibilita a identificação territorial em escala exploratória das áreas agrícolas mais vulneráveis à contaminação de água subterrânea no estado de São Paulo.

Os cenários críticos identificados são para as culturas de citros e cana-de-açúcar em áreas com Neossolos Quartzarênicos órticos (NQo) e para a cultura de soja em Latossolo Vermelho distrófico (LVd). Esses cenários podem ser utilizados na avaliação e no gerenciamento de riscos ambientais de agrotóxicos.

O método, inicialmente desenvolvido para o estado de São Paulo, pode ser aplicado a outras regiões do País, com os devidos ajustes. Como ocorre

---

<sup>5</sup> Disponível em: <http://sistemas-novo.sede.embrapa.br/AraquaWeb>.

a dependência espacial dos dados, trabalhos em escalas mais detalhadas (escalas cartográficas maiores) fornecem mais informações dos diferentes cenários.

É importante ressaltar que em áreas agrícolas as propriedades do solo que compõem os cenários são alteradas, especialmente na camada superficial, e o grau de alteração varia com o tipo de solo e o manejo adotado.

## Agradecimentos

---

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

## Referências

---

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019**: informe anual. Brasília, DF, 2019. Disponível em: [http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura\\_informe\\_anual\\_2019-versao\\_web-0212-1.pdf](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_anual_2019-versao_web-0212-1.pdf). Acesso em: 15 ago. 2023.
- ALMEIDA, E. de P. C.; ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. dos. Neossolos quartzarênicos. In: ZARONI, M. J. (ed). **Árvore do conhecimento: solos tropicais**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos/neossolo-quartzarenicos>. Acesso em: 6 jun. 2023.
- ALVARES, C. A.; MATTOS, E. M. de; SENTELHAS, P. C.; MIRANDA, A. C.; STAPE, J. L. Modeling temporal and spatial variability of leaf wetness duration in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 120, n. 3-4, p. 455-467, May 2015. DOI: [10.1007/s00704-014-1182-3](https://doi.org/10.1007/s00704-014-1182-3).
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: [10.1127/0941-2948/2013/0507](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507).
- AMORIM, R. S. S. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras**. 2004. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D. da.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. de. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1046-1049, dez. 2010. DOI: [10.1590/S0100-6916201000600006](https://doi.org/10.1590/S0100-6916201000600006).
- 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: 12 jun. 2023.
- CARBO, L.; SOUZA, V.; DORES, E. F. G. C.; RIBEIRO, M. L. Determination of pesticides multiresidues in shallow groundwater in a cotton-growing region of Mato Grosso, Brazil.

**Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 19, n. 6, p. 1111-1117, 2008. DOI: [10.1590/S0103-50532008000600009](https://doi.org/10.1590/S0103-50532008000600009).

DAVIDSON, J. M.; REICK, C. E.; SANTELMAN, P. W. Influence of water flux and porous materials on the movement of selected herbicides. **Soil Science Society America Journal**, v. 32, n. 5, p. 629–633, Sept./Oct. 1968. DOI: [10.2136/sssaj1968.03615995003200050017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200050017x).

DORES, E. F. G. C.; CARBO, L.; RIBEIRO, M. L.; DE-LAMONICA-FREIRE, E. M. Pesticide levels in ground and surface waters of Primavera do Leste Region, Mato Grosso, Brazil. **Journal of Chromatographic Science**, v. 46, n. 7, p. 585-90, Aug. 2008. DOI: [10.1093/chromsci/46.7.585](https://doi.org/10.1093/chromsci/46.7.585).

DORES, E. F. G. C.; NAVICKIENE, S.; CUNHA, M. L. F.; CARBO, L.; RIBEIRO, M. L.; DE-LAMONICA-FREIRE, E. M. Multiresidue determination of herbicides in environmental waters from Primavera do Leste Region (Middle West of Brazil) by SPE-GC-NPD. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 17, n. 5, p. 866-873, Oct. 2006. DOI: [10.1590/S0103-50532006000500008](https://doi.org/10.1590/S0103-50532006000500008).

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington, DC: USDA, 2014.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Soil taxonomy**: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2. ed. Washington, DC: USDA, 1999. (Agriculture handbook, n. 436).

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Guidelines for ecological risk assessment**. Washington, DC, 1998. EPA/630/R095/002F. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/eco\\_risk\\_assessment1998.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/eco_risk_assessment1998.pdf). Acesso em: 6 jun. 2023.

FAO. **World reference base for soil resources 2014**: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome, 2014. (World soil resources reports, 106). Update 2015.

GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. A nova geografia da agropecuária brasileira e os desafios logísticos. **Confins**, n. 50, 2021. DOI: [10.4000/confins.37395](https://doi.org/10.4000/confins.37395).

GRASSI, M. T. As águas do planeta Terra. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, maio 2001, p. 31-40, 2001. Edição especial. Disponível em: <http://qnesc.sbg.org.br/online/cadernos/01/aguas.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017**: resultados definitivos. [2017]. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em: 1 jul. 2023.

MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. de C. Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro.

**Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1252–1260, 2016. DOI: [10.1590/S0100-204X2016000900025](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900025).

NAIME, J. de M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Determinações físicas do solo a partir da granulometria: programa Qualisolo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju. Novos desafios do carbono no manejo conservacionista. **Resumos [...]** Aracaju: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 1 CD-ROM.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height above the nearest drainage: a hydrologically relevant

new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, June 2011. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.03.051](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051).

NOGUEIRA, E. N.; DORES, E. F. G. C.; PINTO, A. A.; AMORIM, R. S. S.; RIBEIRO, M. L.; LOURENCETTI, C. Currently used pesticides in water matrices in Central-Western Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 8, p. 1476-1487, Aug. 2012. DOI: [10.1590/S0103-50532012005000008](https://doi.org/10.1590/S0103-50532012005000008).

OLIVEIRA, J. B. de. **Solos do estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. (IAC. Boletim científico, 45).

OLIVEIRA, J. B. de; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 1999. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/336272>. Acesso em: 16 ago. 2023.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 5.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/download>. Acesso em: 28 fev. 2020.

RAO, P. S. C.; HORNSBY, A. G.; JESSUP, R. E. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. **Proceedings of the Soil and Crop Science Society of Florida**, v. 44, p. 1-8, 1985.

REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (org.). **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras, 1999.

SANTOS, H. G. dos; HOCHMÜLLER, D. P.; CAVALCANTI, A. C.; RÊGO, R. S.; KER, J. C.; PANOSO, L. A.; AMARAL, J. A. M. do. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 108 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/330133/procedimentos-normativos-de-levantamentos-pedologicos>. Acesso em: 25 out. 2023.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. ver. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2023.

SANTOS, H. G. dos; ZARONI, M. J. Latossolos vermelhos. In: ZARONI, M. J. (ed). **Árvore do Conhecimento**: solos tropicais. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-vermelhos>. Acesso em: 6 jun. 2023.

SANTOS, M. M. dos. **Avaliação de risco ambiental de agrotóxicos no Ibama**: avaliação de risco e a avaliação ambiental como requisito para o registro de agrotóxico. 2012. Disponível em: [www.ibama.gov.br/phocadownload/agrotoxicos/avaliacao/2017/2017-07-25-avaliacao\\_risco\\_ibama\\_agrotoxicos\\_ibama\\_2012-ARA.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/agrotoxicos/avaliacao/2017/2017-07-25-avaliacao_risco_ibama_agrotoxicos_ibama_2012-ARA.pdf). Acesso em: 6 jun. 2023.

SCORZA JÚNIOR, R. P.; NÉVOLA, F. A.; AYELO, V. S. **ACHA**: avaliação da contaminação hídrica por agrotóxico. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2010. 31 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Embrapa Agropecuária Oeste, 58). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/880316>. Acesso em: 16 ago. 2023.

SOUZA, V.; CARBO, L.; DORES, E. F. G. C.; RIBEIRO, M. L.; VECCHIATO, A. B.; WEBER, O. L. S.; PINTO, A. A.; SPADOTTO, C. A.; CUNHA, M. L. F. Determinação de pesticidas em água de poços tubulares em áreas de cultura de algodão na microrregião de Primavera do Leste, Mato Grosso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004,

Cuiabá. **Anais** [...]. Cuiabá: ABAS, 2004. 1 CD-ROM. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1081452>. Acesso em: 16 ago. 2023.

SOUZA JÚNIOR, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W. de; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, Sept. 2020. DOI: [10.3390/rs12172735](https://doi.org/10.3390/rs12172735).

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. 2023.

SPADOTTO, C. A. **Índice de vulnerabilidade de água subterrânea à contaminação - VIX**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2014, 3 p. (Embrapa Gestão Territorial. Comunicado técnico, 2). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1003510>. Acesso em: 16 ago. 2023.

SPADOTTO, C. A.; GOMES, M. A. F. Resíduos de agroquímicos no ambiente. In: SPADOTTO, C. A.; RIBEIRO, W. C. (ed.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, 2006. p. 302-319. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1024079>. Acesso em: 16 ago. 2023.

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).

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. 2023.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 327-338, Jan. 2000. DOI: [10.2136/sssaj2000.641327x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641327x).

VAN DER LINDEN, T.; TIKTAK, A.; BOESTEN, J.; KRUIJNE, R. Comparison of GeoPEARL with the single scenario approach in pesticide registration. In: SYMPOSIUM PESTICIDE CHEMISTRY, 12., 2003, Piacenza. **Pesticides in air, plants, soil & water system**: proceedings. Pavia: La Goliardica Pavese, 2003. p. 499-506. Editores: Attilio A. Del Re, Ettore Capri, Laura Padovani.

**Embrapa**  

---

**Agricultura Digital**

MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA E  
PECUÁRIA

