

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA MOBILIDADE E MECANISMOS DE RETENÇÃO DE PESTICIDAS EM SEDIMENTOS ALUVIAIS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES REDOX

P. H. B. Frigo¹, S. Khaska², C. Le Gal La Salle³

¹Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul.

²Université de Nîmes(UNÎMES), Nîmes, França.

³ Université de Nîmes(UNÎMES), Nîmes, França.

PALAVRAS-CHAVE: Micropoluentes. Pesticidas. Coluna de meio poroso.

ÁREA TEMÁTICA: Ciências Ambientais / Pesticidas

DOI: 10.47094/IIICOBRAP.2026/RE/7

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a contaminação de águas subterrâneas e superficiais por micropoluentes orgânicos tornou-se um desafio global no gerenciamento de recursos hídricos. No contexto agrícola, o cultivo intensivo de commodities como soja, milho e arroz irrigado demanda o emprego em larga escala de pesticidas, destacando-se compostos como 2,4-D, atrazina, glifosato e tebuconazol. A passagem desses contaminantes através da zona não saturada em direção aos aquíferos aluviais é governada pela interação dinâmica entre a advecção-dispersão e os processos de sorção, dessorção e degradação biótica na matriz porosa.

Enquanto pesticidas não polares têm seu transporte retido prioritariamente por partição na matéria orgânica, compostos polares e iônicos exibem forte dependência de sítios minerais específicos, como os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Contudo, oscilações no potencial de oxirredução (redox) do subsolo — frequentes em solos de várzea e zonas de infiltração ripária — podem induzir a dissolução redutiva de fases minerais e alterar criticamente os coeficientes de distribuição do contaminante, podendo transformar horizontes do solo em fontes secundárias de poluição.

OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a mobilidade, o retardo hidrodinâmico e a recuperação de massa de uma série de pesticidas agrícolas em sedimentos aluviais saturados do sítio de Comps (França), sob diferentes regimes biogeoquímicos e redox.

METODOLOGIA

A pesquisa enquadra-se como um estudo experimental, quantitativo e aplicado. O meio poroso foi composto por uma mistura homogênea de de sedimento aluvial de Comps (fração , rica em goethita e matéria orgânica) e de areia de quartzo purificada. A solução aquosa foi formulada para mimetizar a hidroquímica regional (pH ; força iônica controlada).

O aparato experimental utilizou colunas concêntricas de acrílico com tubo interno de vidro de de altura ativa e de diâmetro interno, preenchidas sob fluxo ascendente para garantir a saturação completa do meio poroso (, porosidade). A vazão constante foi mantida por bomba peristáltica de alta precisão.

O protocolo experimental abrangeu três fases com base no Volume de Poros (): (i) pré-condicionamento da coluna (); (ii) injeção do pulso (, de a) de água sintética fortificada com traçador conservativo (,) e o coquetel de pesticidas (); e (iii) eluição com solução isenta de analitos (, de a).

Quatro condições biogeoquímicas em duplicata foram testadas: (i) **Branco**: Coluna de areia de quartzo pura para controle hidráulico; (ii) **Óxica**: Solução de alimentação aeróbia mantida sob saturação de ; (iii) **Anóxica**: Sistema desoxigenado mediante borbulhamento contínuo de ; e (iv) **Abiótica**: Matriz e soluções autoclavada, eliminando a influência biológica no sistema.

As amostras do efluente foram coletadas em fracionador automático e quantificadas por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência acoplada à Espectrometria de Massas em Sequência (LC-MS/MS).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração hidráulica do sistema via curva de avanço (*Breakthrough Curve* - BTC) do traçador conservativo () confirmou a saturação total, ausência de canais preferenciais e simetria de fluxo, atingindo o patamar estacionário () na coluna controle (condição **Branco**). A modelagem do transporte baseou-se na Equação de Advecção-Dispersão Unidimensional acoplada ao Fator de Retardo ().

Tabela 1: Propriedades físico-químicas e parâmetros de transporte dos compostos testados nas colunas de sedimento.

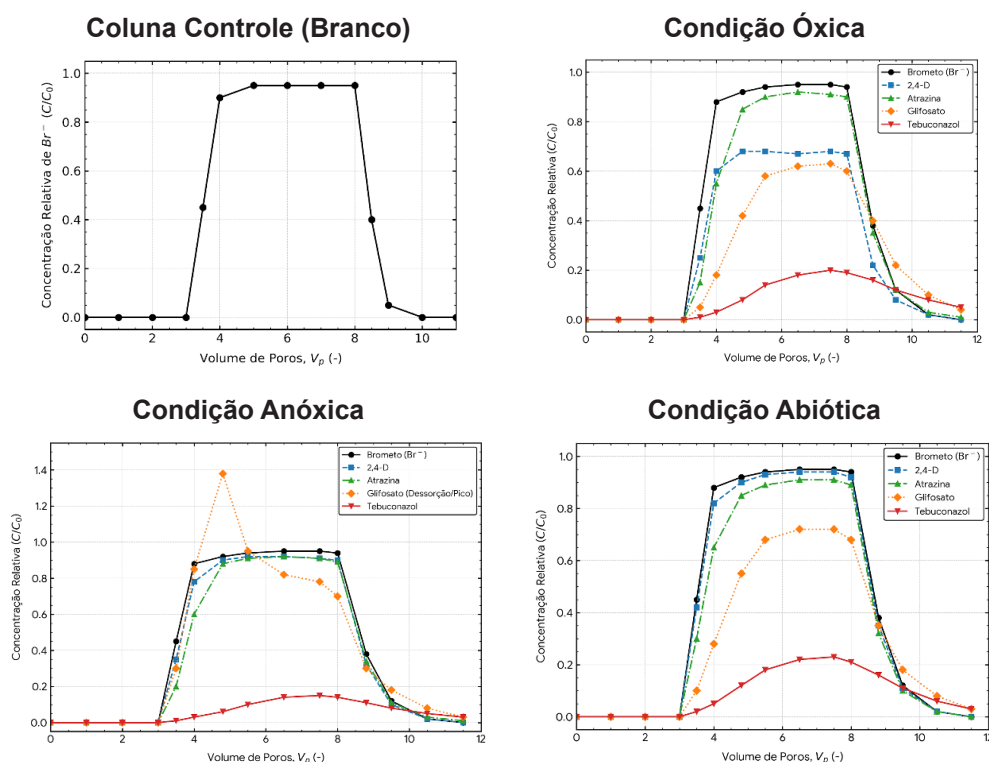
Condição Redox	Composto	Fator de Retardo (Rf)	Kd Calculado (L/kg)	Recuperação de Massa (%)	Mecanismo Principal Observado
Óxica	Brometo	1,00	0,00	99,2%	Transporte Hidrodinâmico Conservativo
Óxica	2,4-D	1,08	0,02	68,5%	Advecção com Biodegradação Aeróbia
Óxica	Atrazina	1,32	0,09	94,1%	Sorção Fraca e Reversível
Óxica	Glifosato	2,45	0,41	82,0%	Retenção por Oxi-hidróxidos de Fe/Al
Óxica	Tebuconazol	4,20	0,91	38,4%	Sorção Hidrofóbica na Matéria Orgânica
Anóxica	Glifosato	Variável (Pico)	-	138,2%	Dessorção por Redução de Fe(III) ("Flush")
Anóxica	2,4-D	1,12	0,03	92,7%	Maior Persistência
Abiótica	Tebuconazol	4,15	0,89	89,6%	Partição Hidrofóbica Pura em Equilíbrio

Fonte: Dados da pesquisa (2026)

A análise comparativa das curvas de avanço (Figura 1) revela a forte influência do regime biogeoquímico no comportamento dos pesticidas:

- **Coluna Controle (Branco):** O brometo exibiu avanço ideal, estabelecendo a base para o comportamento conservativo.
- **Condição Óxica (Aeróbia):** A atrazina demonstrou alta mobilidade (). O 2,4-D apresentou retardo mínimo (), porém com redução na recuperação total (), atribuída à biodegradação por microbiota aeróbia nativa. O tebuconazol sofreu retenção severa () devido à sua alta hidrofobicidade ().
- **Condição Anóxica (Redutora):** A inibição das vias aeróbias aumentou a persistência do 2,4-D e da atrazina. Para o glifosato, a atividade de bactérias redutoras de ferro () dissolveu os oxi-hidróxidos minerais do sedimento. O colapso dos sítios de complexação causou a remobilização imediata do glifosato acumulado, gerando um pico transiente de desabsorção massiva (em) e taxa de recuperação de .
- **Condição Abiótica:** O ordenamento de retardo seguiu estritamente a afinidade pelo carbono orgânico (), confirmando o equilíbrio puramente físico-químico na ausência de ação biológica.

Figura 1: Curvas de avanço dos pesticidas



Fonte: Autores (2026)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo experimental em colunas saturadas permitiu delimitar com precisão os mecanismos de transporte dos principais pesticidas agrícolas atuais na matriz de Comps. Enquanto pesticidas solúveis (atrazina e 2,4-D) apresentam risco de contaminação direta por transporte advectivo rápido, compostos com forte complexação mineral (glifosato) constituem um risco ambiental latente.

A transição para condições anóxicas desestabilizou as superfícies minerais do sedimento, promovendo o efeito de remobilização pulsátil (“flush”). Tais achados comprovam a relevância de se incorporar dinâmicas redox na modelagem de vulnerabilidade de aquíferos e embasam a solicitação de fomento para a continuidade e expansão deste projeto de pesquisa.

PRINCIPAIS REFERÊNCIAS

BANZHAF, S.; HEBIG, K. **Use of column experiments to investigate the fate of organic micropollutants – a review.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, p. 3719-3737, 2016.

UNIVERSITÉ DE NÎMES. CHROME Laboratory. **Soil Self-Purification Capacity for Organic Micropollutants: An Experimental Investigation.** Version 1.3. Nîmes, França: UNIMES, 2025.