

**MONITORAMENTO AMBIENTAL
DE AGROTÓXICOS E PFOS:**
RELATÓRIO PRELIMINAR PARA DIRETRIZES
E ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO DA
CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL.



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente

Luiz Inácio Lula da Silva

VICE-PRESIDENTE

Geraldo Alckmin

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA

Ministra

Marina Silva

SECRETARIA EXECUTIVA

Secretário-Executivo

João Paulo Capobianco

SECRETARIA NACIONAL DE MEIO AMBIENTE URBANO, RECURSOS HÍDRICOS E QUALIDADE AMBIENTAL

Secretário

Adalberto Felício Maluf Filho

DEPARTAMENTO DE QUALIDADE AMBIENTAL

Diretora

Thiianne Resende Henriques Fábio

COORDENAÇÃO GERAL

Thiianne Resende Henriques Fábio

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Camila Arruda Boechat

© 2024 Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima – MMA
Permitida a reprodução sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio, se citados a fonte do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima ou sítio da Internet no qual pode ser encontrado o original em: <http://www.mma.gov.br/publicacoes-mma>

EQUIPE TÉCNICA MMA

Daniel Lopes Rossi

Marília Passos Torres de Almeida

ESTAGIÁRIOS

Marcela Silva Vilela Siqueira

José Ramon de Almeida Gonçalves

COORDENADOR

Robson Barizon. Pesquisador. Dinâmica Ambiental de Contaminantes - EMBRAPA

AUTORES/CONSULTORES EMBRAPA

Anderson Soares Pereira. Pesquisador. Hidrometeorologia

Debora Renata Cassoli de Souza Dutra. Analista. Laboratório de Resíduos e Contaminantes.

Maria Aparecida Rosa. Analista. Laboratório de Resíduos e Contaminantes.

Márcia Assalin. Analista. Laboratório de Resíduos e Contaminantes.

José Tadeu Lana. Analista. Laboratório de Geotecnologias

Alexandre Ortega Gonçalves. Pesquisador. Hidrologia

Fábio Kummrow. Professor UNIFESP. Ecotoxicologia

Yago Guida. Pesquisador Associado. Química Ambiental

Dimaghi Schwamback. Pesquisador Associado. Hidrologia

Ricardo Pazianotto. Analista. Ciência de dados.

INFORMAÇÕES TÉCNICAS

O presente Plano Nacional de Implementação do Brasil para a Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes foi desenvolvido com base na revisão e atualização dos inventários dos POPs desenvolvidos até 2015 e nos novos inventários desenvolvidos para os POPs listados entre 2015 e 2024.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS DO PROJETO.....	6
3. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E RESULTADOS PRELIMINARES	7
i) EXPANDIR O MONITORAMENTO AMBIENTAL DO PFOS	7
ii) AMPLIAR O PROGRAMA PILOTO DE MONITORAMENTO DE AGROTÓXICOS EM RECURSOS HÍDRICOS	9
SELEÇÃO DE COMPOSTOS A SEREM MONITORADOS	9
iii) INVESTIGAR PROCESSOS DE TRANSPORTE RELACIONADOS À CONTAMINAÇÃO DE CORPOS D'ÁGUA.....	10
ÁREA 1: MICROBACIAS DE ITAÍ	10
ÁREA 2: RIBEIRÃO DA ONÇA.....	11
SELEÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS	13
4. ATIVIDADES PREVISTAS.....	14
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16

LISTA DE TABELAS, QUADROS e FIGURAS

Tabela 1 - Descrição morfométrica das microbacias ITA-1 e ita-2. Fonte: Sabino et al. (2020)	11
Quadro 1 - Sumário de potencialidades e limitações dos diferentes modelos para simulação do transporte de pesticidas.....	13
Figura 1- Relação das Microbacias do Brasil.....	8
Figura 2 - Estações Hidrometeorológicas (ANA), Fluviométricas (CPRM) e estações da CETESB, respectivamente	9
Figura 3 - Mapa de localização da microbacia de ITA-1. Fonte: Autores.	10
Figura 4 - Mapa de localização da microbacia de ITA-2. Fonte: Autores.	11
Figura 5 - Mapa de localização da bacia do Ribeirão da Onça. Fonte: Autores.	12
Figura 6 - Mapa de Uso do Solo. Fonte: MapBiomass	13

1. INTRODUÇÃO

O presente projeto tem como objetivo principal gerar informações sistematizadas e qualificadas sobre a contaminação ambiental por agrotóxicos e Fluoreto de Perfluorooctano sulfonila (PFOS) no Brasil. Os PFOs são um tipo de substância química, usados em muitos produtos do dia a dia, porém são considerados muito persistentes no meio ambiente e no corpo humano, causando problemas de saúde. Essas informações são essenciais para subsidiar a formulação e implementação de políticas públicas voltadas para a conservação ambiental e a segurança hídrica no país. A iniciativa é liderada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Meio Ambiente), em colaboração com o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), e conta com o suporte técnico e logístico de diversas instituições parceiras, como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o Serviço Geológico Brasileiro (SGB), entre outras.

A justificativa do projeto parte da necessidade urgente de preencher lacunas significativas de dados sobre a presença e o transporte de contaminantes em ambientes agrícolas e recursos hídricos no Brasil. Além das informações sobre contaminantes, de forma ampla, são necessárias informações sobre agrotóxicos e Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs). Os POPs são substâncias químicas que possuem uma alta resistência à degradação ambiental. Isso significa que eles podem persistir no ambiente por longos períodos, acumulando-se nos tecidos dos organismos vivos e se biomagnificando ao longo das cadeias alimentares.

Além disso, são conhecidos por seus efeitos tóxicos, que podem incluir problemas de saúde como cânceres, distúrbios hormonais, e danos ao sistema nervoso e imunológico, fetotoxicidade e mutagenicidade. Devido a esses riscos, muitos POPs são regulados internacionalmente pela Convenção de Estocolmo sobre POPs, que visa reduzir e eliminar a produção, uso e liberação desses poluentes. O Brasil é um dos países signatários dessa convenção, tendo ratificado o tratado em 2004, e implementado por meio do Decreto nº 5.472/2005.

O Departamento de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (DQA/MMA), é ponto focal nacional para a Convenção de Estocolmo sobre POPs e outros tratados internacionais relacionados à gestão de substâncias químicas e seus resíduos. O Plano Nacional de Implementação do Brasil para a Convenção de Estocolmo sobre POPs, cuja elaboração foi coordenada pelo DQA/MMA que tem como objetivos:

- 1) Cumprir as obrigações decorrentes da Convenção de Estocolmo;
- 2) Reduzir os riscos causados por POPs ao meio ambiente e à saúde humana.
- 3) Aumentar a conscientização pública e educar o público sobre POPs e tratados internacionais relacionados;
- 5) Contribuir para melhorar a gestão de substâncias químicas no Brasil;
- 6) Conscientizar a população sobre a problemática dos POPs; e
- 7) Identificar e aplicar ações sinérgicas com planos nacionais relacionados.

2. OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo geral da presente proposta consiste na geração de informações sistematizadas e qualificadas sobre a contaminação ambiental por agrotóxicos, visando subsidiar a implementação e execução de políticas públicas voltadas a esse tema no Brasil. Para tanto, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- I. Expandir o monitoramento ambiental do PFOS: além de confirmar os resultados anteriores acerca da formação do PFOS pela biodegradação da sulfluramida, o objetivo desta ação é expandir o monitoramento do PFOS para regiões brasileiras com uso expressivo dessa substância, como os estados de Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul. Também está prevista a avaliação da contaminação ambiental por PFOS em escala de propriedade rural, aprofundando análises não contempladas anteriormente.
- II. Ampliar o Programa Piloto de Monitoramento de Agrotóxicos em Recursos Hídricos: o segundo eixo de ação visa expandir e fortalecer o programa piloto de monitoramento de agrotóxicos que está sendo executado pela Embrapa Meio Ambiente. Esta expansão é planejada para um período de três anos e inclui a análise de moléculas listadas nas Convenções de Estocolmo e Roterdã, enriquecendo assim o leque de substâncias analisadas e aumentando o escopo do monitoramento atual,
- III. Investigar Processos de Transporte Relacionados à Contaminação de Corpos d'Água: O terceiro objetivo está focado no estudo dos processos de transporte que levam à contaminação ambiental por agrotóxicos em áreas com práticas agrícolas descritas como sustentáveis. Considerando os riscos ambientais à organismos aquáticos, o intuito é identificar os processos de transporte mais impactantes em condições tropicais, uma área pouco explorada na literatura. Os resultados dessas investigações poderão orientar futuras políticas públicas, reduzindo riscos em ambientes tropicais como no caso do Brasil.

O primeiro eixo envolve a expansão do monitoramento ambiental de PFOS para novas áreas de interesse com representatividade do uso de iscas formicidas com foco especial no estado do Mato Grosso do Sul, onde o uso de iscas formicidas à base de sulfluramida é expressivo. Neste estado, até o momento, foram realizadas coletas de água superficial, sedimentos e amostras biológicas em diversas microbacias hidrográficas, visando determinar as concentrações de PFOS e seus precursores N-etil perfluorooctano sulfonamida (EtFOSA), Perfluorooctano sulfonamida (FOSA), perfluorooctano sulfonamidoacético ácido (FOSAA). Em colaboração com o projeto "Bandeiras e Rodovias", amostras de tecidos de tamanduás, organismos sentinelas para bioacumulação de PFOS, também estão sendo analisadas para identificar padrões de contaminação e bioacumulação. O segundo eixo de ação busca fortalecer o Programa Piloto de Monitoramento de Agrotóxicos, ampliando a abrangência de substâncias monitoradas para incluir moléculas listadas nas Convenções de Estocolmo e

Roterdã. Foram definidos 63 pontos de coleta distribuídos em todo o território brasileiro, considerando a representatividade das culturas agrícolas e a vulnerabilidade ambiental das bacias hidrográficas. No entanto, desafios logísticos para o envio de amostras aos laboratórios da Embrapa Meio Ambiente foram identificados, levando à implementação de medidas corretivas, como testes de degradação dos compostos e uma possível mudança de parceria para coleta e transporte das amostras, atualmente em discussão com a ANA.

O terceiro eixo concentra-se na investigação dos processos de transporte de contaminantes em áreas com práticas agrícolas descritas como sustentáveis. Para isso, duas áreas piloto foram selecionadas: as microbacias de Itaipu (ITA-1 e ITA-2) e a bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, no estado de São Paulo. Nessas regiões, estão sendo realizadas modelagens hidrológicas para simular o transporte de pesticidas em diferentes cenários de uso do solo. Diversos modelos hidrológicos, como SWAT e MIKE SHE, estão sendo analisados para selecionar a ferramenta mais apropriada ao estudo das condições tropicais. As simulações se concentrarão na avaliação do papel dos carregadores e caminhos preferenciais no transporte de pesticidas, proporcionando uma compreensão mais profunda dos fatores que afetam a mobilidade dos contaminantes.

3. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E RESULTADOS PRELIMINARES

i) EXPANDIR O MONITORAMENTO AMBIENTAL DO PFOS

Para ampliar o entendimento sobre a ocorrência de PFOS no meio ambiente, foi realizado um levantamento em áreas de reflorestamento nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul. Esses estados foram escolhidos pela relevância de suas florestas plantadas. O Mato Grosso do Sul recebeu um monitoramento mais detalhado em função de uma parceria estabelecida com a ONG Bandeiras e Rodovias, incluindo análises de matrizes abióticas e bióticas.

As oito microbacias selecionadas em São Paulo para o projeto piloto sobre a ocorrência de PFOS foram mantidas. Além disso, foram identificadas 26 áreas potenciais de coleta de água superficial nos estados de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul. A delimitação das microbacias foi realizada com a extensão ArcSWAT para o ArcGIS, utilizando o modelo digital de elevação do SRTM.



Figura 11- Relação das Microbacias do Brasil

São Paulo: PF-2, PF-3, PF-4, PF-5, PF-6, PF-7 e PF-8

Mato Grosso do Sul: "MS-01, MS-02, MS-03, MS-04, MS-05, MS-06, MS-07, MS-08, MS-09, MS-10 e MS-11"

Minas Gerais: "MG-02, MG-03, MG-04 e MG-05"

Rio Grande do Sul: "RS-01, RS-02, RS-04, RS-05 e RS-06"

Bahia: "BA-01, BA-02, BA-03 e BA-04"

O projeto de conservação "Bandeiras e Rodovias" está colaborando na coleta de material biológico de tamanduás vivos e mortos no Mato Grosso do Sul para monitorar a bioacumulação de PFOS, um composto tóxico resultante da degradação da sulfluramida usada em iscas formicidas. Os tamanduás são escolhidos como organismos sentinelas devido à sua dieta predominantemente composta por formigas e cupins, principais alvos das iscas. Aproximadamente 60 amostras de soro sanguíneo de tamanduás vivos e 40 amostras de fígado de tamanduás mortos foram enviadas para a Universidade de Farmácia de Daiichi, no Japão, onde foram analisadas. Já é possível determinar a presença de PFOS nestas amostras. Os dados estão sendo processados para posterior divulgação. Além disso, um estudo piloto na Embrapa Meio Ambiente de Jaguariúna está avaliando a eficácia das iscas formicidas e a

presença de PFOS em solos de formigueiro, utilizando cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas para garantir precisão nos resultados. Uma revisão literária foi realizada para otimizar os métodos de detecção de PFOS, incluindo etapas de extração e purificação com técnicas de extração em fase sólida (SPE) e quantificação por meio de padrões internos e curvas de calibração, assegurando a precisão e acurácia dos resultados.

ii) **AMPLIAR O PROGRAMA PILOTO DE MONITORAMENTO DE AGROTÓXICOS EM RECURSOS HÍDRICOS**

O projeto de monitoramento de agrotóxicos em recursos hídricos visa fortalecer a parceria iniciativa estabelecida entre a Embrapa e o MAPA, onde foi iniciado um programa piloto de monitoramento de agrotóxicos, ampliando o número de substâncias monitoradas, incluindo aquelas listadas nas Convenções de Roterdã e Estocolmo, e incluindo também agrotóxicos em sedimentos. Foram selecionados 63 pontos de coleta em todo o Brasil, com base na relevância agrícola de cada estado e nas principais culturas de cada região. Cada ponto foi acompanhado de uma caracterização da bacia hidrográfica, considerando uso da terra, solo e vulnerabilidade à erosão. A coleta das amostras de água superficial é realizada em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), aproveitando sua infraestrutura da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR). As amostras são analisadas nos laboratórios da Embrapa Meio Ambiente.



Figura 22 - Estações Hidrometeorológicas (ANA), Fluviométricas (CPRM) e estações da CETESB, respectivamente

SELEÇÃO DE COMPOSTOS A SEREM MONITORADOS

Atualmente, os laboratórios da Embrapa Meio Ambiente possuem métodos validados para quantificar 46 ingredientes ativos de agrotóxicos e seus metabólitos em água, e 25 em sedimentos, além de métodos específicos para glifosato e seus metabólitos. Para expandir o monitoramento, foram selecionadas novas moléculas com base no volume de vendas, propriedades físico-químicas e prioridades do Plano Nacional de Implementação da Convenção de Estocolmo. POPs de baixa relevância foram considerados irrelevantes para futuros monitoramentos.

Dos 100 ingredientes ativos mais vendidos no Brasil nos últimos cinco anos, 38 foram identificados para monitoramento preferencial em sedimento ($\text{Log Kow} \geq 3$), ou seja, logaritmo do coeficiente de partição octanol-água maior ou igual a 3. Destes, 14 estão incluídos no método validado na Embrapa Meio Ambiente, e 24 novos ingredientes ativos estão sendo considerados para inclusão no monitoramento em sedimentos, dependendo da

viabilidade analítica e disponibilidade de padrões. Compostos adicionais, como alguns piretróides, também estão sendo considerados devido ao seu potencial toxicológico e ocorrência ambiental conhecida.

Além disso, foram selecionadas 20 moléculas de POPs e seus compostos relacionados, considerados relevantes no contexto nacional para futuras ações do Plano Nacional de Implementação da Convenção de Estocolmo. Esses incluem DDT e seus derivados, HCH (lindano e isômeros), Methoxychlor, Pentachlorophenol (PCP) e seus derivados, Mirex, HCB, endosulfan e seus derivados, e Dicofol. Como todos possuem Log Kow > 3 e seus usos estão proibidos no Brasil há anos, serão monitorados apenas em sedimentos.

iii) INVESTIGAR PROCESSOS DE TRANSPORTE RELACIONADOS À CONTAMINAÇÃO DE CORPOS D'ÁGUA

O uso intensivo de agrotóxicos pode contaminar recursos hídricos superficiais e subterrâneos, afetando a saúde ambiental e humana. Monitorar essas substâncias em áreas estratégicas é essencial para identificar riscos de poluição, entender os processos de degradação e transporte dos contaminantes, e desenvolver políticas de manejo sustentável.

Duas áreas de monitoramento foram identificadas no estado de São Paulo devido à sua susceptibilidade à contaminação por agrotóxicos e à necessidade de conservação da qualidade dos recursos hídricos:

Essas áreas foram escolhidas por sua importância hidrogeológica e a necessidade de preservar a qualidade da água.

ÁREA 1: MICROBACIAS DE ITAÍ

A área 1 é composta por duas microbacias: ITA-1 e ITA-2. Ambas as bacias localizadas na região Centro-Oeste do estado de São Paulo. A ITA-1 possui 0,74 km² de área de drenagem e 686 m de caminho médio de transporte de sedimentos, enquanto a ITA-2 possui 0,47 km² e 547m, respectivamente. Maiores detalhes quanto a morfologia dessas duas bacias é apresentada na Tabela 1 e nas descrições abaixo.

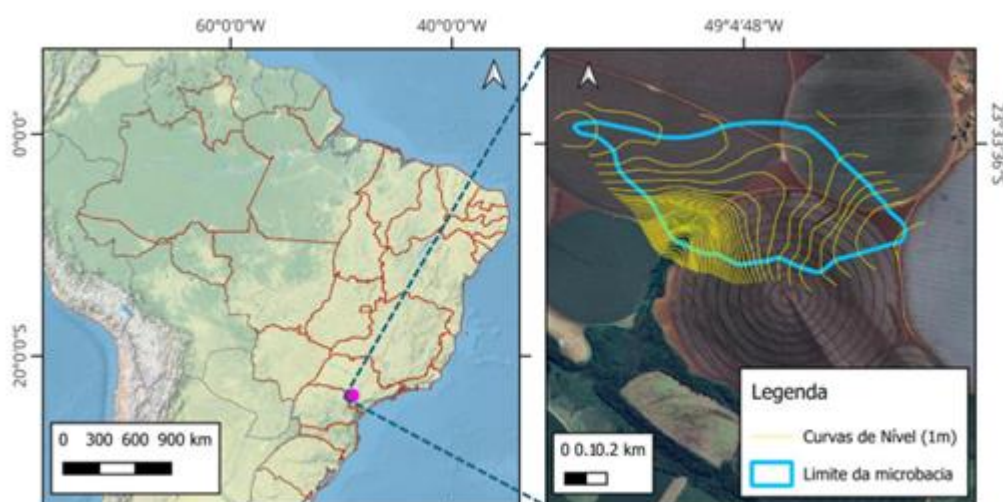


Figura 33 - Mapa de localização da microbacia de ITA-1. Fonte: Autores.

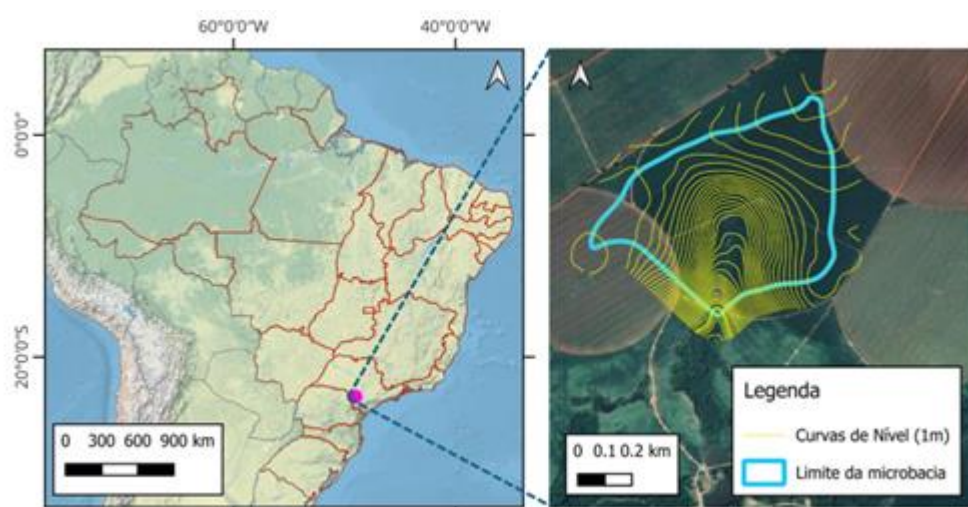


Figura 44 - Mapa de localização da microbacia de ITA-2. Fonte: Autores.

Bacia	Altitude (m)	Declividade média (%)	Área (km ²)	P (km)	CC	IC	FF	L (m)
ITA-1	613 - 647	2,3%	0,74	3,88	1,3	0,6	0,2	686
ITA-2	672 - 710	4,2%	0,47	2,84	1,2	0,7	0,5	547

Onde: P, perímetro; CC, coeficiente de compacidade; IC, índice de circularidade; FF, fator de forma conforme Villela; Mattos (1975), L, caminho médio dos sedimentos.

Tabela 11 - Descrição morfométrica das microbacias ITA-1 e ita-2. Fonte: Sabino et al. (2020)

A região do estudo possui um clima subtropical úmido (Cwa, segundo Köppen), com precipitação média anual de 1346,2 mm, concentrada no verão. Os solos das microbacias ITA-1 e ITA-2 são classificados como Latossolo Vermelho Distrófico, com texturas variando de argilosa a muito argilosa.

A principal atividade agrícola é a produção de grãos (feijão, milho, soja e trigo) e culturas anuais como o algodão, com destaque para a irrigação por pivôs centrais, que cobre 13.840 hectares. Essa prática agrícola intensiva facilita o transporte de agrotóxicos por escoamento e lixiviação.

As bacias ITA-1 e ITA-2 são monitoradas continuamente desde 2017, com dados climatológicos e hidrológicos, devido à sua importância agrícola e necessidade de conservação dos recursos hídricos.

ÁREA 2: RIBEIRÃO DA ONÇA

A área 2 de investigação corresponde à bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, situado na região central do estado de São Paulo. A bacia abrange uma extensão de aproximadamente 65 km² e é um dos afluentes situados na margem esquerda do rio Jacaré-Guaçu. Em termos de classificação pedológica, a bacia do Ribeirão da Onça (BRO) é predominantemente coberta por solos do tipo neossolo quartzarênico órtico a moderado, além de áreas com latossolos vermelhos, característicos de regiões tropicais. A topografia da bacia varia em altitude, indo

de 643 a 842 metros acima do nível do mar, apresentando uma declividade média de 7,6 metros por quilômetro (Neto et al., 2011), o que influencia o escoamento superficial e a dinâmica hídrica local.

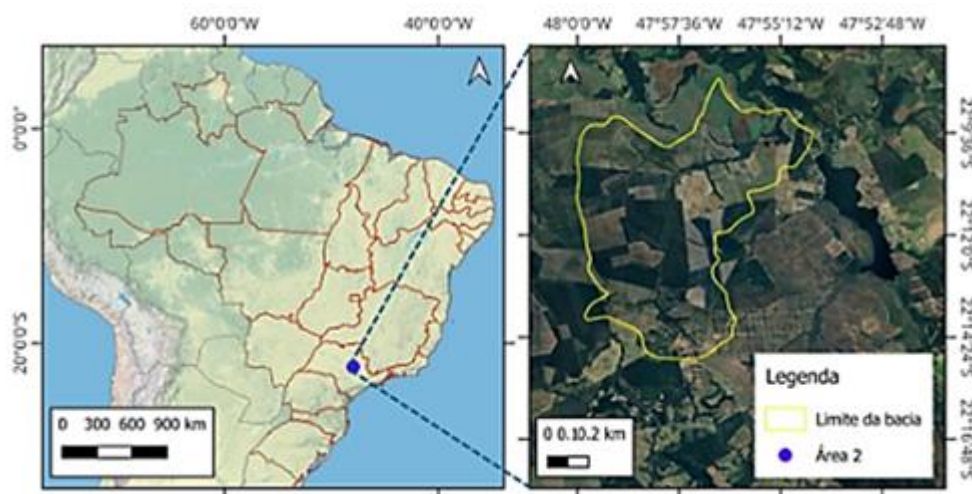


Figura 55 - Mapa de localização da bacia do Ribeirão da Onça. Fonte: Autores.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013), a região da BRO está inserida em uma área de clima subtropical úmido (Cwa), caracterizado por invernos secos e verões chuvosos (Beck et al., 2018). Durante o semestre chuvoso, ocorre aproximadamente 65% da precipitação anual, que totaliza uma média anual de 1500 mm, enquanto a temperatura média do ar é de 21,6°C (Cabrera et al., 2016). Em relação ao uso e ocupação do solo, as atividades agropecuárias e de silvicultura têm dominado a bacia do Ribeirão da Onça por pelo menos três décadas.

Um aspecto geológico relevante dessa bacia é sua posição estratégica sobre uma área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), o que confere à bacia uma importância hidrogeológica significativa, tornando-a representativa em termos de recarga e dinâmica das águas subterrâneas. Este sistema aquífero fornece água para mais de 90 milhões de pessoas distribuídas entre Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai (Kirchheim et al., 2019), sendo uma das maiores e mais valiosas reservas de água subterrânea da América do Sul. A recarga do SAG, ou seja, a reposição natural da água que ocorre nas áreas de afloramento, é um fator crucial para a manutenção desse recurso hídrico. No entanto, essa mesma característica torna o aquífero vulnerável à contaminação por atividades humanas, como a presença de nitrato, nutrientes e agrotóxicos oriundos de práticas agrícolas e urbanas.

Adicionalmente, a bacia possui uma ampla disponibilidade de dados climatológicos coletados desde a década de 1980, por meio de iniciativas da Universidade de São Paulo (USP). O Laboratório de Hidráulica Computacional da Escola de Engenharia de São Carlos (LHC/EESC/USP) estabeleceu uma rede de monitoramento contínuo, iniciada em 2004 e expandida ao longo dos anos. Atualmente, são monitorados o nível freático e a temperatura das águas subterrâneas em 31 poços de observação ativos, além das vazões e níveis de água do ribeirão em três seções fluviométricas. A rede também conta com três estações meteorológicas automáticas instaladas na bacia, que medem os principais parâmetros climáticos, além de uma estação convencional operada pelo Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA/USP), localizada nas proximidades da área de estudo.



Figura 66 - Mapa de Uso do Solo. Fonte: MapBiomas

SELEÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

A modelagem do transporte de agrotóxicos em sistemas hidrológicos é essencial para prever o comportamento de contaminantes e auxiliar na gestão ambiental. Diversos modelos foram analisados para identificar os mais adequados ao estudo das áreas selecionadas. Entre eles, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) destacou-se por sua capacidade de simular interações entre hidrologia e qualidade da água em grandes bacias, mas requer dados extensivos para calibração. O Pesticide Root Zone Model (PRZM) foca no transporte de agrotóxicos na zona não saturada e é útil para avaliar o potencial de lixiviação para aquíferos, enquanto o Hydrologic Simulation Program-FORTRAN (HSPF) e o MIKE SHE demonstraram eficácia na integração de processos superficiais e subterrâneos, sendo adequados para ambientes tropicais. Já os modelos HYDRUS-1D e HYDRUS-2D são apropriados para simulação de transporte em solos, embora não capturem interações com águas superficiais.

A eficácia desses modelos depende da disponibilidade e qualidade dos dados de entrada, além da calibração e validação em contextos locais. Assim, a modelagem não apenas contribui para a compreensão dos processos de transporte de agrotóxicos, mas também fornece uma base científica para a formulação de políticas públicas e práticas agrícolas sustentáveis, visando minimizar os impactos negativos no ambiente. O Quadro 1 a seguir resume vários modelos usados para simulação hidrológica de transporte de agrotóxicos, destacando suas vantagens e limitações com base nas referências fornecidas. O Quadro 1 fornece uma visão geral concisa dos pontos fortes e fracos de cada modelo, auxiliando pesquisadores e profissionais na seleção da ferramenta mais apropriada para simular o transporte de agrotóxicos em vários contextos hidrológicos.

Quadro 11 - Sumário de potencialidades e limitações dos diferentes modelos para simulação do transporte de pesticidas.

Modelo	Aplicabilidade e potencialidade	Limitações	Referências
Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	Capaz de simular o transporte de pesticidas em escala de bacia hidrográfica; Integra noções quantitativas e qualitativas; Disponibilidade de diversos manuais de operação.	Necessidade de dados extensivos; complexidade de calibração; Aplicabilidade em grandes bacias.	(Winchell et al., 2018; Abbasi et al., 2019; Rathjens et al., 2023)
Pesticide Root Zone Model (PRZM)	Foca no transporte subterrâneo de pesticidas; Útil para avaliar o movimento vertical de pesticidas no solo.	Frequentemente criticado por suas simplificações em relação às condições reais do solo; Limitado a tipos e condições específicas de solo; Pode não contabilizar adequadamente o escoamento superficial.	(Chu and Mariño, 2004; Fox et al., 2007)
Hydrus	Este modelo simula com precisão o fluxo de água e o transporte de solutos no solo; Interface amigável ao usuário	Comumente utilizado para análises pontuais de fluxo vertical; necessidade de dados precisos de infiltração e condutividade hidráulica do solo	(Šimůnek et al., 2008; Diamantopoulos et al., 2017)
MIKE SHE	Modelo baseado em física que integra processos de águas superficiais e subterrâneas; Adaptado a várias condições e escalas hidrológicas	A natureza abrangente do modelo requer dados de entrada extensos; Devido às suas simulações detalhadas, MIKE SHE pode ser computacionalmente exigente	(Fauser et al., 2007; Wang et al., 2023)
Root Zone Water Quality Model (RZWQM)	Integra o crescimento das plantas e os processos de destino dos pesticidas.	Sensível aos parâmetros de entrada, particularmente à meia-vida dos pesticidas; A calibração pode ser demorada.	(Malone et al., 2004b, 2004a)
Vegetative Filter Strip Modeling System (VFSMOD)	Projetado especificamente para avaliar a eficácia de tampões vegetativos na redução do transporte de pesticidas; Vincula hidrologia com transporte de sedimentos.	Limitado a cenários envolvendo tampões vegetativos; Pode não levar em conta todas as vias hidrológicas.	(Abu-Zreig et al., 2001; Sabbagh et al., 2009)

4. ATIVIDADES PREVISTAS

Dando continuidade ao desenvolvimento do projeto, as seguintes atividades estão previstas de acordo com o cronograma aprovado: finalizar a redação e submissão de um artigo científico que aborde a ocorrência de PFOS, FOSA e FOSAA em água superficial, subterrânea e sedimentos; realizar a coleta de amostras de água e solo nas microbacias selecionadas no Mato Grosso do Sul, cobrindo as áreas de vida dos tamanduás amostrados; continuar as análises químicas para quantificação de PFOS nos demais tecidos de tamanduás; prosseguir com o estudo piloto de tratamento de formigueiros com PFOS, realizando coletas nos tempos predeterminados e iniciando o preparo de amostras e análises químicas; iniciar análises de quantificação de EtFOSA, FOSA, FOSAA e PFOS nas amostras de água, solo e sedimento coletadas nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia, nos laboratórios da Embrapa Meio Ambiente; conduzir tratamento e análise de dados para os resultados gerados, visando a produção de publicações científicas com os dados de PFOS em amostras bióticas e abióticas.

Além disso, está prevista a condução de um segundo teste de degradação dos agrotóxicos monitorados em amostras de água, dar continuidade a amostragem piloto junto à RNQA da ANA e avaliar a possível mudança de parceiro institucional para amostragem de água superficial em todos os estados do país; adquirir os padrões analíticos necessários para a expansão do monitoramento de agrotóxicos de uso atual e POPs; instalar e validar métodos analíticos no novo equipamento (GC-MSMS) adquirido para o projeto. Também serão levantadas as bases de dados hidrometeorológicos disponíveis, coletando informações de precipitação, temperatura e vazão das estações selecionadas, aplicando métodos de interpolação espacial para preencher lacunas nos dados e garantir cobertura contínua, e realizando análises para identificar tendências e padrões espaciais e temporais.

O projeto também prevê a coleta e integração de dados das características físicas das bacias hidrográficas, dados hidrometeorológicos e concentrações encontradas de cada composto monitorado para construir uma base de informações robusta para as análises; realizar Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Cluster para identificar grupos com padrões de contaminação semelhantes e áreas críticas; aplicar regressão múltipla para estabelecer a relação entre fatores ambientais e níveis de contaminação, identificando os principais vetores de poluição. Por fim, serão coletadas amostras no exutório das bacias de estudo, utilizando amostradores automáticos e coletas manuais, simulando o transporte de agrotóxicos em superfície e subsuperfície nas bacias estudadas por meio de modelagem, e integrando as variáveis fisiográficas com os resultados de contaminação para desenvolver estratégias de mitigação mais eficazes e propor recomendações baseadas nas condições ambientais específicas de cada área monitorada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, Y.; MANNAERTS, C. M.; MAKAU, W. Modeling Pesticide and Sediment Transport in the Malewa River Basin (Kenya) Using SWAT. *Water*, v. 11, n. 87, p. 1-20, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/w11010087>.

ABU-ZREIG, M.; RUDRA, R. P.; WHITELEY, H. R. Validation of a Vegetated Filter Strip Model (VFSSMOD). *Hydrological Processes*, v. 15, n. 5, p. 729-742, 2001. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.101>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's Climate Classification Map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. doi: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps At 1-Km Resolution, *Scientific Data*, v. 5, n. 180214, 2018. doi: [0.1038/sdata.2018.214](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214).

CABRERA, M. C. M.; ANACHE, J. A. A.; YOULTON, C.; WENDLAND, E. Performance of Evaporation Estimation Methods Compared with Standard 20 M2 Tank, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 10, p. 874-879, 2016. doi: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n10p874-879>.

CHU, X.; MARIÑO, M. A. Semidiscrete Pesticide Transport Modeling and Application. *Journal of Hydrology*, v. 285, p. 19-40, 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.07.004>.

DIAMANTOPOULOS, E.; ŠIMŮNEK, J.; OBERDÖRSTER, C.; HAMMEL, K.; JENE, B.; SCHRÖDER, T., *et al.* Assessing the Potential Exposure of Groundwater to Pesticides: A Model Comparison. *Vadose Zone Journal*, v. 16, n. 11, p. 1-13, 2017. doi: <https://doi.org/10.2136/vzj2017.04.0070>.

FAUSER, P.; THOMSEN, M.; SØRENSEN, P. B.; PETERSEN, S. Predicted Concentrations for Pesticides in Drainage Dominated Catchments. *Water, Air, and Soil Pollut*, v. 187, p. 149-156, 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9503-0>.

FOX, G. A.; SABBAGH, G. J.; MALONE, R. W.; ROJAS, K. W. Modeling Parent and Metabolite Fate and Transport in Subsurface Drained Fields With Directly Connected Macropores1. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, v. 43, n. 6, p. 1359-1372, 2007. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00116.x>.

GONÇALVES, A. O. *Caracterização hidrossedimentológica e sua relação com o índice de qualidade participativo do plantio direto, na bacia do Alto Paranapanema-SP*. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019. doi: <https://doi.org/10.11606/T.11.2020.tde-22012020-095632>.

KIRCHHEIM, R. E.; GASTMANS, D.; CHANG, H. K.; GILMORE, T. E. The Use of Isotopes in Evolving Groundwater Circulation Models of Regional Continental Aquifers: The Case of the Guarani Aquifer System. *Hydrological Processes*, v. 33, n. 17, p. 2266-2278, 2019. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.13476>.

MALONE, R. W.; AHUJA, L. R.; MA, L.; WAUCHOPE, R. D.; MA, Q.; ROJAS, K. W. Application of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM) to Pesticide Fate and Transport: An Overview. *Pest Management Science*, v. 60, n. 3, p. 205-221, 2004a. doi: <https://doi.org/10.1002/ps.789>.

MALONE, R. W.; MA, L.; WAUCHOPE, R. D.; AHUJA, L. R.; ROJAS, K. W.; MA, Q.; *et al.* Modeling Hydrology, Metribuzin Degradation and Metribuzin Transport in Macroporous Tilled and No-till Silt Loam Soil Using RZWQM. *Pest Management Science*, v. 60, n. 3, p. 253-266, 2004b. doi: <https://doi.org/10.1002/ps.738>.

NETO, A. A. M.; MELO, D. de C. D.; WENDLAND, E. C. Bacia representativa em região de afloramento do Aquífero Guaraní. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, 2011, SBRH01224, Maceió. *Anais eletrônicos [...]*. Maceió: ABRH, 2011.

RATHJENS, H.; KIESEL, J.; WINCHELL, M.; ARNOLD, J. G.; SUR, R. Technical Note: Extending the SWAT Model to Transport Chemicals Through Tile and Groundwater Flow. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 27, n. 1, p. 159-167, 2013. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-27-159-2023>.

SABBAGH, G. J.; FOX, G. A.; KAMANZI, A.; ROEPKE, B.; TANG, J. Effectiveness of Vegetative Filter Strips in Reducing Pesticide Loading: Quantifying Pesticide Trapping Efficiency. *Journal of Environmental Quality*, v. 38, n. 2, p. 762-771, 2009. doi: <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0266>.

SABINO, H.; VASQUES, G. M.; HERMANI, L. C.; DART, R. O. Morfometria de Bacias Hidrográficas de Primeira Ordem em Áreas Agrícolas sob Sistema Plantio Direto: Delimitação e Propensão à Erosão e Inundação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 3, p. 479-492, 2020. doi: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1770>.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. De; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5ª edição. Brasília: Embrapa, 2018.

ŠIMŮNEK, J.; KÖHNE, J. M.; KODEŠOVÁ, R.; ŠEJNA, M. Simulating Nonequilibrium Movement of Water, Solutes and Particles Using Hydrus: A Review of Recent Applications. *Soil & Water Research*, v. 3, n. 10, p. S42–S51. doi: <https://doi.org/10.17221/1200-SWR>.

WANG, B.; LI, S.; GE, Y. Numerical Simulation of the Lower and Middle Reaches of the Yarkant River (China) Using MIKE SHE. *Water*, v. 15, n. 13, 2492, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/w15132492>.

WINCHELL, M.; PERANGINANGIN, N.; SRINIVASAN, R.; CHEN, W. Soil and Water Assessment Tool Model Predictions of Annual Maximum Pesticide Concentrations in High Vulnerability Watersheds. *Integrated Environmental Assessment Management*, v. 14, n. 3, p. 358-368, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/ieam.2014>.