

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ELABORAR PLANOS DE MONITORAMENTO DE AGROTÓXICOS PARA AS CAPTAÇÕES DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

*Sara Bursztein¹
Antônio Domingues Benetti¹

PROPOSAL FOR A METHODOLOGY TO DEVELOP PESTICIDE MONITORING PLANS FOR DRAINAGE FROM WATER SUPPLY SYSTEMS

Recibido el 1 de agosto de 2023. Aceptado el 28 de febrero de 2024

Abstract

The growing use of pesticides in agricultural activities raises concerns about the presence of these compounds in water sources. The water treatment processes used in most cities have limited ability to remove pesticides. This means that, when detected in water sources, they will possibly be present in treated water distribution systems. One of the instruments used to assess contamination and promote public policies aimed at preserving public health is the monitoring of water quality. However, representative monitoring of pesticides is a challenge. Several uncertainties contribute to this problem. The presence of pesticides in water is influenced by several factors, such as the dependence of precipitation, soil moisture conditions, chemical characteristics of compounds, and the degree of anthropization of the watershed. Given the issues addressed, this article proposes a methodology to increase the representativeness of pesticide samples collected in water supply systems for human consumption. The methodology employs multicriteria analysis to select a set of municipalities whose drinking water intakes will be monitored according to a staggered monthly distribution, over the two semesters of the year. In this way, it is possible to obtain 12 samples per parameter in this period. Based on assessments of initial results, recommendations are made to prioritize pesticides that should remain in the following year's monitoring program, as well as collection frequencies. In addition to optimizing costs, these annual assessments allow policy makers to establish the best actions to minimize the presence of pesticides in water distributed for human consumption.

Keywords: water quality monitoring planning, pesticides monitoring in water, pesticide in water, multicriteria analysis, drinking water quality.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

* *Autor correspondente:* Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. Email: saraburszt@hotmail.com

Resumo

O uso crescente de agrotóxicos em atividades agrícolas causa preocupação quanto à presença desses compostos nos mananciais. Os processos de tratamento de água usados na maioria das cidades têm limitada capacidade de remover agrotóxicos. Isto significa que, ao serem detectados nas captações, possivelmente estarão presentes nos sistemas de distribuição de água tratada. Um dos instrumentos usados para avaliar a contaminação e promover políticas públicas voltadas à preservação da saúde pública é o monitoramento da qualidade das águas. Contudo, o monitoramento representativo dos agrotóxicos constitui um desafio. Diversas incertezas estão associadas a esse problema. A presença de agrotóxicos nos mananciais é influenciada por vários fatores, tais como, a dependência das precipitações, as condições de umidade do solo, as características químicas dos compostos e o grau de antropização da bacia hidrográfica. Face às questões abordadas, este artigo propõe uma metodologia para aumentar a representatividade do monitoramento de agrotóxicos em amostras de água para consumo humano. A metodologia emprega a análise multicritério para selecionar um conjunto de municípios cujas captações serão monitoradas conforme uma distribuição mensal escalonada, ao longo dos dois semestres do ano. Dessa forma, é possível obter 12 amostras por parâmetro neste período. Baseadas nas avaliações iniciais são elaboradas recomendações para priorizar os agrotóxicos que devem permanecer no programa de monitoramento do ano seguinte, bem como às frequências de coletas. Além de otimizar custos, essas avaliações anuais permitem aos formuladores de políticas estabelecerem as melhores ações para minimizar a presença de agrotóxicos em águas destinadas ao consumo humano.

Palavras-chave: plano de monitoramento da qualidade da água, monitoramento de agrotóxicos na água, agrotóxicos em águas, análise multicritério, qualidade da água para consumo humano.

Introdução

Os agrotóxicos são substâncias químicas empregadas para eliminar espécies nocivas, incluindo insetos, fungos e ervas daninhas. Atualmente, existem mais de 1000 diferentes tipos de agrotóxicos usados no mundo (WHO, 2020). Apesar do seu uso crescente, a detecção de agrotóxicos nas captações dos sistemas de abastecimento de água é complexa devido aos fatores climáticos, às características da bacia hidrográfica, aos tipos de culturas, à época de aplicação e às propriedades químicas dos compostos. Estudos indicam que, quando aplicados, apenas uma pequena quantidade dos agrotóxicos tem um papel protetor no combate às doenças das plantas. Em contraste, uma grande parcela atinge alvos não visados, como o solo, e, através dele seguem diferentes rotas, podendo ser volatilizados, lixiviados para águas superficiais e subterrâneas, adsorvidos ou degradados (Tudi *et al.*, 2021). Também é comum casos de deriva pelo ar durante a aplicação, mesmo a partir de equipamentos terrestres (Araújo, 2019).

As análises químicas de agrotóxicos na água podem ser demoradas e dispendiosas dependendo da infraestrutura existente no local a monitorar. A diversidade de compostos que podem estar envolvidos em processos de contaminação constitui um desafio para o desenvolvimento e manutenção de um programa contínuo de monitoramento ao longo do tempo (Spycher *et al.*, 2018). Os períodos de aplicação de cada ingrediente ativo estão relacionados à sazonalidade pronunciada de sua presença nos mananciais (Chow *et al.*, 2020). Além disso, o seu transporte

para as águas superficiais é tipicamente desencadeado por eventos de chuva (Budd *et al.*, 2020) ou manuseio incorreto durante períodos secos (Kumar *et al.*, 2018). Essas ações podem causar picos de concentração altamente variáveis e de curta duração (algumas horas) em bacias de pequeno porte. Esses picos são difíceis de serem identificados, especialmente em coletas de amostras aleatórias e simples (Daouk, *et al.*, 2019).

A probabilidade de haver contaminação por resíduos de agrotóxicos nos mananciais é mais pronunciada nas áreas agrícolas, mas sua presença em recursos hídricos de centros urbanos não deve ser negligenciada, uma vez que também são usados para fins domésticos, comerciais e recreativos. O monitoramento da qualidade das águas é um instrumento para avaliar a contaminação e promover políticas públicas voltadas à saúde e ao meio ambiente (Lopes; Albuquerque, 2018). Esse monitoramento deve ser feito através da coleta periódica de amostras representativas da água e de análises em laboratórios credenciados (Silva, *et al.*, 2021). Uma vez identificado o princípio ativo, é possível conhecer, através de sua estrutura química, a dinâmica do agrotóxico no ambiente, incluindo sua mobilidade e degradabilidade (Soares *et al.*, 2017).

O monitoramento de agrotóxicos em águas requer um plano de amostragem adequado para atender aos objetivos da avaliação e identificar o grau de variabilidade periódica das concentrações. A definição da época em que deve ser realizada a coleta e sua frequência é crucial para a programação da amostragem. Em função desta variabilidade temporal e da estratégia de amostragem empregada, os resultados do monitoramento podem apresentar valores significativamente diferentes. A identificação de tendências temporais nos dados obtidos torna-se uma tarefa complexa devido à grande variedade de compostos relevantes e a necessidade de considerar os efeitos hidrológicos (Chow *et al.*, 2020).

Para contemplar as diversas variáveis que interferem nos resultados é necessário conduzir o monitoramento por um período que envolva diversas safras ou anos. A adoção de um esquema de amostragem mais consistente, por um período mais longo, ajuda a estabelecer o alcance e a variabilidade interanual da contaminação dos recursos hídricos por agrotóxicos. Também pode auxiliar a identificar os fatores que interferem no transporte de agrotóxicos para as águas em diferentes condições ambientais e agrícolas. A definição de padrões consistentes para uma variedade de condições torna as tendências observadas mais confiáveis (Chow *et al.*, 2020).

A presença de agrotóxicos em sistemas de abastecimento de água para consumo humano é uma preocupação de saúde pública, uma vez que já foram identificados vários efeitos adversos, tais como alterações celulares associadas a alguns tipos de câncer (Lopes; Albuquerque, 2018). A exposição crônica por ingestão de água tem sido associada a redução de imunidade, alterações no balanço hormonal, dificuldades reprodutivas e efeitos carcinogênicos (Syafudin *et al.*, 2021). Os processos de tratamento de água mais utilizados nas cidades brasileiras, como a clarificação química, a filtração em

meio granular e a desinfecção, têm pouca capacidade de remover diversos tipos de agrotóxicos. Dessa forma, a existência destes compostos em captações possivelmente se refletirá também em sua presença na água distribuída à população. Para remover os traços de agrotóxicos que possam estar presentes na água para consumo humano, é necessário empregar tecnologias avançadas, como a adsorção em carvão ativado, a osmose reversa, a nanofiltração, a radiação ultravioleta, a ozonização e processos oxidativos avançados (Elfrikie *et al.*, 2020; Brovine *et al.*, 2023).

Os países empregam diferentes estratégias para monitorar e controlar a presença de agrotóxicos na água para consumo humano. Os critérios não são uniformes entre os países, bem como em relação aos diversos agrotóxicos. Por exemplo, o monitoramento pode ser mensal, trimestral ou outra periodicidade, de acordo com as avaliações pré-estabelecidas. No Brasil, ao contrário do que ocorre em outros países, a periodicidade semestral é exigida para todos os 40 agrotóxicos listados na Portaria nº 888/2021 (Bursztejn; Benetti, 2023). Os resultados do monitoramento devem ser inseridos no Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano – SISÁGUA, um banco de dados de acesso público (SISÁGUA, 2023). Observa-se, na prática, que as exigências de monitoramento semestral não são totalmente atendidas. Além disso, faltam critérios técnicos para determinar os meses que essas coletas devem ser realizadas. Os dados do SISÁGUA do ano 2022 mostraram que apenas 66% das análises previstas para o monitoramento de agrotóxicos foram realizadas. Em uma parcela significativa dos municípios, os meses definidos para a amostragem foram janeiro e julho, aparentemente arbitrados para atender à exigência de semestralidade da Portaria.

Face às questões abordadas, este artigo propõe uma metodologia para aumentar a representatividade do monitoramento de agrotóxicos em amostras de água para consumo humano. A metodologia emprega a análise multicritério para selecionar um conjunto de municípios cujas captações serão monitoradas conforme uma distribuição mensal escalonada, ao longo dos dois semestres do ano. Dessa forma, é possível obter 12 amostras por parâmetro neste período. Baseados nas avaliações iniciais são elaboradas recomendações para dar prioridade aos agrotóxicos que devem permanecer no programa de monitoramento do ano seguinte, bem como às frequências de coletas. Além de otimizar os custos, essas avaliações anuais permitem que os formuladores de políticas determinem as ações mais adequadas para minimizar a presença de agrotóxicos em águas destinadas ao consumo humano.

Metodologia

A metodologia proposta para a elaboração do *Plano de Monitoramento de Agrotóxicos* segue as etapas mostradas na Figura 1, que serão discutidas em sequência. Este trabalho utiliza a base de dados disponível no Brasil, mas pode ser empregada de maneira universal, com um grau maior ou menor de detalhamento, conforme a disponibilidade de informações do local onde será aplicado.

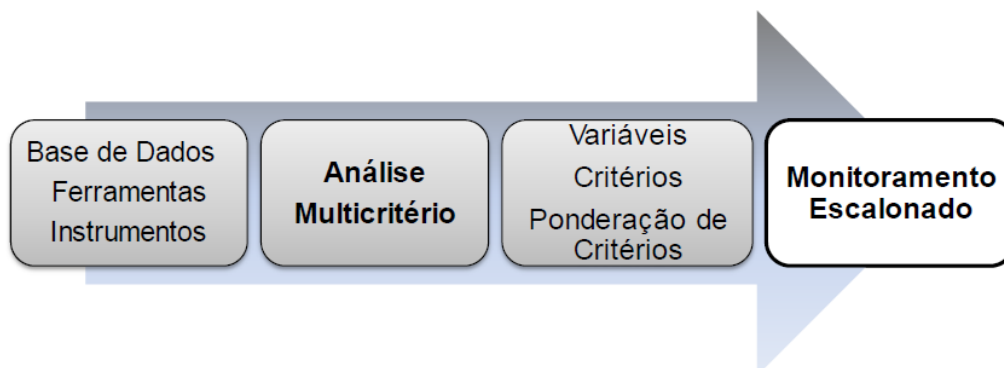


Figura 1. Sequência metodológica para desenvolver o Plano de Monitoramento de Agrotóxicos. *Fonte: dos autores, 2023.*

Base de dados

Os dados requeridos incluem informações sobre os sistemas de abastecimento de água, a comercialização de agrotóxicos, seus registros no órgão competente, o monitoramento existente da qualidade da água e a divisão de bacias hidrográficas. Essas informações, geralmente, estão disponíveis em sites de instituições públicas. No Brasil, por exemplo, as informações sobre saneamento estão disponíveis através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017) e Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2023). A comercialização de agrotóxicos pode ser acessada no site do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2022). A rede de bacias hidrográficas é publicada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2017; IBGE, 2021), enquanto o monitoramento da qualidade da água é de acesso público pelo SISÁGUA (2023). O banco de dados AGROFIT do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) dispõe de informações sobre todos os agrotóxicos registrados no país (AGROFIT, 2023).

Nos sites do IBGE e SNIS sobre saneamento, é possível se encontrar as características das estações de tratamento de água e os processos utilizados. Os dados referentes à comercialização de agrotóxicos são encaminhados ao IBAMA, que dá publicidade de acordo com a legislação brasileira. Essas informações são disponibilizadas através de sínteses nas formas de tabelas e gráficos que contém, por exemplo, o ranking dos agrotóxicos mais comercializados no Brasil, por estado da federação e, também pelo grau de periculosidade ambiental. Os resultados do monitoramento de agrotóxicos em amostras de água são disponibilizados no SISÁGUA. A partir desses dados, é possível avaliar o estágio atual do monitoramento de agrotóxicos no país e verificar o período em que as amostras foram coletadas. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico disponibiliza informações sobre 5354 bacias hidrográficas brasileiras. Por meio do AGROFIT é possível conhecer a composição dos ingredientes ativos dos agrotóxicos.

Ferramentas

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é a ferramenta que identifica as áreas cultivadas e seu estado de antropização, além de integrar e processar os dados, permitindo uma análise mais precisa da situação das bacias hidrográficas (Caldas *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2020).

Instrumentos

O instrumento selecionado para desenvolver a metodologia do *Plano de Monitoramento de Agrotóxicos* nas captações dos sistemas de abastecimento de água foi a análise multicritério (AMC). Ela é empregada para avaliar e classificar alternativas em relação a um determinado conjunto de objetivos ou critérios. Embora não haja uma metodologia única, ela geralmente envolve a definição de uma lista de critérios de sucesso, atribuindo pesos a cada um deles. As diversas opções do plano de monitoramento podem ser avaliadas e pontuadas em relação aos critérios, com as notas atribuídas multiplicadas pelas ponderações, gerando uma classificação de opções alternativas (Basilio *et al.*, 2019). Um problema de decisão do tipo multicritério requer a seleção de um número limitado de alternativas com base em um conjunto de critérios selecionados (Magalhães, 2022).

Dentre as várias possibilidades da análise multicritérios, o Processo de Análise Hierárquico é uma metodologia que pode ser aplicada em análises ambientais, como na identificação de vulnerabilidade (Peixoto *et al.*, 2019), de susceptibilidade à erosão (Caldas *et al.*, 2019) e de áreas aptas à agricultura familiar (Mishra *et al.*, 2015). O Método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) consiste em hierarquizar um problema para a tomada de decisão (Saaty, 1990). A decomposição hierárquica torna possível estruturar e auxiliar a compreensão da decisão a ser tomada, através da formulação de critérios e das alternativas a serem consideradas. Desta forma, é possível obter uma melhor compreensão do problema de decisão e uma visão geral da situação em questão (Mu; Pereyra-Rojas, 2018).

Variáveis

A análise multicritério torna possível que os objetivos estabelecidos pelos tomadores de decisões sejam analisados de forma estruturada, objetiva e transparente. Isso é possível através da inclusão de variáveis no modelo de decisão que representará esses objetivos. As variáveis são elaboradas utilizando uma base de dados que está disponível nos sítios eletrônicos das instituições governamentais, associadas à aplicação de geotecnologia (SIG). A partir dessas variáveis, são estabelecidos critérios e atribuídos a eles pesos de relevância para ponderar e priorizar os critérios.

Critérios

As variáveis são agrupadas e transformadas em critérios (ou atributos) que permitem avaliar as consequências de cada alternativa em relação aos objetivos. Os critérios são formulados a partir

de um conjunto de variáveis, tais como a geomorfologia da bacia, as espécies cultivadas e os tipos de agrotóxicos utilizados, bem como os recursos de infraestrutura disponíveis na região em questão. Por exemplo, em uma região que não for possível identificar todos os critérios, opta-se pela análise multicritério para as variáveis mais representativas naquele espaço.

Ponderação de critérios

A relevância de ponderar os critérios é consequência da comparação entre eles em relação ao objetivo desejado. Representa a prioridade relativa de cada critério. Esta comparação é feita através de uma escala descritiva, com um valor correspondente numérico, conhecida como Escala Fundamental de Saaty (2013), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Escala fundamental de Saaty

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada	Experiência e julgamento ligeiramente favorecem uma alternativa em comparação a outra.
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em comparação a outra.
7	Importância muito forte	Uma alternativa é fortemente favorecida em comparação a outra.
9	Importância extrema	A evidência que favorece uma alternativa em detrimento de outra é a mais alta possível.
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Em algumas situações opta-se por interpolar a intensidade da importância do critério.

Fonte: Adaptado por Januzzi et al., 2009 (de Saaty e Vargas, 2013).

Proposta de Plano de Monitoramento de Agrotóxicos

A última etapa da metodologia é a elaboração do *Plano de Monitoramento de Agrotóxicos*. Ele identifica grupos de captações de água pertencentes aos municípios selecionados pela análise multicritério. O monitoramento será realizado conforme uma distribuição mensal escalonada ao longo de dois semestres. Ao final desta etapa, é feita uma avaliação com o objetivo de dar prioridade a frequência e a escolha dos agrotóxicos que continuarão sendo monitorados. Para aqueles municípios que não dispuserem de condições para realizar a amostragem, mas que apresentarem similaridade com o grupo monitorado, é feita uma espacialização amostral, utilizando os resultados obtidos como um indicador de tendência.

Resultados

Os resultados são ilustrados por meio da apresentação dos passos sugeridos pelo método para elaborar *Planos de Monitoramento de Agrotóxicos*. A análise multicritério seleciona os municípios que serão incluídos no plano de monitoramento. A seguir, são definidas as periodicidades escalonadas e as variáveis. Elas servirão para reunir os municípios e respectivas captações cujos sistemas de abastecimento de água serão monitorados. Para este exemplo, foram considerados os dados disponíveis no caso específico do Brasil.

Variáveis

As variáveis são definidas a partir da base de dados, com o objetivo de estabelecer critérios como representatividade, facilidade de acesso e baixo nível de subjetividade para permitir a definição e/ou interpretação dos dados utilizados. As variáveis atribuídas são experimentais e podem ser revistas dependendo dos resultados alcançados. As seguintes variáveis foram consideradas inicialmente:

1. Relação dos 40 agrotóxicos que constam na Portaria N° 888/2021 do Ministério da Saúde do Brasil (Fonte: Brasil, 2021);
2. Classificação toxicológica e de periculosidade ambiental dos 40 agrotóxicos, em ordem decrescente (Fonte: IBAMA, 2022);
3. Relação da comercialização dos 40 agrotóxicos, em ordem decrescente (Fonte: IBAMA, 2022);
4. Localização dos estados maiores consumidores dos 40 agrotóxicos, em ordem decrescente (Fonte: IBAMA, 2022);
5. Identificação dos municípios maiores consumidores, definidos no item 4 (Fonte: Secretarias Estaduais de Agricultura);
6. Identificação das bacias hidrográficas nas quais estão inseridos os municípios definidos no item 5 e suas características (Fonte: Agência Nacional de Águas, 2017);
7. Identificação das características atribuíveis como prioritárias e sua posição em relação a montante ou jusante dos pontos de captação dos sistemas de abastecimento de água nas bacias hidrográficas nas quais os municípios identificados no item 5 estão inseridos;
8. Identificação dos agrotóxicos presentes nas análises de água realizadas nos últimos 5 anos, nas captações dos municípios que compõem o plano de monitoramento (Fonte: SISÁGUA, 2023).

Critérios

Após a definição das variáveis, são estabelecidos os critérios para agrupar os municípios e suas respectivas captações dos sistemas de abastecimento de água. Os critérios contemplam elementos que interferem de forma significativa no sistema analisado e que satisfaçam alguns requisitos preliminares de similaridade, como:

1. Cultivar as mesmas espécies e utilizar os mesmos agrotóxicos;

2. Aplicar os mesmos agrotóxicos em uma mesma época;
3. Possuir regime pluviométrico semelhante;
4. Possuir conformação geomorfológica semelhante;
5. Possuir nível de antropização semelhante;
6. Possuir cobertura vegetal semelhante no mesmo bioma.
7. Estar localizado na mesma região hidrográfica.

Ponderação dos critérios

Após definir os critérios, estabelece-se uma hierarquia para identificar o número de captações de água dos municípios que serão integrados no plano de monitoramento. Para tanto, os critérios são ponderados conforme sua relevância e o impacto gerado no sistema em questão. A hierarquia considera os seguintes aspectos: (i) consumo dos agrotóxicos mais comercializados nas áreas que contribuem para as captações de água; (ii) destino dos agrotóxicos pertencentes ao grupo com maior potencial de contaminação de mananciais; (iii) agrotóxicos que foram identificados nas análises publicadas no SISÁGUA nos últimos 5 anos; (iv) características físicas da bacia hidrográfica em que o sistema de abastecimento de água em análise está inserido. Aos critérios são atribuídos uma faixa de peso para cada um, em uma escala de 0 a 10. Os critérios para compor a análise estão descritos a seguir:

Critério I: Agrotóxicos mais comercializados nas regiões

Esse critério se refere ao volume de comercialização do agrotóxico em uma determinada região. Considera a relação direta entre o maior consumo e a probabilidade de sua presença nos mananciais que suprem os sistemas de abastecimento de água desta região. O elevado consumo de agrotóxicos pode estar relacionado à ocupação de grandes áreas agrícolas e, conseqüentemente, a diminuição da cobertura vegetal natural, o que favorece o escoamento superficial e os processos erosivos resultando no transporte de agrotóxicos. Este critério é estabelecido a partir das variáveis 1, 3, 4 e 5. Dada à relevância do critério, optou-se por atribuir um peso de 8 a 10.

Critério II: Agrotóxicos com maior toxicidade e periculosidade ambiental

Os agrotóxicos que estão presentes neste grupo são extremamente perigosos devido aos seus potenciais de contaminação ambiental (PPA), conforme a classificação do IBAMA (1997). Os mananciais são contaminados pelos compostos dissolvidos e associados aos sedimentos durante o escoamento. O uso de agrotóxicos deste grupo em cultivos agrícolas de uma bacia hidrográfica indica um alto risco de comprometer a qualidade da água dos mananciais para abastecimento humano. Este critério é estabelecido a partir da variável 2. Pela relevância do critério e as possibilidades apresentadas, propõe-se um peso entre 7 e 9, de acordo com o volume de agrotóxicos utilizados nas culturas agrícolas de cada região.

Critério III: Agrotóxicos presentes nas análises publicadas pelo SISÁGUA nos últimos 5 anos.

Este critério visa identificar quais regiões já registraram a presença de agrotóxicos nos seus sistemas de abastecimento de água. Este critério é estabelecido a partir da variável 8. Os pesos são atribuídos de acordo com os percentuais que excedem os Valores Máximos Permitidos (VMP), conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Pesos atribuídos aos percentuais de detecção de agrotóxicos nas análises disponíveis no SISÁGUA

Concentrações superiores aos VMP dos i. a. (%)	100	≥80	≥70	≥60	≥50	≥40	≥30	≥20	≥10
Peso	10	9	8	7	6	5	4	3	2

Notas: 1. VMP – Valor Máximo Permitido; 2. i.a. ingredientes ativos dos agrotóxicos.

Fonte: dos autores, 2023.

Critério IV: Declividade média da sub-bacia.

A topografia de uma bacia hidrográfica, aliada ao tipo de solo e vegetação pode ter um impacto significativo no escoamento de agrotóxicos. Quanto mais acidentada a topografia da região, maior o potencial de escoamento (*run-off*) e carreamento de sedimentos para os mananciais (Anjinho *et al*, 2021).

A bacia hidrográfica pode ser dividida de acordo com faixas de declividade, que variam desde relevos planos, passando por ondulados até montanhosos. Este critério é estabelecido a partir das variáveis 6 e 7. A Tabela 3 apresenta uma proposta de pontuação para a declividade média da bacia, que varia de 1 a 5, considerando a faixa de declividade mais representativa.

Tabela 3. Pesos do critério declividade média da bacia com base em faixas de declividades.

Classes de relevo	Declividade (%)	Peso
Plano	<3	1
Suave ondulado	3 a 12	2
Ondulado	12 a 24	3
Forte ondulado a montanhoso	24 a 45	4
Montanhoso	> 45	5

Fonte: Menezes, 2006.

A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, os procedimentos utilizados para hierarquizar e ponderar a composição dos municípios que farão o monitoramento escalonado. Outras variáveis e/ou critérios podem ser adicionadas à análise, tais como as características químicas dos agrotóxicos e os tempos de meia vida.

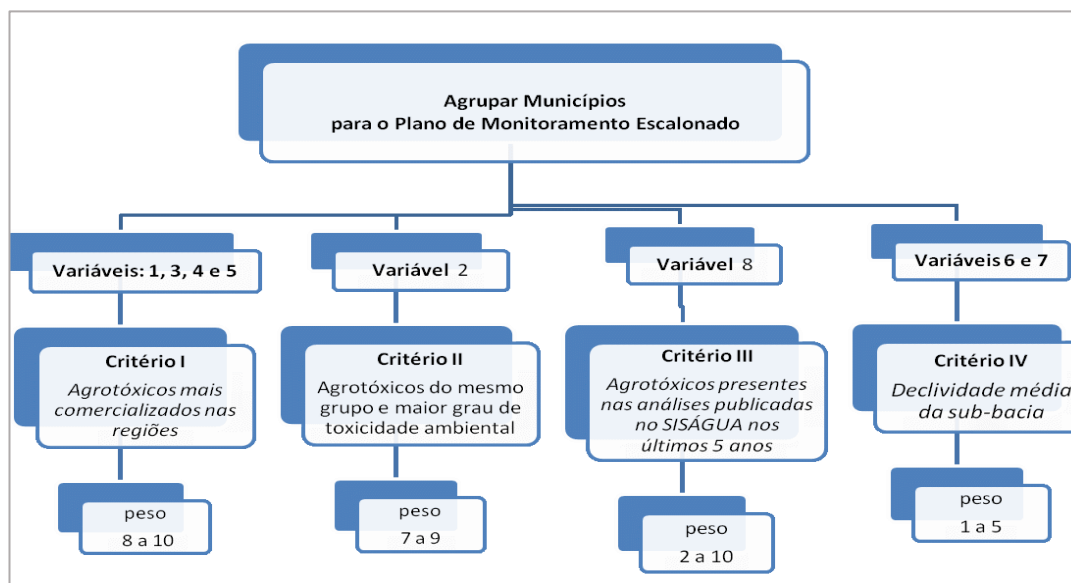


Figura 2. Ponderação de critérios para aplicar o monitoramento escalonado. Fonte: dos autores, 2023.

Espacialização amostral

Ao elaborar o plano de monitoramento de agrotóxicos utilizando o método proposto, os municípios são agrupados por meio da análise multicritério. Por exemplo, pode-se agrupar 6 municípios (A a F) e estabelecer uma distribuição escalonada semestral da frequência da amostragem. A distribuição escalonada é composta por uma amostragem em meses distintos no mesmo semestre. Neste cenário, o primeiro semestre seria dividido entre janeiro e junho, e o segundo entre julho e dezembro, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Periodicidade semestral do monitoramento para 6 municípios agregados

Municípios	A	B	C	D	E	F
1º semestre	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho
2º semestre	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro

Fonte: dos autores, 2023.

Outras situações podem ser consideradas. Por exemplo, quando for possível agregar somente 4 municípios, a distribuição de amostras seria quadrimestral, conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Periodicidade quadrimestral de monitoramento para 4 municípios agregados

Município	A	B	C	D
1º quadrimestre	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
2º quadrimestre	Maio	Junho	Julho	Agosto
3º quadrimestre	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro

Fonte: dos autores, 2023.

A partir dos resultados alcançados nos primeiros 12 meses, a frequência da amostragem pode ser alterada, assim como os municípios selecionados com suas respectivas captações e os próprios agrotóxicos monitorados. É importante salientar que este método não esgota todas as variáveis intervenientes, uma vez que sua avaliação é contínua. Ele parte de um conjunto de dados disponíveis que torna possível sua aplicação em diferentes regiões.

Conclusões

A coleta de amostras representativas para análise de agrotóxicos em sistemas de abastecimento de água para o consumo humano é um grande desafio. Isto se deve as diversas variáveis que afetam a detecção destes compostos químicos na água. Há incertezas, tais como a definição da melhor periodicidade para a realização as análises. Outra dificuldade é o comportamento diverso dos agrotóxicos ao serem descartados no ambiente. Dessa forma, devem ser pensadas alternativas para aumentar a representatividade do monitoramento de agrotóxicos, além de otimizar os seus custos.

Ao analisar os dados oficiais disponíveis no SISÁGUA sobre o monitoramento de agrotóxicos, é possível concluir que eles podem não ser representativos, uma vez que não atendem na íntegra aos requisitos da Portaria n.º 888/21.

Este artigo propôs uma metodologia para a elaboração de *Planos de Monitoramento de Agrotóxicos*. Com este método, é possível coletar de 12 amostras por ano, para cada ingrediente ativo, com uma coleta semestral em cada captação. Ao amostrar um agrotóxico em todos os meses do ano, é possível identificar os meses de maior incidência e, a partir desses resultados, adequar os planos de monitoramento. O método oferece uma variedade de combinações e alternativas que tornam possível aprofundar o conhecimento sobre a presença de agrotóxicos em sistemas de abastecimento de água integrando as diversidades regionais e ampliando as séries históricas amostrais.

O método também permite que os resultados sejam transferidos para outras localidades que atendam aos critérios de similaridade previamente estabelecidos e não possuam condições estruturais para realizar o monitoramento próprio. Dessa forma, é possível avaliar a situação do abastecimento de água regional em relação à presença de agrotóxicos. Isto torna possível que mesmo os municípios sem infraestrutura ou condições para monitorar agrotóxicos possam se beneficiar do conhecimento adquirido. Dessa maneira pode-se contemplá-los com a tendência verificada nos resultados das captações em que houve o monitoramento.

Em um intervalo mínimo de um ano, a partir dos resultados, é possível mapear as áreas que requerem um monitoramento mais intensivo e aquelas que podem ser mais espaçadas, a exemplo dos procedimentos das diretivas internacionais. Estima-se que um período de cinco anos seja suficiente para consolidar o número de agrotóxicos monitorados, os períodos e regiões prioritárias. Dessa forma, é possível avaliar a evolução dos resultados do controle e monitoramento ao longo do tempo, reduzindo-se ou aumentando a frequência das análises de acordo com a maior ou menor incidência de detecção dos agrotóxicos. É possível aumentar ou diminuir o número de amostras nas áreas de influência indireta, como por exemplo, os municípios com baixo ou nenhum consumo de agrotóxicos, mas que se localizam a jusante da bacia hidrográfica de grandes consumidores.

O método do monitoramento proposto neste trabalho tem como objetivo contribuir para o avanço na detecção da presença de agrotóxicos em sistemas de abastecimento de água. Considera-se que o método proporciona aos responsáveis pela elaboração de planos de monitoramento uma base mais sólida para a coleta e avaliação mais representativa da presença de agrotóxicos nas captações dos sistemas de abastecimento de água para consumo humano. Além disso, permite indicar e priorizar as estações de tratamento de água que necessitam ser dotadas de tecnologias avançadas para evitar a presença de agrotóxicos na água distribuída à população. A sequência deste artigo apresentará um estudo de caso onde é feita sua aplicação.

Referencias bibliográficas

- AGROFIT, Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários (2023) Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília. Acesso em: 23 jun. 2023. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) Base Hidrográfica Ottocodificada – bacias nível 2. Acesso em: 11 mar. 2023. Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/maps/4db0ad90eca84da0836cef9458dcb285_7/about
- Anjinho, P. da S, Barbosa, M. A. G. A, Costa, C. W, Mauad, F. F. (2021) Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: a Brazilian basin case study. *Land Use Policy*, [S.L.], **100**, 104946-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104946>.
- Araújo, E. C. de. (2019) Considerações sobre deriva e outros fundamentos técnicos na aplicação aérea e terrestre de agrotóxicos. Acesso em: 21 jan. 2024. Disponível em: <https://sindag.org.br/wp-content/uploads/2021/01/Consideracoes-sobre-deriva-versao-1.pdf>.

- Basilio, M.P, Pereira, V, Gomes, H. (2019) Multiple criteria decision analysis: an empirical study applied in the classification of the integrated areas of public security in the state of Rio de Janeiro. *Engevista*, **21**(1), 47-62.
- Brasil (2021) *Portaria 888/2021*, Ministério da Saúde. Acesso em: 20 set. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>
- Budd, R, Wang, D, Michael Ensminger, M, Phillips, B. (2020) An evaluation of temporal and spatial trends of pyrethroid concentrations in California surface waters, *Science of The Total Environment*, **718**, 137402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137402>.
- Brovini, E.M, Moreira, F.D, Martucci, M.E.P, Aquino, S.F. (2023) Water treatment technologies for removing priority pesticides. *Journal Water Process Engineering*. Vol 53, 103730. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103730>
- Bursztejn, S, Benetti, A. D. (2023) Monitoramento de agrotóxicos em sistemas de abastecimento de água: uma análise comparada entre a Portaria n.º 888/2021 e as Diretivas Internacionais. *Revista Águas Subterrâneas*, **37** (3). <https://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30220>.
- Caldas, V.I.S.P, Silva, A.S, Santos, J.P.C. (2019) Suscetibilidade à erosão dos solos da bacia hidrográfica lagos–São João, no Estado do Rio de Janeiro, Brasil, a partir do método AHP e análise multicritério. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **12**(04), 1415-1430. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1415-1430>
- Chow, R., Scheidegger, R., Doppler, T., Dietzel, A., Fenicia, F., Stamm, C. (2020) A review of long-term pesticide monitoring studies to assess surface water quality trends, *Water Research X*, **9**(2020), 100064. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100064>
- Daouk, S., Doppler, T., Wittmer, I., Junghans, M., Coster, M., & Stamm, C. (2019) Pesticides dans les eaux de surface Mesures de réduction et monitoring—synthese des apprentissages liés aux projets «Phytos 62A». *Aqua & Gas*, **99**, 66-73. Acesso em: 28 jan. 2024. Disponível em: <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A18254>
- Elfikrie, N, Ho Y. B, Zaidon, S. Z, Juahir, H, Tan, E. S. S. (2020). Occurrence of pesticides in surface water, pesticides removal efficiency in drinking water treatment plant and potential health risk to consumers in Tenggi River basin, Malaysia. *Science of the Total Environment*; **712**, 136540-136540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136540>
- IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (1997) Avaliação Ambiental dos Agrotóxicos. Acesso em: 18 mai. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/avaliacao-ambiental>
- IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2022). Relatório de comercialização de agrotóxicos. Acesso em: 18 mai. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#:~:text=Em%202022%2C%20um%20total%20de,Decreto%20n%C2%B0%204.074%2F2002>
- IBGE, Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística. (2017). Atlas de Saneamento. Acesso em: 12 mar. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?edicao=28244&t=destaques>
- IBGE, Instituto de Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil, 2021. Acesso em: 22 jun. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>>
- Jannuzzi, P.M., Miranda, W.L., Silva, D.S.G. (2009). Análise multicritério e tomada de decisão em políticas públicas: aspectos metodológicos, aplicativo operacional e aplicações. *Informática Pública*, **11**(1), 69-87. Acesso em: 28 jun. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228421871_Analise_Multicriterio_e_Tomada_de_Decisao_em_Politicas_Publicas_Aspectos_Metodologicos_Aplicativo_Operacional_e_Aplicacoes
- Kumar, P.S, Carolin, F.C, Varjani, S.J. (2018) Pesticides bioremediation. In: Varjani SJ, Agarwal, A.K., Gnansounou, E., Gurunathan, B., editors. *Bioremediation: applications for environmental protection and management*. Singapore: *Springer Nature*; **2018**. 197–222. Acesso em: 28 jun. 2023. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Bioremediation:+applications+for+environmental+protection+and+management&author=PS+Kumar&author=FC+Carolin&author=SJ+Varjani&publication_year=2018&I

- Lopes, C.V.A, Albuquerque, S.C.A. (2018). Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. *Revisão. Saúde debate* **42** (117) <https://doi.org/10.1590/0103-1104201811714>
- Magalhães, W.R. (2022) *Proposição e aplicação de um modelo para priorização de risco baseado em FMEA e Hesitant Fuzzy-TOPSIS*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Administração – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5246/1/priorizacaoariscofmeahesitant.pdf>
- Menezes, C.T. (2006) *Método para priorização de ações de vigilância da presença de agrotóxicos em águas superficiais: um estudo em Minas Gerais*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. Acesso em: 28 jun. 2023. Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/203M.PDF>
- Mishra, A. K., Deep, S., Choudhary, A. (2015) Identification of suitable sites for organic farming using AHP & GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **18**(2), 181-193. <http://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.005>
- Mu, E., Pereira-Rojas, M. (2018) Practical decision making using super decisions v3: An introduction to the Analytic Hierarchy Process (*Springer Briefs in Operations Research*) Edição, eBook Kindle
- Oliveira, A.D., Ladwig, N.I., Conto, D. (2020) Mapeamento temático na análise da paisagem: bacia hidrográfica do Rio Urussanga, Santa Catarina, Brasil. *Geosul*, **35**(75), 418- 440 2020. <http://doi.org/10.5007/1982-5153.2020v35n75p418>
- Peixoto, R.A.O., Fernandes, J.C., Schimdt, M.A.R., Pereira, C.E. (2019). Análise multicritério com uso da AHP para avaliação temporal na vulnerabilidade ambiental: estudo de caso na bacia hidrográfica do Uberabinha, MG. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **8**(3) 141-158. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e32019141-158>
- Saaty, T.L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, **48**(1)9-26. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saaty, T.L., Vargas, L.G. (2013). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process (2 ed., International Series in Operations Research & Management Science, 175). New York: Springer. 345 pp.
- Silva, L. de B., Schimidt, F., Santos, A. M. dos (2021). Ciência ambiental: reflexões sobre o monitoramento de resíduos de agrotóxicos em águas potável, superficial e subterrânea. *Engenharia Sanitária E Ambiental*, **26**(2), 193-200. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190321>
- SISÁGUA, Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (2023). Acesso em 18 mai. 2023. Disponível em: <https://sisagua-treinamento.saude.gov.br/sisagua/paginaExterna.jsf>
- SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. (2023). Acesso em 10 jun. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>
- Soares, D.F., Faria, A.M, Rosa, A.H. (2017) Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas por resíduos de agrotóxicos no município de Campo Novo do Parecis (MT), Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental [online]*. **22**(2), 277-284. Epub Oct 27. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016139118>
- Spycher, S., Mangold, S., Doppler, T., Junghans, Wittmer, M.I., Stamm, C., Singer, H. (2018) Pesticide Risks in Small Streams-How to Get as Close as Possible to the Stress Imposed on Aquatic Organisms. *Environmental Science & Technology*, **52**(8):4526-4535. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00077>
- Syafrudin, M, Kristanti, R.A., Yuniarto, A., Hadibarata, T., Rhee, J., Al-onazi, W.A., Algarni, T.S., Almarry, A.H., Al-Mohaimed, A.M. Pesticides in drinking water – a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**(468), 1-15. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020468>
- Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., Phung, D.T. (2021) Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International journal of environmental research and public health*, vol. 18, 3 1112. <https://doi:10.3390/ijerph18031112>.
- WHO, World Health Organization (2020) Chemical Safety: Pesticides. Acesso em: 15 jul. 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/chemical-safety-pesticides>