



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCÊNCIAS**

**DIEGO NEVES SILVA**

**ESTIMATIVA DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO POR PESTICIDAS NA SUB-  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOJU, MOJÚÍ DOS CAMPOS**

**SANTARÉM-PA  
2022**

**DIEGO NEVES SILVA**

**ESTIMATIVA DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO POR PESTICIDAS NA SUB-  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOJU, MOJUÍ DOS CAMPOS**

Dissertação apresentada ao curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Biociências da Universidade Federal do Oeste do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biociências, área de Concentração: Fisiologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ruy Bessa Lopes  
Coorientador: Prof. Dr. Rodolfo Maduro Almeida

**SANTARÉM-PA  
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA**

---

S586e Silva, Diego Neves  
Estimativa do risco de contaminação por pesticidas na Sub-Bacia do Rio Moju, Mojuí dos Campos./ Diego Neves Silva. – Santarém, 2022.  
62 fls. : il.  
Inclui bibliografias.

Orientador: Ruy Bessa Lopes.  
Coorientador: Rodolfo Maduro Almeida.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Biodiversidade e Florestas, Programa de Pós-Graduação em Biociências.

1. Toxicologia. 2. Contaminação. 3. Recursos hídricos. 4. Baixo Amazonas. I. Lopes, Ruy Bessa, *orient.* II. Almeida, Rodolfo Maduro, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 615.9098115

---

Bibliotecária - Documentalista: Cátia Alvarez – CRB/2 843



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
COORDENAÇÃO DO INSTITUTO DE BIODIVERSIDADE E  
FLORESTAS



ATA Nº 11 / 2022 - CIBEF (11.01.06.03)

Nº do Protocolo: 23204.010831/2022-12

Santarém-PA, 15 de agosto de 2022.

Aos vinte e sete dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte dois, às 14h30min, no sistema de videoconferência, instalou-se a banca Examinadora e Julgadora da Dissertação do Mestrando Diego Neves Silva. A banca examinadora foi composta pelos professores Dr. Ruy Bessa Lopes, PRESIDENTE, Rafael Caldeira Magalhães externo, examinador interno, Paulo Sérgio Taube Júnior. Deu-se início a abertura dos trabalhos, por parte do professor Ruy Bessa Lopes, Orientador da Pesquisa, que, após apresentar os membros da banca Examinadora e Julgadora e esclarecer a tramitação do procedimento para a defesa, de imediato, solicitou ao Mestrando Diego Neves Silva que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada **Estimativa do risco de contaminação por pesticidas na sub-bacia hidrográfica do Rio Mojú, Mojuí dos Campos**, marcando um tempo de até 45 (quarenta e cinco) minutos para a apresentação. Concluída a exposição, o Prof. Ruy Bessa Lopes, Presidente, passou a palavra ao examinador externo Rafael Caldeira Magalhães, para arguir o candidato ao título de Mestre em Biociências, e, em seguida, ao examinador interno, Paulo Sérgio Taube Júnior, na mesma condição, para que fizesse o mesmo; após, exibiu suas considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido ( x ) aprovado; ou ( ) reprovado, o Mestrando, conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Oeste do Pará. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, em até 30 (trinta) dias, via procedimentos para a conclusão, no SIGAA; contendo as modificações sugeridas pela banca Examinadora e Julgadora constante na folha de correção anexa. Conforme exigência deste Programa, o orientando não obterá o título se não comprovar a submissão de artigo científico para publicação.

*(Assinado digitalmente em 15/08/2022 13:56 )*

PAULO SERGIO TAUBE JUNIOR  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
IBEF (11.01.06)  
Matrícula: 1770373

*(Assinado digitalmente em 15/08/2022 10:06 )*

RAFAEL CALDEIRA MAGALHAES  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
ICTA (11.01.47)  
Matrícula: 1714702

*(Assinado digitalmente em 15/08/2022 10:08 )*

RUY BESSA LOPES  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
ICTA (11.01.47)  
Matrícula: 1836832

*(Assinado digitalmente em 15/08/2022 10:21 )*

DIEGO NEVES SILVA  
DISCENTE  
Matrícula: 2019100149

Para verificar a autenticidade deste documento entre em  
<https://sipac.ufopa.edu.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **11**, ano:  
**2022**, tipo: **ATA**, data de emissão: **15/08/2022** e o código de verificação: **de04607499**

## RESUMO

O consumo desenfreado de pesticidas na cadeia produtiva agrícola, contribui significativamente com a degradação ambiental, em suas diversas matrizes. Nos ecossistemas aquáticos, encontrados abundantemente na região do Amazônica, essa problemática se torna mais complexa, uma vez que a alta toxicidade de alguns pesticidas e o seu uso inadequado representam um grande e potencial risco de contaminação dos corpos d'água, ambiente o qual, é, na maioria das vezes o principal destino final dos pesticidas aplicados no campo. Nesse contexto, o objetivo principal dessa pesquisa é estimar o potencial risco de contaminação por pesticidas em águas superficiais na sub-bacia hidrográfica do Rio Moju, na microrregião de Santarém no Baixo Amazonas, Estado do Pará. Estudos desta natureza, contribuem para identificar possíveis áreas susceptíveis à contaminação por pesticidas e, por serem, estes estudos, escassos nessa região, são necessários e urgentes para a implementação de políticas que visem a proteção dos recursos aquáticos. O desenvolvimento do trabalho foi realizado com base em dados de acesso público acerca: da toxicologia (CL50) e propriedades físico-químicas (tempo de meia vida, solubilidade em água, coeficiente em sorção à matéria orgânica, entre outros) dos vinte e dois (22) pesticidas mais utilizados na área de estudo; e de dados que caracterizam a diversidade paisagística da sub-bacia hidrográfica do Rio Moju, como dados de altimetria, de uso e ocupação de solo, tipos de solo, etc. Como importante ferramenta analítica, foram utilizados os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para a análise e tratamento dos dados espaciais, assim como para a integração dos diferentes tipos de dados, com o auxílio do software Qgis 2.18. Como resultado deste trabalho, obteve-se um mapa temático de risco identificando as principais áreas sujeitas à contaminação por pesticidas na região de estudo. Este mapa contém informações que podem ser úteis para direcionar estudos futuros abordando a problemática da contaminação por pesticidas, assim como pode auxiliar na tomada de decisões de gestores de recursos hídricos nessa e em outras regiões, tendo em vista que tal metodologia é robusta e pode ser replicada para diferentes regiões respeitando-se as peculiaridades ambientais de cada local.

**Palavras-Chave:** Toxicologia, contaminação, recursos hídricos, Baixo-Amazonas.

## ABSTRACT

The overconsumption of pesticides in the agricultural productive chain contributes significantly to environmental degradation, in its various matrices. In aquatic ecosystems, abundantly found in the Amazon region, this problem becomes more complex, because the high toxicity of some pesticides and their inappropriate use represent a great and potential risk of contamination of water bodies, an environment which, is, in most cases, the main final destination of pesticides applied in the crops. In this context, the main objective of this research is to estimate the potential risk of contamination by pesticides in surface waters in the Mojuí River sub-basin, in the Santarém micro-region in Baixo Amazonas, State of Pará. Studies of this nature help to identify possible areas susceptible to contamination by pesticides and, as these studies are scarce in this region, they are necessary and urgent for the implementation of policies aimed at protecting aquatic resources. The development of the work was carried out based on publicly available data about: toxicology (LC50) and physicochemical properties (half-life, water solubility, organic matter, sorption coefficient, among others) of the twenty-two (22) most used pesticides in the study area; and of data that characterize the landscape diversity of the Mojuí River sub-basin, such as altimetry data, land use and occupation, soil types, etc. As an important analytical tool, Geographic Information Systems (GIS) were used for the analysis and treatment of spatial data, as well as for the integration of different types of data, with the aid of Qgis 2.18 software. As a result of this work, a thematic risk map was obtained identifying the main areas subject to pesticide contamination in the study region. This map contains information that may be useful to direct future studies addressing the issue of pesticide contamination, as well as assisting in decision-making by water resource managers in this and other regions, given that such a methodology is robust and can be replicated to different regions respecting the environmental peculiarities of each location.

**Keywords:** Toxicology, Pesticide, Watershed, Geographic Information Systems, Amazon.

<b>SUMÁRIO</b>	
<b>RESUMO</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>7</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
<b>GERAL</b>	<b>11</b>
<b>ESPECÍFICOS</b>	<b>11</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO I: AVALIAÇÃO DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO POR PESTICIDAS NAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOJU – BAIXO AMAZONAS</b>	<b>14</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>18</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>23</b>
<b>CONCLUSÃO</b>	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO II: O USO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS PARA ESTIMAR O RISCO DE CONTAMINAÇÃO POR PESTICIDAS UTILIZANDO AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SOB INFLUÊNCIA DE AGRICULTURA INTENSIVA</b>	<b>32</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>35</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
<i>Caracterização da área de estudo</i>	<b>36</b>
<i>Sistema de informações geográficas - SIG</i>	<b>38</b>
<i>Procedimentos para a análise multicritério</i>	<b>39</b>
<i>Delimitação da sub-bacia do Rio Moju</i>	<b>43</b>
<i>Mapas/critérios principais</i>	<b>43</b>
<i>Critério principal: Uso e ocupação do solo</i>	<b>43</b>
<i>Critério principal: Pedologia</i>	<b>44</b>
<i>Critério principal Declividade</i>	<b>44</b>
<i>Critério principal: Fluxo Acumulado</i>	<b>45</b>
<i>Normalização dos mapas/critérios principais</i>	<b>45</b>
<i>Normalização do mapa/critério principal: Uso e ocupação do solo</i>	<b>46</b>

<i>Normalização do mapa/critério principal: Declividade</i>	46
<i>Normalização do mapa/critério principal: Pedolgia</i>	47
<i>Normalização do mapa/critério principal: Fluxo Acumulado</i>	47
<i>Normalização do mapa/critério principal: Teor de Argila no Solo</i>	47
<i>Ponderação dos mapas/critérios principais</i>	48
<i>Combinação dos critérios principais</i>	50
<i>Mapa de risco de contaminação por pesticidas</i>	51
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	51
<i>Normalização dos critérios principais</i>	51
<i>Normalização dos critérios qualitativos: Pedologia</i>	52
<i>Ponderação dos critérios</i>	53
<i>Combinação dos critérios</i>	55
<i>Análise dos níveis de risco de contaminação por pesticidas</i>	56
<b>CONCLUSÃO</b>	58
<b>REFERENCIAS</b>	59

## INTRODUÇÃO GERAL

As atividades antrópicas ao longo dos séculos, vem provocando grandes mudanças no meio ambiente e conseqüentemente causando grandes impactos sobre os ecossistemas naturais. A exemplo dessas mudanças, podemos destacar: os processos de desertificações de grandes áreas; os desmatamentos; assoreamento de corpos d'água; inundações, erosões, mudanças climáticas, poluição e contaminação (Suguio, 2008).

Na agricultura, atividade essencial para a sobrevivência humana, e praticada a milhares de anos, a utilização de produtos para o controle de organismos indesejáveis, denominados, dentre outros termos, de pesticidas, é um exemplo de ação humana que causa interferência negativa ao meio ambiente e a saúde pública. Vale ressaltar que o uso intensivo de pesticidas ocorre especialmente na agricultura moderna, também chamada de agricultura patronal, que se contrapõe à agricultura familiar, e que teve início no período conhecido como revolução verde, em meados da década de (Marciel e Dutra 2017; Kageyama 2004).

O uso de substâncias para controle de organismos considerados como pragas é antigo. Existem registros que a 400 anos a.c. os romanos faziam o uso de cinzas, sais e lodo de fornalhas (tóxicos para a maioria das plantas) afim de manter estradas limpas. No século XVII, os pesticidas já eram utilizados para o controle de pragas que se replicavam comumente devido a homogeneidade dos cultivos que se tornaram frequentes com o advento das monoculturas (Kageyama, 2004).

A contaminação em um ambiente se dá pela presença de substâncias tóxicas em concentrações elevadas que podem oferecer risco para organismos vivos, que são afetados diretamente ou indiretamente. O que determina o risco apresentado por um pesticida, dentre outros fatores, é a sua toxicidade, ou seja, a propriedade intrínseca que uma substância possui em produzir efeitos nocivos após a interação com algum organismo. Contudo, a toxicidade deve ser diferenciada do risco, que é probabilidade estatística de uma substância provocar efeitos indesejados e suas conseqüências em condições definidas de exposição. Desta maneira, um pesticida que apresenta alta toxicidade, não necessariamente pode representar um alto risco, isto é, uma alta probabilidade de causar contaminação nas condições em que é utilizado (Jacinto Junior e Lucena 2022).

De acordo com a FAO (Food and Agriculture Organization), entidade que integra a estrutura da ONU (Organização das Nações), os pesticidas, referem-se a toda substância ou mistura de substâncias destinadas a prevenir, destruir ou controlar qualquer praga, que incluem

espécies de plantas ou animais que causam danos durante a produção, processamento, armazenamento, transporte ou comercialização de alimentos, commodities agrícolas, ou qualquer produto vegetal ou animal, são também consideradas as substâncias que podem ser administradas a animais para o controle de pragas em seus corpos e até mesmo controle de vetores de doenças humanas (WHO, 1990 apud Martin, 1993).

O termo inclui substâncias destinadas ao uso como regulador de crescimento de plantas, desfolhante, dessecante ou agente para raleio de frutas ou prevenção da queda prematura de frutas, e substâncias aplicadas às culturas antes ou após a colheita para proteger os produtos agrícolas da deterioração durante o armazenamento e o transporte (Londres, 2011).

Comercialmente podem ser encontrados sob a forma de herbicidas, inseticidas, fungicidas, nematicidas, acaricidas, rodenticidas, moluscicidas, formicidas, reguladores e inibidores de crescimento. Os três primeiros representam 95% do total de pesticidas, onde os herbicidas representam 48%, deste montante, seguidos pelos inseticidas (25%) e pelos fungicidas (22%) (Pelaez et al., 2010).

Existem vários fatores que impulsionaram o uso de pesticidas na agricultura, um dos principais foi o advento dos monocultivos que causam reduções na biodiversidade e provocam desequilíbrio nos ecossistemas. Esse desequilíbrio reflete no surgimento de pragas mais resistente, as quais exigem a aplicação de novos pesticidas, causando um círculo vicioso do qual a agricultura convencional não consegue se libertar (Londres, 2011; Siqueira et al., 2004).

O desenvolvimento da agricultura na Amazônia, a partir da segunda metade da década de 1990 incentivada principalmente por políticas públicas de isenção fiscal e incentivos de crédito, fez do Estado do Pará, uma nova fronteira de expansão da agricultura, especialmente com o avanço da mecanização agrícola empregada em monoculturas como arroz, milho e soja. (Teixeira et al., 2012)

Por outro lado, em detrimento do avanço agrícola, o uso elevado de pesticidas contribuiu consideravelmente para a degradação ambiental em suas diferentes matrizes, tendo em vista que o Brasil, que figura entre os países com maior produção agrícola no mundo, conseqüentemente desponta como um dos maiores consumidores de pesticidas (Pignati et al., 2017).

Nos ecossistemas aquáticos, encontrados abundantemente na região amazônica, os pesticidas são transportados por diversas vias, que incluem a deriva de pulverização, a lixiviação através dos perfis do solo (contaminação de águas subterrâneas) e pela aplicação direta nos corpos d'água dentre outras formas, no entanto, o escoamento superficial é

reconhecido como a principal fonte de contaminação dos ecossistemas aquáticos em áreas agrícolas (Williams et al., 1995)

A alta toxicidade de alguns produtos unida ao seu uso inadequado, representa grande risco de contaminação de águas superficiais que podem comprometer os ecossistemas locais e a saúde humana. Com o intuito de evitar esses problemas, é importante conhecer a dinâmica dos pesticidas no ambiente após a sua aplicação na lavoura, tendo em vista, que segundo estimativas, apenas 0,1 a 10% do montante de insumos aplicados chegam de forma efetiva a seus alvos, conseqüentemente, aproximadamente 90% são depositados, nos solos, em rios, mananciais e lençóis freáticos tornando-se biodisponíveis para uma ampla gama de espécies que compõem tanto a cadeia alimentar superficial quanto detrimental (Younos & Weigmann, 1988).

Nesse sentido, pesquisas voltadas para o monitoramento do uso de pesticidas e gerenciamento de recursos naturais, em especial, estudos voltados para o risco de contaminação de recursos hídricos por pesticidas, tem-se tornado de interesse da comunidade científica. No entanto, pesquisas com pesticidas e sua dinâmica na matriz água, são escassas na região Amazônica e de difícil parametrização devido à grande variabilidade paisagística, que dificulta a padronização do comportamento dos pesticidas no ambiente. A importância da compreensão dos processos que comandam a dinâmica de transporte e transferência de fase a qual determina a distribuição temporal dos pesticidas no solo e, na água permite reconhecer os riscos provenientes da sua utilização (Galvêncio et al., 2008).

Devido à complexidade dos ecossistemas, a dinâmica dos pesticidas no meio ambiente é de difícil previsão, e para avaliar o potencial de contaminação dos pesticidas nos ecossistemas aquáticos, é necessário se considerar todas as vias pelas quais estas substâncias podem atingir o meio aquático, identificar seu comportamento ambiental e suas propriedades físico-químicas, realizar estudos de campo coletas e análises múltiplas (Veiga, 2017).

Esses levantamentos exigem a disponibilidade em médio e longo prazo de recursos humanos qualificados além dos custos financeiros elevados, realidade diferente da encontrada na maioria dos municípios brasileiros. Contudo, como alternativa, existem metodologias que empregam o uso de tecnologias que permitem estudar o espaço, a partir de variáveis calculáveis e interpretáveis (Pinheiro et al., 2009)

Uma das maiores limitações relacionadas as avaliações de risco, é a dificuldade de se trabalhar com uma quantidade elevada de dados que caracterizam a grande diversidade encontrada nos ecossistemas naturais. Quando se avalia o risco apresentado por pesticidas, a descrição da variabilidade paisagística é especialmente importante e nesse sentido, problemas

complexos e interdisciplinares necessitam da combinação de diferentes níveis de informações, obtidas de diferentes fontes e formas de dados, para que possam ser resolvidos (Sala & Vighi, 2008).

Nesse sentido, a integração dos sistemas de informações geográficas (SIG) como uma ferramenta espacial eficaz é considerada muito promissora para a avaliação de risco local e na modelagem de transporte de pesticidas. Portanto, os sistemas de informação geográfica são capazes de fornecer informações que podem ajudar a direcionar programas de monitoramento com mais eficiência e viabilizar a produção de mapas que permitam identificar as áreas com maior vulnerabilidade de contaminação por pesticidas. Vários procedimentos baseados em SIG para prever a distribuição e o destino de pesticidas são encontrados na literatura (Verro et al., 2002; Schriever & Liess, 2007; Kattwinkel et al., 2011).

Inseridas nesse cenário, está a sub-bacia do rio Moju, localizada na Mesorregião do Baixo Amazonas, oeste do Estado do Pará. Atualmente, grande parte da paisagem onde está inserida esta sub-bacia, é caracterizada pela agricultura, com o uso de pesticidas alarmantemente difundido devido ao avanço da fronteira agrícola.

## **OBJETIVOS**

### **GERAL**

Estimar o risco potencial de contaminação por pesticidas na sub-bacia hidrográfica do Rio Moju, Baixo Amazonas, estado do Pará, utilizando uma metodologia de análise multicritério espacial com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas.

### **ESPECÍFICOS**

- Realizar a caracterização ambiental da sub-bacia hidrográfica;
- Identificar os pesticidas com maior potencial de contaminação;
- Identificar as áreas com risco potencial à contaminação por pesticidas;
- Produzir um mapa de risco de contaminação por pesticidas para a área de estudo, aplicando o uso de procedimentos baseados em SIG e uma metodologia de análise multicritérios.

## REFERÊNCIAS

- Galvêncio, J. D.; Ivan I. . S.; Magna S. B. de M.; Janes G. R., 2008. Determinação Das Características Físicas, Climáticas E Da Paisagem Da Bacia Hidrográfica Do Rio Brígida Com O Auxílio De Técnicas De Geoprocessamento E Sensoriamento Remoto. *Revista de Geografia*, v 24, (2), 83–96.
- Jacinto Junior, S. G., e E. M. P. de Lucena., 2022. Ecotoxicologia Ambiental: Utilização De Indicadores Biológicos E Índices Bióticos Para O Biomonitoramento Da Água De Ecossistemas Aquáticos. In *Meio ambiente e sociedade: análises, diálogos e conflitos ambientais*, 3o ed, 175–90. Fortaleza. <https://doi.org/10.51859/ampla.mas1051-12>.
- Kageyama, A., 2004. Desenvolvimento Rural: Conceito E Medida. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*. v. 21, (3), 379-408. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.231355>.
- Kattwinkel, M. Kühne, J. Kaarina, F. Liess, M., 2011. Climate change, agricultural insecticide exposure, and risk for freshwater communities. *Ecological Applications* 21 (6): 2068–81. <https://doi.org/10.1890/10-1993.1>.
- Londres, F. 2011., *Agrotóxicos no Brasil: Um guia para ação em defesa da vida*. Articulação Nacional de Agroecologia, Rio de Janeiro, 188 p.
- Marciel, R., e S. Dutra., 2017. Cerrado, revolução verde e evolução do consumo de agrotóxicos. *Sociedade & Natureza* v. 29, (3), 473–88. <https://doi.org/10.14393/SN-v29n3-2017-8>.
- Martin, E. S., *Agrotóxicos: intoxicações humanas e contaminação ambiental no projeto Rebojo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- Pelaez, V., F. H. B. Terra, e L. R. Silva., 2010. A regulamentação dos agrotóxicos no Brasil: entre o poder de mercado e a defesa da saúde e do meio ambiente. *Revista de Economia* v 36 (1), 27-48. <https://revistas.ufpr.br/economia/article/viewFile/20523/13714>.
- Pinheiro, A.; Flavie, C.; Pascal, K., 2009. Desenvolvimento de um Indicador de Risco de Contaminação das Águas Superficiais por Pesticidas: Aplicação a Bacia do Itajaí — Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v 14, (2001), 5–14.
- Pignati, et al., 2017. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: Uma ferramenta para a vigilância em saúde. *Ciência e Saúde Coletiva*. V 22, (10), 3281–93. <https://doi.org/10.1590/1413-812320172210.17742017>.
- Sala, S.; Vighi., M., 2008. GIS-based procedure for site-specific risk assessment of pesticides for aquatic ecosystems”. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v 69, (1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.06.015>.

Siqueira, J., I. Trannin, M. Ramalho, e E. Fontes., 2004. Interferências no agrossistema e riscos ambientais de culturas transgênicas tolerantes a herbicidas e protegidas contra insetos. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v 21, (1), 11–81.

Schriever, C.; A.; Liess, M., 2007. Mapping ecological risk of agricultural pesticide runoff”. *Science of the Total Environment*, v 384, (1–3), 264–79. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.019>.

Suguio, K., 2008. *Mudanças Ambientas da Terra*. Instituto Geológico, São Paulo, 336 p.

Teixeira, B. E. S., I. M. M. Cunha, e A. Terra., 2012. A expansão da fronteira agrícola da soja no município de Santarém (PA) e suas transformações socioespaciais. *XXI Encontro Nacional de Geografia Agrária*, no 1.

Veiga, D. P. B. da., 2017. O impacto do uso do solo na contaminação por agrotóxicos das águas superficiais de abastecimento público. *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo*. São Paulo.

Verro, R., M. Calliera, G. Maffioli, D. Auteri, S. Sala, A. Finizio, e M. Vighi., 2002. GIS-based system for surface water risk assessment of agricultural chemicals. 1. Methodological approach”. *Environmental Science and Technology* 36 (7): 1532–38. <https://doi.org/10.1021/es010089o>.

Williams, R. J., D. N. Brooke, P. Matthiessen, M. Mills, A. Turnbull, e R. M. Harrison., 1995. Pesticide Transport to Surface Waters within an Agricultural Catchment. *Water and Environment Journal*, v 9, (1), 72–81. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1995.tb00928.x>.

Younos, T. M., e D. L. Weigmann., 1988. Overview of Pesticide Effects and Pesticide Application in Virginia Agriculture. In *Virginia Water Resources Research Center Special Report*, 45.

**Capítulo I: Avaliação do risco de contaminação por pesticidas nas águas superficiais da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Moju – Baixo Amazonas**

Diego Neves SILVA  
Ruy Bessa LOPES

Avaliação do risco de contaminação por pesticidas nas águas superficiais da Sub-Bacia  
Hidrográfica do Rio Moju – Baixo Amazonas<sup>1</sup>

**RESUMO**

O consumo desenfreado de pesticidas na cadeia produtiva agrícola, contribui significativamente com a degradação ambiental, em suas diversas matrizes. No mosaico de ecossistemas aquáticos, encontrados na região do Amazônica, essa problemática se torna mais complexa, uma vez que a alta toxicidade de alguns pesticidas e o seu uso inadequado representam um grande e potencial risco de contaminação dos corpos d'água, ambiente que na maioria das vezes é o principal destino final dos pesticidas aplicados no campo. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial risco de contaminação por pesticidas em águas superficiais na sub-bacia hidrográfica do Rio Moju, na microrregião de Santarém no Baixo Amazonas, Estado do Pará. A avaliação foi feita com base nos critérios propostos pelo método GOSS, que considera as propriedades físico-químicas dos pesticidas: solubilidade em água ( $S_w$ ), o tempo de meia vida no solo ( $DT50_{solo}$ ) e o coeficiente de partição do contaminante entre água-solo corrigido pela concentração de carbono no solo ( $K_{oc}$ ). O levantamento dos pesticidas usados na lavoura temporária na região de estudo, revelou um número de vinte e dois princípios ativos mais utilizados. Os dados relacionados aos pesticidas foram obtidos com base em bancos de dados de livre acesso e na literatura (discriminar no texto (material e métodos) como ocorreu o processo de busca pelas referências e se você usou bases de dados). Os resultados indicam que dos vinte e dois princípios ativos avaliados, dose (seriam dois ...) apresentam alto potencial de contaminação para águas superficiais, sem levar em consideração a mobilidade no ambiente. Os resultados obtidos podem ser utilizados como subsídio para um monitoramento com maior acurácia dos pesticidas aplicados na microrregião de Santarém pois apontam quais substâncias merecem uma maior atenção de acordo com o seu potencial de contaminação.

**Palavras-Chaves:** Agricultura, Meio Ambiente, Ecossistema Aquático, Método GOSS

---

<sup>1</sup> O artigo apresentado foi redigido conforme as diretrizes de submissão da Revista Brasileira de Ciências Ambientais. As normas indicadas para a redação de artigos pela revista estão disponíveis no link: <[http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes\\_RBCIAMB/about/submissions](http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/about/submissions)>.

Pesticide risk assessment in the waters of the Moju Campos River Sub-Basin – Lower  
Amazon

**ABSTRACT**

The unbridled consumption of pesticides in the agricultural production chain contributes significantly to environmental degradation, in its various matrices. In aquatic ecosystems, found abundantly in the Amazon region, this problem becomes more complex, since the high toxicity of some pesticides and their inappropriate use represent a great and potential risk of contamination of water bodies, an environment that in most often the main final destination of pesticides applied in the field. the main scope of this study was to evaluate the contamination potential risk of contamination by pesticides in surface waters in the Moju River sub-basin, in the Santarém micro-region in Baixo Amazonas, state of Pará. The evaluation was based on the criteria proposed by the GOSS method, which considers the physicochemical properties of pesticides: water solubility ( $S_w$ ), soil half-life ( $DT_{50soil}$ ) and the contaminant partition coefficient between water- soil corrected by soil organic matter ( $K_{oc}$ ). The survey of pesticides indicated a number of twenty-two active principles most used in monocultures in the region. Data related to pesticides were obtained from freely accessible databases and specific literature. The results indicate that of the twenty-two active principles evaluated, 59% have a high potential for contamination for surface waters in general, without taking into account the form of transport, dissolved in water or associated with sediment. The results obtained can be used as a subsidy for a more accurate monitoring of pesticides applied in the Santarém microregion, as they indicate which substances deserve greater attention according to their contamination potential.

**Keywords:** Agriculture, Environment, Aquatic Ecosystem, GOSS Method

## INTRODUÇÃO

A agricultura moderna tem como um de seus pilares a utilização massiva de pesticidas durante parte considerável dos ciclos culturais. Os pesticidas tem como finalidade evitar e controlar a ocorrência de organismos que no contexto agrícola são considerados pragas. Dentre os produtos utilizados destacam-se principalmente os herbicidas, os inseticidas e os fungicidas, que juntos representam aproximadamente 95% de todo o montante de pesticidas comercializados mundialmente (Jardim et al., 2009).

O uso de pesticidas de forma excessiva e sem a devida orientação técnica, contribuem grandemente para os processos que causam contaminação da água e do solo, além de causar efeitos deletérios à organismos não alvo, afetando a biodiversidade, a cadeia alimentar e os ecossistemas aquáticos e terrestres. (Soares 2010; Langaro & Lima, 2015).

Os ecossistemas aquáticos são considerados os principais destinos finais dos resíduos de pesticidas aplicados no campo, podendo uma molécula atingir esse ambiente através de vários meios, com destaque para a deriva de pulverização, causada pela ação de ventos que ocorrem durante as aplicações e pelo escoamento superficial ou “*runoff*”, considerado a principal via de deslocamento de pesticidas para fora das lavouras (Pessoa-de-Souza et al., 2017; Williams et al., 1995; Mattos & Silva, 1999).

Outro fator que contribui para a problemática da contaminação é o fato de que grande parte dos pesticidas utilizados apresentam média e alta toxicidade, circunstância essa que unida ao seu uso inadequado, representam um grande risco de contaminação o que pode comprometer os ecossistemas locais e a saúde humana (Younos & Weigmann, 1988).

Dependendo das características do meio ambiente como: temperatura, velocidade do vento, características do solo, (CTC, pH, matéria orgânica, teor de argila) e das propriedades físico-químicas das moléculas como: a solubilidade em água ( $S_w$ ), o coeficiente de partição do contaminante entre água-solo corrigido pela matéria orgânica do solo ( $K_{oc}$ ), tempo de meia vida no solo e na água (DT50), os pesticidas que atingem o ambiente aquático podem sofrer uma série de interações, as mais importantes envolvem o sedimento do fundo e o material particulado em suspensão na água (Marques et al., 2010; Guarda et al., 2020).

Embora as concentrações de pesticidas encontradas nos ambientes aquáticos sejam consideradas baixas com relação às concentrações encontradas no solo, altas concentrações podem ser encontradas após fortes chuvas com escoamento superficial, que dependendo das características edafoclimáticas da região, podem ocorrer em grande escala. Cabe ressaltar que,

as coleções de água amazônicas são marcadamente ácidas, da mesma forma que ocorre na maioria dos solos da região, fator esse que muito contribui para a persistência de pesticidas de moléculas polares nos corpos d'água (Martins et al., 2013).

Outra característica importante da região é o clima quente e úmido, com um período longo de chuvas durante o ano. Esses e outros fatores contribuem para as interações dos pesticidas com o meio ambiente, gerando risco de contaminação. (Pessoa-de-Souza et al., 2017; Williams et al. 1995).

Nesse contexto, está inserida a sub-bacia hidrográfica do Rio Moju, que abrange parte da área dos três municípios da região metropolitana de Santarém, O cenário da área de estudo é fortemente caracterizado pela prática intensiva de agricultura, com predominância de monocultivos, como é o caso da cultura da soja, principal lavoura temporária comercial praticada na região.

Portanto, o uso inadequado de pesticidas nas atividades agrícolas, tem gerado grande preocupação no que diz respeito ao alto risco que algumas substancias oferecem à manutenção da qualidade e do equilíbrio dos ecossistemas aquáticos, pois podem afetar diretamente a ictofauna, assim como outros organismos fundamentais para o equilíbrio dos ecossistemas, como fitoplânctons, algas e bentos, que além de serem a base da cadeia alimentar de vários peixes, também são importantes produtores de oxigênio e biomassa (Grego et al., 2009).

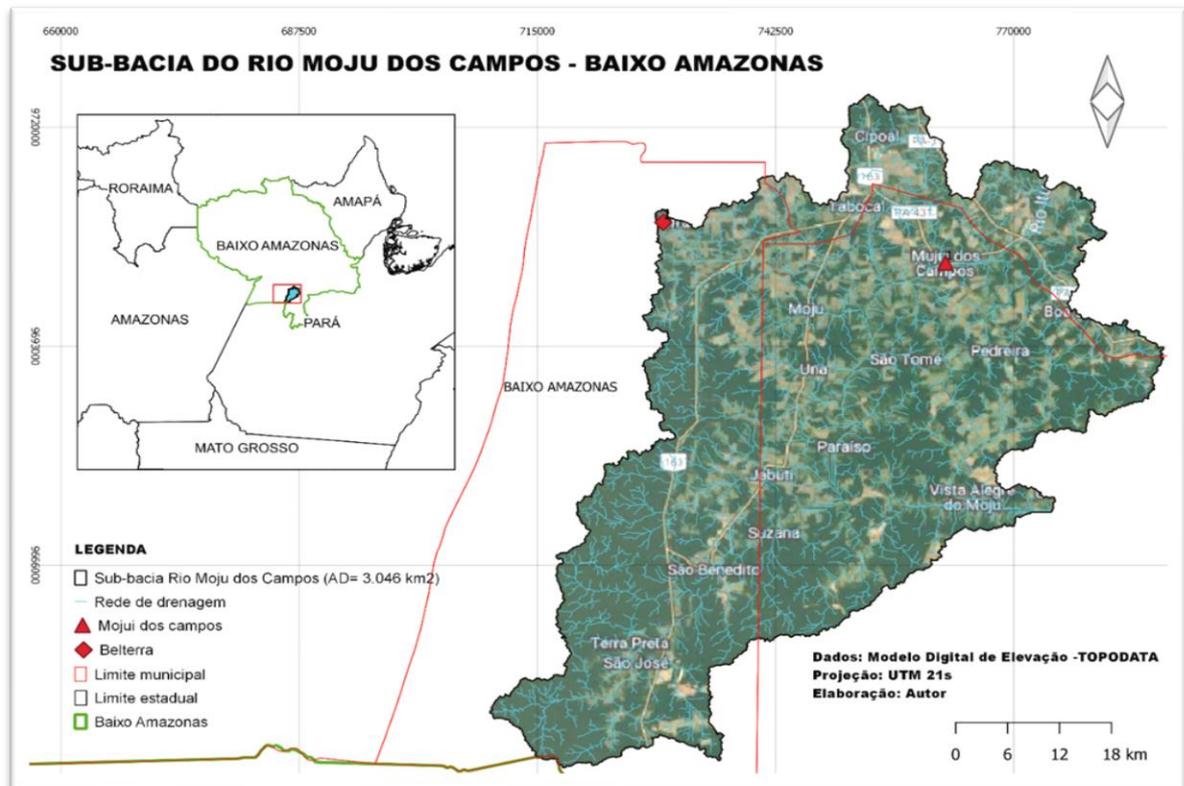
A aplicação do método Goss para avaliar o potencial de contaminação de pesticidas, surge como uma alternativa viável para uma investigação prévia, tendo em vista que a quantificação de substancias químicas envolve métodos analíticos complexos e dispendiosos, já o método Goss, permite que essa avaliação seja feita de forma preliminar levando em conta critérios de fácil obtenção (Soares et al., 2019).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o risco de contaminação apresentado pelos pesticidas mais utilizados na região, através da aplicação do método GOSS, que permite indicar quais compostos apresentam baixo, médio ou alto potencial de contaminação de águas superficiais. Desta forma, contribuindo para elaboração de um planejamento para estudos mais específicos de monitoramentos de pesticidas na região.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### ***Caracterização da área de estudo***

Figura 1 – Mapa de localização da sub-bacia do Rio Moju.



Fonte – Autor do estudo. –

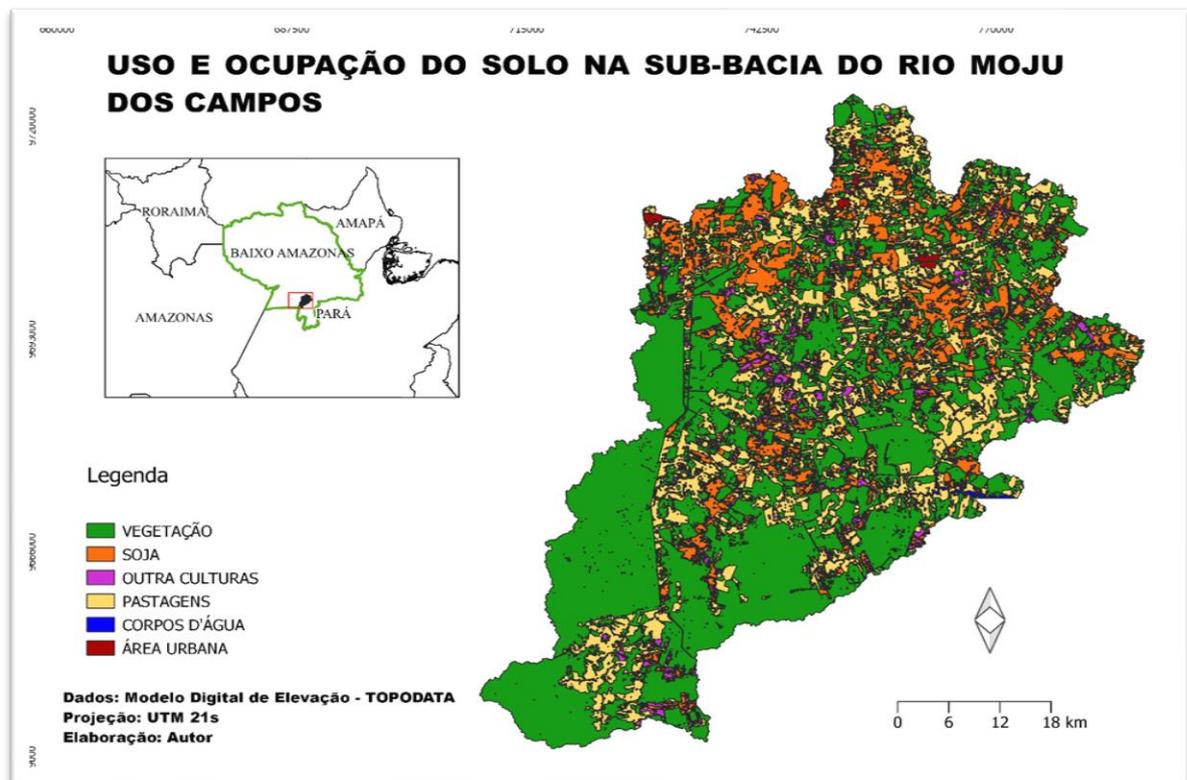
A sub-bacia hidrográfica do Rio Moju (Figura 1), com uma área de drenagem de 3.046 km<sup>2</sup> está localizada na região metropolitana de Santarém, composta pelos municípios de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos que formam, juntamente com os municípios de Alenquer, Curuá, Monte Alegre, Placas e Prainha a microrregião de Santarém pertencente à mesorregião do Baixo Amazonas. Para efeito de melhor compreensão, neste trabalho a área de estudo foi identificada como microrregião de Santarém.

Köppen e Geiger (1948) classificam o clima da região como tipo “Ami” com características de clima tropical, quente e úmido, sem estação fria e com temperaturas médias que oscilam entre a mínima de 25°C e máxima de 31°C. Essa região apresenta umidade relativa do ar em torno de 80%, com dois períodos distintos, um seco e o outro chuvoso cuja pluviosidade média anual é de 2150 mm distribuídos ao longo do ano.

O Rio Moju, assim como os demais rios da região representam um importante fator socioeconômico, tendo em vista o modo de vida da população local, que os utiliza tanto para pesca de subsistência quanto para o transporte de pessoas e mercadorias, atividades turísticas, além da captação do recurso hídrico para o consumo humano e consumo animal.

A área de estudo é caracterizada pela presença de grandes áreas de cultivos agrícolas (Figura 2). Os monocultivos se destacam devido ao importante papel econômico para a região

Figura 2: Mapa de uso e ocupação do solo na Sub-Bacia do Rio Moju, na microrregião de Santarém.



Fonte: Autor do estudo.

e ocupam extensas áreas, tendo a soja e o milho como as principais culturas temporárias cultivadas na região.

### ***Pesticidas avaliados no estudo***

Todos os dados necessários para o desenvolvimento desse trabalho foram obtidos em bancos de dados de livre acesso e/ou acesso público, assim como, com o auxílio de trabalhos desenvolvidos por pesquisadores parceiros. Para tanto, a obtenção das informações referentes aos pesticidas mais utilizados na área de estudo foi feita com base no estudo realizado por Ribeiro (2021), que avaliou no período de 2013 à 2016, os receituários agrônômicos disponibilizados pela Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará – ADEPARA combinados a dados primários obtidos por meio de visitas junto à estabelecimentos comerciais e à prestadoras de serviço técnico, além de consulta à profissionais que trabalham na microrregião de Santarém para a identificação de quais pesticidas são os mais utilizados nas lavouras de culturas temporárias na região.

Com base no levantamento dos registros da utilização de pesticidas na área de estudo, chegou-se a um total de vinte e dois ingredientes ativos aplicados nos cultivos praticados na região. Deste total, 27% são herbicidas, 36% inseticidas e 36% fungicidas.

### ***Propriedades Físico-químicas***

As propriedades físico-químicas dos pesticidas são características intrínsecas das moléculas através das quais é possível estimar o risco de contaminação oferecido por pesticidas ao meio ambiente. Em ambientes aquáticos, o risco é calculado através do emprego de alguns modelos simplificados, como é o caso do Índice GUS, utilizado para a identificar os pesticidas que oferecem risco de contaminação por lixiviação em águas subterrâneas e o Método GOSS, aplicado nesse trabalho, utilizado para analisar o risco de contaminação por pesticidas em águas superficiais.

As propriedades físico-químicas de uma molécula pesticida são várias, porém apenas 3 foram necessárias como informações básicas (Tabela 1) para uso nesse trabalho: a solubilidade em água ( $S_w$ ), o tempo de meia vida no solo ( $DT50_{solo}$ ) e o coeficiente de partição do contaminante entre água-solo corrigido pela matéria orgânica do solo ( $K_{oc}$ ). Estas propriedades foram empregadas para classificar os pesticidas de acordo com as determinações dos critérios de avaliação de águas superficiais usadas pelo método GOSS. Os valores de referência das propriedades empregadas foram retirados da literatura (Guarda et al., 2020; Santos et al., 2021; Brito et al., 2001; Soares et al., 2019).

**Tabela 1 – Propriedades físico-químicas, relevantes para o estudo, dos pesticidas mais utilizados na microrregião de Santarém.**

Ingrediente Ativo	Classe	$DT50_{solo}$ (d)	$K_{oc}$ (mL.g <sup>-1</sup> )	$S_w$ (mg.L <sup>-1</sup> )
glifosato	Herbicida	16.1	21.699	100.000
2,4-d	Herbicida	4.4	56	24.300
epoxiconazol	Fungicida	70	1.073	353.5
paraquat	Herbicida	3.000	1.000.000	620.000
metomil	Inseticida	7	25	55.000
azoxistrobina	Fungicida	78	423	6.7
beta-ciflutrina	Inseticida	33	100.000	0.0066
protioconazol	Fungicida	14.1	1.745	22.5
tiofanato-metilico	Fungicida	0.5	1.830	18.5
clorpirifós	Inseticida	50	8.151	1.05
carfentrazona-etílica	Herbicida	1	-	29.3
carbendazim	Fungicida	40	400	8
aminopiralide	Herbicida	35	-	2.480

ciproconazol	Fungicida	142	390	93
picloram	Herbicida	82.8	16	488
acetamiprido	Inseticida	1.6	107	2.950
cipermetrina	Inseticida	22.1	85.572	0.009
abamectina	Inseticida	30	5.638	1.21
clorotalonil	Fungicida	22	850	0.81
acefato	Inseticida	3	2	790.000
atrazina	Inseticida	75	100	35
mancozebe	Fungicida	0.1	988	6.2

**Fonte: Adaptado Goss (1992).**

### *Risco de contaminação nas águas superficiais*

Os vinte e dois pesticidas analisados foram classificados em alto, médio ou baixo potencial de acordo com um conjunto de critérios tais como a meia vida da substância no solo ( $DT50_{solo}$ ), o coeficiente de partição do contaminante entre água-solo corrigido pela matéria orgânica do solo ( $K_{oc}$ ) e a solubilidade em água ( $S_w$ ) em função do transporte dos pesticidas adsorvidos ao sedimento do fundo ou solubilizados em água (Tabela 2).

As substâncias cujos valores das características físico-químicas não se enquadraram em nenhum dos critérios propostos pelo método, ou seja, aquelas substâncias em que suas propriedades atendem parcialmente aos intervalos matemáticos estabelecidos pelos outros níveis (alto e baixo potencial), foram consideradas como tendo médio potencial para contaminação de águas superficiais.

O coeficiente de partição do contaminante entre água-solo corrigido pela matéria orgânica do solo ( $K_{oc}$ ) indica o potencial de mobilidade de uma molécula pesticida no solo. Da mesma forma, o tempo de meia-vida no solo ( $DT50_{solo}$ ) tem como objetivo indicar as condições e o tempo em dias que um pesticida consegue permanecer móvel, através da análise de variáveis ambientais como clima e solo. A alta solubilidade em água ( $S_w$ ) de algumas moléculas indicam a probabilidade de um pesticida ser removido do solo, como por exemplo o caso de alguns herbicidas como o glifosato e o paraquat e dos inseticidas metomil e acefato, que apresentam maior tendência de serem transportados via escoamento superficial em ocasião das chuvas e consequentemente atingirem os corpos d'água.

De acordo com (Ferracini et al., 2001) a interação dos pesticidas como o meio físico muitas vezes dificulta a avaliação do comportamento de determinados pesticidas, uma vez que as propriedades físico-químicas dessas substâncias interagem com as propriedades do solo, por exemplo, tais como o teor de matéria orgânica, o potencial de erosão e as propriedades hidráulicas.

**Tabela 2 – Classificação do potencial de transporte dos pesticidas utilizados na área de estudo quanto ao risco de contaminação em águas superficiais pelo método GOSS.**

Potencial transporte de pesticidas dissolvido em água			
	.....DT50 <sub>solo</sub> (d)	.....K <sub>oc</sub> (mL.g <sup>-1</sup> )	.....Sw (mg.L <sup>-1</sup> )
Alto Potencial	> 35	< 100.000	≥ 1
	< 35	≤ 700	≥ 10 e ≤ 100
Baixo Potencial	-	≥ 100.000	-
	≤ 1	≥ 1.000	-
	< 35	-	< 0.5
Potencial transporte de pesticidas dissolvido no sedimento			
	DT50 <sub>solo</sub> (d)	K <sub>oc</sub> (mL.g <sup>-1</sup> )	Sw (mg.L <sup>-1</sup> )
Alto Potencial	≥ 40	≥ 1.000	-
	≥ 40	≥ 500	≤ 0.5
Baixo Potencial	< 1	-	-
	≤ 2	≤ 500	-
	≤ 4	≤ 900	≥ 0.5
	≤ 40	≤ 500	≥ 0.5
	≤ 40	≤ 900	≥ 2

**Fonte: Adaptado de GOSS (1992)**

A exemplo disso (Goss, 1992) cita que os solos orgânicos, onde raramente ocorre o transporte horizontal de pesticidas apolares via escoamento superficial, tendo em vista que pesticidas com valor de K<sub>oc</sub> acima de 300 mL.g<sup>-1</sup> são fortemente adsorvidos pela matéria orgânica. Dessa forma, o potencial de transporte de pesticidas via escoamento superficial e consequentemente o risco de contaminação depende fortemente da interação entre os pesticidas, o solo e o clima, além dos fatores de manejo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Potencial de contaminação de águas superficiais*

Por meio da classificação dos pesticidas apresentados na Tabela 3, a partir da análise das propriedades físico químicas de cada pesticida utilizando os critérios proposto pelo método GOSS observou-se que, dentre os princípios ativos avaliados no estudo, 27% apresentaram baixo potencial de contaminação pelo transporte associado ao sedimento, dentre estes os inseticidas: metomil, acetamiprido e acefato; o herbicida: 2,4-D e os fungicidas: carbendazim e cloratonil, já para o transporte dissolvido em água, nenhum princípio ativo apresentou baixo potencial de contaminação para águas superficiais.

De acordo com o método GOSS, dos vinte e dois pesticidas avaliados no estudo, treze, ou seja, 59% foram classificados como tendo médio potencial de contaminação quando associados ao sedimento, sendo estes os inseticidas: clorpirifós, abamectina e atrazina; os

herbicidas: glifosato, carfentrazona-etílica, aminopiralde e picloram; e os fungicidas: epoxiconazol, azoxistrobina, prothioconazol, tiofonato-metílico, ciproconazol e mancozebe.

Treze pesticidas foram também classificados com tendo médio potencial de contaminação quando transportados dissolvidos em água sendo estes os inseticidas: metomil, beta-ciflutrina, acetamiprido e cipermetrina; os herbicidas: glifosato, 2,4-D, dicloreto deparaquat, carfentrazona-etílica e aminopiralde; e os fungicidas: prothioconazol, tiofonato-metílico, clorotalonil e mancozebe.

Dos princípios ativos avaliados 54.5% apresentaram um alto potencial de contaminação para águas superficiais. Quando avaliado o potencial de contaminação dos pesticidas associados ao sedimento e transportadas via escoamento superficial, 13.6% apresentaram um alto potencial de contaminação associados ao sedimento, sendo estes os herbicidas paraquat, beta-ciflutrina e cipermetrina. Já 40.9% dos princípios ativos avaliados, apresentaram alto potencial de contaminação, quando transportados dissolvidos em água, sendo estes os inseticidas: clorpirifós, abamectina, acefato e atrazina; o herbicida picloram; e os fungicidas: epoxiconazol, azoxistrobina, carbendazim e ciproconazol.

Silva & Milhome (2019) avaliando o risco de contaminação por pesticidas em águas superficiais pelo método GOSS observaram que dentre os princípios ativos avaliados, o paraquat foi classificado com alto potencial de contaminação quando transportado associado ao sedimento, e a atrazina com alto potencial de contaminação quando transportado dissolvido em água, essa informação é um dado importante para os órgãos de gestão ambiental, tendo em vista que algumas substâncias como a atrazina, um dos herbicidas s mais utilizados globalmente, também é o herbicida mais encontrado em corpos d'água distribuídos pelo mundo (Prata, 2002; Langenbach et al., 2000).

**Tabela 3 – Avaliação do potencial de contaminação por pesticidas em águas superficiais da sub-bacia do Rio Moju na microrregião de Santarém-PA pelos critérios do MÉTODO GOSS.**

Princípio ativo	Potencial de transporte associado ao sedimento				Potencial de transporte dissolvido em água			
	Critério				Critério			
	DT5 <sub>solo</sub> (d)	K <sub>oc</sub> (mL.g <sup>-1</sup> )	Sw (mg.L <sup>-1</sup> )	P.C.	DT5 <sub>solo</sub> (d)	K <sub>oc</sub> (mL.g <sup>-1</sup> )	Sw (mg.L <sup>-1</sup> )	P.C.
Glifosato	NA	NA	NA	MP	NA	NA	NA	MP
2,4-d	≤ 40	≤ 900	≥ 2	BP	NA	NA	NA	MP
Epoxiconazol	NA	NA	NA	MP	> 35	100.000	≥ 1	AP
Paraquat	≥ 40	≥ 1.000	-	AP	NA	NA	NA	MP
Metomil	≤ 40	≤ 900	≥ 2	BP	NA	NA	NA	MP
Azoxistrobina	NA	NA	NA	MP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
beta-ciflutrina	≥ 40	≥ 500	≤ 0.5	AP	NA	NA	NA	MP
Protioconazol	NA	NA	NA	MP	NA	NA	NA	MP
tiofanato-metilico	NA	NA	NA	MP	NA	NA	NA	MP
Clorpirifós	NA	NA	NA	MP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
carfentrazona-etílica	NA	NA	NA	MP	NA	NA	NA	MP
Carbendazim	≤ 40	≤ 900	≥ 2	BP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
Aminopiralide	NA	NA	NA	MP	NA	NA	NA	MP
ciproconazol	NA	NA	NA	MP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
Picloram	NA	NA	NA	MP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
Acetamiprido	≤ 4	≤ 900	≥ 0.5	BP	NA	NA	NA	MP
Cipermetrina	≥ 40	≥ 500	≤ 0.5	AP	NA	NA	NA	MP
Abamectina	NA	NA	NA	MP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
Clorotalonil	≤ 40	≤ 900	≥ 2	BP	NA	NA	NA	MP
Acefato	≤ 4	≤ 900	≥ 0.5	BP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
Atrazina	NA	NA	NA	MP	> 35	< 100.000	≥ 1	AP
Mancozebe	NA	NA	NA	MP	NA	NA	NA	MP

AP: Alto potencial de contaminação; MP: Médio potencial de contaminação; BP: Baixo potencial de contaminação; NA: Não se aplica; P.C.: Potencia de contaminação; - Critério não exigido

Ao se considerar as características de clima e de solo da microrregião de Santarém e por se tratar de uma região de fronteira agrícola onde a lavoura temporária cresce a cada ano, o risco de contaminação das águas superficiais não pode ser ignorado. Soma-se a este fator de risco, o fato de que 59% dos pesticidas avaliados apresentaram um alto potencial de contaminação, seja associado ao sedimento ou dissolvidos na água.

Pesticidas com médio a alto valor de  $DT_{50}$  e baixo valor de  $K_{oc}$  como o herbicida picloram, o inseticida atrazina e o fungicida ciproconazol, que apresentam alto potencial de contaminação da água (Tabela 4), são considerados prioritários no monitoramento ambiental, tendo em vista que suas características indicam uma persistência maior no meio ambiente e baixa capacidade de serem retidos pelos colóides do solo, o que influencia diretamente nos efeitos de fatores como a biodegradabilidade e bioacumulação (Canuto et al., 2010).

Em estudos utilizando o método GOSS, avaliaram o potencial de contaminação para as águas superficiais e mostram que os pesticidas com baixa solubilidade em água, com baixo coeficiente de partição água-solo corrigido pela matéria orgânica do solo e longa persistência dos pesticidas no solo, apresentam um maior risco de contaminação pelo transporte associado ao sedimento ou dissolvido em água, tal como foi observado para algumas substâncias nesse estudo, como o picloram, a abamectina, o clorpirifós, a cipermetrina, dentre outros. Todos amplamente utilizados nas culturas da região de estudo (Menezes, 2006; Cabrera et al., 2008; Silva e Milhome, 2019; Da Silva et al. 2009).

**Tabela 4 – Distribuição dos pesticidas utilizados na área de estudo quanto ao risco de contaminação em águas superficiais pelo método GOSS.**

<b>Análise do Risco de Contaminação em Água Superficial pelo Método de GOSS</b>		
	<b>Risco</b>	<b>Princípio ativo</b>
Associado ao sedimento	Alto potencial	paraquat <sup>1</sup> , beta-ciflutrina <sup>1</sup> e cipermetrina <sup>1</sup> .
	Médio potencial	glifosato <sup>1</sup> , picloram <sup>1</sup> , aminopiralide <sup>1</sup> , carfentrazona-etílica <sup>1</sup> , clorpirifós <sup>2</sup> , abamectina <sup>2</sup> , atrazina <sup>2</sup> , mancozebe <sup>3</sup> , epoxiconazol <sup>3</sup> , azoxistrobina <sup>3</sup> , protioconazol <sup>3</sup> , tiofonato-metílico <sup>3</sup> e ciproconazol <sup>3</sup> .
	Baixo potencial	2,4-D <sup>1</sup> , metomil <sup>2</sup> , carbendazim <sup>3</sup> , acetamiprido <sup>2</sup> , acefato <sup>2</sup> e clorotalonil <sup>3</sup> .
Dissolvido em água	Alto potencial	picloram <sup>1</sup> , abamectina <sup>2</sup> , atrazina <sup>2</sup> , clorpirifós <sup>2</sup> , epoxiconazol <sup>3</sup> , azoxistrobina <sup>3</sup> , carbendazim <sup>3</sup> , ciproconazol <sup>3</sup> e clorotalonil <sup>3</sup> .
	Médio potencial	paraquat <sup>1</sup> , aminopiralide <sup>1</sup> , carfentrazona-etílica <sup>1</sup> , metomil <sup>2</sup> , beta-ciflutina <sup>2</sup> , acetamiprido <sup>2</sup> , cipermetrina <sup>2</sup> , protilconazol <sup>3</sup> , tiofonato-metílico <sup>3</sup> , clorotalonil <sup>3</sup> e mancozebe <sup>3</sup> .

---

Baixo  
potencial

---

-----

<sup>1</sup>-herbicidas; <sup>2</sup>-inseticidas e <sup>3</sup>-fungicidas.

## CONCLUSÃO

Mais da metade dos pesticidas avaliados oferece um alto risco de contaminação para os corpos d'água da região, indicativo que serve de alerta para gestores públicos, tendo em vista que devido ao alto risco de contaminação que estas substâncias oferecem não só para o meio ambiente, mas como para a saúde pública. Portanto é de interesse coletivo que substâncias identificadas como potenciais contaminantes do sistema aquático recebam especial atenção no que diz respeito às ações de monitoramento ambiental.

## REFERÊNCIAS

- Brito, N. M.; Amarante JR. O. P. de; Abakerli, R. 2001. Risco De Contaminação De Águas Por Pesticidas Aplicados Em Plantações De Eucaliptos E Coqueiros: Análise Preliminar. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v 11, 93–104. <https://doi.org/10.5380/pes.v11i0.3138>.
- Cabrera, L.; Costa, F. P.; Primel, E. G. 2008. Estimativa de risco de contaminação das águas por pesticidas na região sul do estado do RS. *Quimica Nova*, v 31, (8), 1982–86. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422008000800012>.
- Canuto, T. G.; Gama, A. F.; Barreto, F. M. De S.; Alencar, N.; Franca, M. Da. 2010. Estimativa Do Risco Potencial De Contaminação Por Pesticidas De Águas Superficiais E Subterrâneas Do Município De Tianguá-Ce , Com Aplicação Do Método de Goss e Índice de GUS. *Águas Subterrâneas*. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23083>.
- Da Silva, D. R. O.; De Ávila, L. A.; Agostinetto, D.; Dal Magro, T.; De Oliveira, E.; Zanella, R.; Noldin, J. A., 2009. Monitoramento de agrotóxicos em águas superficiais de regiões orizícolas no sul do Brasil”. *Ciência Rural*, 39, (9), 2383–89. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782009000900001>.
- Ferracini, V. L.; Pessoa, M. C. Y. P.; Silva, A. S.; Spadotto, C. A. 2001. Análise De Risco De Contaminação Das Águas Subterrâneas E Superficiais Da Região De Petrolina (Pe) E Juazeiro (Ba). *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v 11, 1–16. <https://doi.org/10.5380/pes.v11i0.3131>.
- Goss, Don W. 1992. Screening Procedure for Soils and Pesticides for Potential Water Quality Impacts Author ( s ): Don W . Goss Published by : Cambridge University Press on behalf of the Weed Science Society of America Stable. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/3987238> REFERE” 6 (3): 701–8.
- Grego, C. K. Da S.; Feitosa, F. A. Do N.; Da Silva, M. H.; Cunha, M. Da G. G. Da S.; Filho, G. A. N. 2009. Fitoplâncton do ecossistema estuarino do rio Ariquindá (Tamandaré, Pernambuco, Brasil): Variáveis ambientais, biomassa e produtividade primária. *Atlântica*, v 31, (2), 183–98. <https://doi.org/10.5088/atl.2009.31.2.183>.
- Guarda, P. M.; Pontes, A. M. S.; Domiciano, R. De S.; Larissa, S.; Guarda, E. A. 2020. Avaliação da contaminação por pesticidas nos sedimento do Rio Formoso no estado do Tocantins. <http://dx.doi.org/10.20873/uftsupl2020-8732>
- Jardim, I. C. S. F.; Andrade, J. De A.; Queiroz, S. C. Do N., 2009. Resíduos de agrotóxicos em alimentos: uma preocupação ambiental global - um enfoque às maçãs. *Quimica Nova*, V 32, (4), 996–1012. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000400031>.
- Köppen, W.; Geiger, R. 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes.
- Langaro, A. P.; Lima, D. M. De V. 2015. Agrotóxicos: avaliação de periculosidade e

impactos negativos. Anais do 12º ENIC / Ciências Agrárias, (6). Recuperado de <https://anaisonline.uems.br/index.php/enic/article/view/2238>

Langenbach, T.; Schroll, R.; Paim, S. 2000. Fate and distribution of <sup>14</sup>C-atrazine in a tropical oxisol. *Chemosphere*, v 40, (5), 449–55. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00244-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00244-1).

Mattos, L. M.; Silva, E. F., 1999. Influência das propriedades de solos e de pesticidas no potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas. *Pesticidas: Rev. Ecotox. Meio Amb.* v 9, 103. <http://dx.doi.org/10.5380/pes.v9i0.39642>

Marques, J. D. De O.; Teixeira, W.G.; Reis, A. M.; Junior, O. F. C.; Salomao, MM. B.; Afonso, M. A. C. B. 2010. Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. *Acta Amazonica*, v 40, (1), 1–12. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672010000100001>.

Martins, C. R.; Lopes, W. A.; De Andrade, J. B. 2013. Solubilidade das substâncias orgânicas. *Química Nova*, v 36, (8), 1248–55. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000800026>.

Menezes, C. T. 2006. Método para priorização de ações de vigilância da presença de agrotóxicos em águas superficiais: um estudo em Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 132. Recuperado de <http://hdl.handle.net/1843/ENGD-6UYHQV>.

Pessoa-de-Souza, M. A., Ribeiro e Barros, M. da C., Gonçalves, L. M., Mesquita, G. M., & Gonçalves, H. M. 2017. Remoção de agrotóxicos por escoamento superficial – Princípios e práticas Pesticides off site by runoff – Principles and practices. *Caderno de Ciências Agrárias*, v 9, (3), 119–25. Recuperado de <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/2972>

Prata, F., 2002. Comportamento do glifosato no solo e deslocamento de miscível de atrazina. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz, São Paulo, 149.

Ribeiro, J. S. 2021. Cenário de uso, consumo e classificação de risco dos agrotóxicos na nova fronteira agrícola do Oeste do Pará. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém-PA.

Santos, C. E.; Mancuso, M. A.; Toebe, M., 2021. Mapeamento do potencial de contaminação das águas subterrâneas e superficiais por agrotóxicos no noroeste do Rio Grande do Sul. *Revista Geociências UESP*, v 40 (4), 951–66. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i04.15459>

Silva, L. L. Da.; Milhome, M. A. L., 2019. Investigação do potencial de contaminação por agrotóxicos de diferentes classes em mananciais situados na bacia do baixo Jaguaribe-CE, v 1, 1–7.

Soares, A. F. S.; Silva, L. F. De M.; Araújo, B. J. R. S. 2019. Estimativa de risco de contaminação das águas por agrotóxicos aplicados na cana-de-açúcar: estudo de caso em Limeira do Oeste – MG. *Ciênc. saúde coletiva*, v 24, (12), 1-9. <https://doi.org/10.1590/1413-812320182412.27762017>

Soares, W. L., 2010. Uso dos agrotóxicos e seus impactos à saúde e ao ambiente: uma avaliação integrada entre a economia, a saúde pública, a ecologia e a agricultura. Tese de Doutorado, Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro.

Williams, R. J., D. N. Brooke, P. Matthiessen, M. Mills, A. Turnbull, e R. M. Harrison., 1995. Pesticide Transport to Surface Waters within an Agricultural Catchment. *Water and Environment Journal*, v 9, (1), 72–81. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1995.tb00928.x>.

Younos, T. M., e D. L. Weigmann., 1988. Overview of Pesticide Effects and Pesticide Application in Virginia Agriculture. In *Virginia Water Resources Research Center Special Report*, 45.

**CAPÍTULO II: O Uso de sistema de informações geográficas para estimar o risco de contaminação por pesticidas utilizando avaliação multicritério em uma Sub-bacia hidrográfica sob influência de agricultura intensiva<sup>1</sup>**

Diego Neves SILVA  
Ruy Bessa LOPES  
Rodolfo Maduro ALMEIDA

---

<sup>1</sup> O artigo apresentado foi redigido conforme as diretrizes de submissão da Revista Brasileira de Ciências Ambientais. As normas indicadas para a redação de artigos pela revista estão disponíveis no link: <[http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes\\_RBCIAMB/about/submissions](http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/about/submissions)>.

Uso de sistema de informações geográficas para estimar o risco de contaminação por pesticidas utilizando análise multicritério em uma Sub-bacia hidrográfica sob influência de agricultura intensiva<sup>2</sup>

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal prever, através da elaboração de um mapa temático, quais as áreas da sub-bacia do Rio Moju em Mojuí dos Campos-PA são mais susceptíveis ao risco de contaminação por pesticidas, utilizando como ferramentas o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e uma metodologia baseada em análise multicritérios. Este trabalho foi realizado na forma de uma pesquisa qualitativa-quantitativa e descritiva. Nesse sentido, como parte do processo de análise multicritério, buscou-se identificar, através da posição/opinião de especialistas nos temas abordados, através de uma consulta em suas publicações científicas, quais variáveis ou critérios mais contribuíam para o processo de contaminação. Os critérios principais escolhidos foram: uso e ocupação do solo; pedologia ou tipos de solo, declividade, fluxo acumulado e teor de argila no solo. Para tanto, elaborou-se um banco de dados contendo informações relacionadas às características paisagísticas da área de estudo e através do uso das ferramentas SIG, fez-se a integração dos dados obtendo como resultado final um mapa temático do risco de contaminação por pesticidas. Observou-se que o critério que mais contribui para o processo de contaminação é o uso e ocupação do solo, e áreas que oferecem maior risco de contaminação são justamente as áreas onde predominam os monocultivos de soja e milho.

Palavras-chave: Geotecnologias, Avaliação Multicritério, Agrotóxicos, Risco Ambiental.

---

<sup>2</sup> O artigo apresentado foi redigido conforme as diretrizes de submissão da Revista Brasileira de Ciências Ambientais. As normas indicadas para a redação de artigos pela revista estão disponíveis no link: <[http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes\\_RBCIAMB/about/submissions](http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/about/submissions)>.

Use of a geographic information system to estimate the risk of contamination by pesticides using multi-criteria assessment in a watershed under the influence of intensive Agriculture

**ABSTRACT:**

The main objective of the present research is to predict, through the elaboration of a thematic map, which areas of the Moju River sub-basin in Mojuí dos Campos-PA are more susceptible to the risk of contamination by pesticides, using the Information System as tools. Geographical Analysis (GIS) and a methodology based on multi-criteria analysis. This work was carried out in the form of a qualitative-quantitative and descriptive research. In this sense, as part of the multi-criteria analysis process, it was sought to identify, through the position/opinion of experts on the topics addressed, through a consultation of their scientific publications, which variables or criteria contributed most to the contamination process. The main criteria chosen were: land use and occupation; pedology or soil types, slope, accumulated flow and clay content in the soil. For this purpose, a database was created containing information related to the landscape characteristics of the study area and, through the use of GIS tools, the data was integrated, obtaining as a final result a thematic map of the risk of contamination by pesticides. It was observed that the criterion that most contributes to the contamination process is the use and occupation of the soil, and areas that offer the greatest risk of contamination are precisely the areas where soybean and corn monocultures predominate.

**Keywords:** Geotechnologies, Multicriteria Assessment, Pesticides, Environmental Risk.

## INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas ao longo dos séculos, vem provocando mudanças no meio ambiente e conseqüentemente causando grandes impactos sobre os ecossistemas naturais. A exemplo dessas mudanças, podemos destacar: os processos de desertificações de grandes áreas; os desmatamentos; assoreamento de corpos d'água; inundações, erosões, mudanças climáticas, poluição e contaminação ambiental. Essa relação causal entre os impactos ambientais e o desenvolvimento da humanidade tem sido objeto de muitos estudos (Lima et al., 2018; Maria & Martinho 2016; Chaves, 2016; Silva, 2016; Suguio, 2008; Bédard, 2007; Hinz et al., 2007; Santos, 1980).

No contexto da contaminação ambiental, a agricultura, embora seja uma atividade prioritária e essencial para a sociedade, é um exemplo de ação humana que causa interferência negativa no meio ambiente. Quando se trata de seu modelo patronal, também chamado de agricultura moderna, a utilização massiva de pesticidas para o controle de organismos considerados pragas no cenário agrícola é um dos pilares dessa atividade. Vale ressaltar que embora o uso intensivo de pesticidas ocorra principalmente na agricultura moderna, essa prática também é utilizada em menor escala no modelo conhecido como agricultura familiar (Marciel e Dutra 2017).

No mosaico de ecossistemas aquáticos, encontrados abundantemente na região amazônica, a contaminação por pesticidas se dá quando acontece o deslocamento dessas substâncias para os corpos d'água, esse transporte ocorre por diversas vias, que incluem a deriva de pulverização, a lixiviação através dos perfis do solo (contaminação de águas subterrâneas) ou pela aplicação direta nos corpos d'água dentre outras formas, no entanto, o escoamento superficial ou runoff é reconhecido como a principal fonte de contaminação dos ecossistemas aquáticos em áreas agrícolas (Williams et al., 1995; Schriever & Liess, 2007).

Em países como o setor agrícola desenvolvido como os Estados Unidos e o Brasil, por exemplo, a poluição difusa causada por pesticidas é considerada o maior problema para a qualidade dos corpos d'água (EPA 2003),

A contaminação por pesticidas em corpos d'água está diretamente ligada à sua aplicação nas lavouras, tendo em vista que muitos dos princípios ativos atualmente utilizados apresentam média ou alta toxicidade. Outro aspecto que contribui para a contaminação é o fato de que muitos agricultores utilizam os produtos de forma inadequada com a aplicação de superdosagens, onde o produtor buscando uma maior eficiência, faz uso de doses maiores do que as recomendadas pelos fabricantes, as quais são dadas através de estudos ecotoxicológicos

sobre o efeito dos pesticidas no ambiente e em organismos teste (Dellamatrice & Monteiro, 2014; Balsan, 2019).

O uso de Sistema de Informações Geográficas ou simplesmente SIG em estudos de cunho ambiental gera elementos que auxiliam na análise de resultados e que contribuem para a tomada de decisões. Com relação à contaminação aquática causada pelo uso de pesticidas na agricultura não é diferente, essa ferramenta auxilia no gerenciamento tanto de águas superficiais como subterrâneas, uma vez que permite prever ou estimar os riscos de contaminação a partir da espacialização de áreas com potencial de contaminação (Ribeiro, 2014).

Um ponto importante no estudo da contaminação ambiental com o uso de SIG é compreender o processo global e as relações entre os elementos da paisagem e seu caráter dinâmico. Entender os processos e elementos múltiplos do ambiente físico em interação com a atividades humanas, nos limites geopolíticos ou em uma bacia hidrográfica, por exemplo, é de fundamental importância para o escopo de estudos dessa natureza (Marangon, 2016).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho é predizer através da elaboração de um mapa temático, quais as áreas da sub-bacia do Rio Moju mais susceptíveis ao risco de contaminação por pesticidas, utilizando com o uso de Sistema de Informações Geográficas e de uma metodologia baseada em análise multicritérios em uma sub-bacia hidrográfica sob influência de agricultura intensiva na região do Baixo Amazonas.

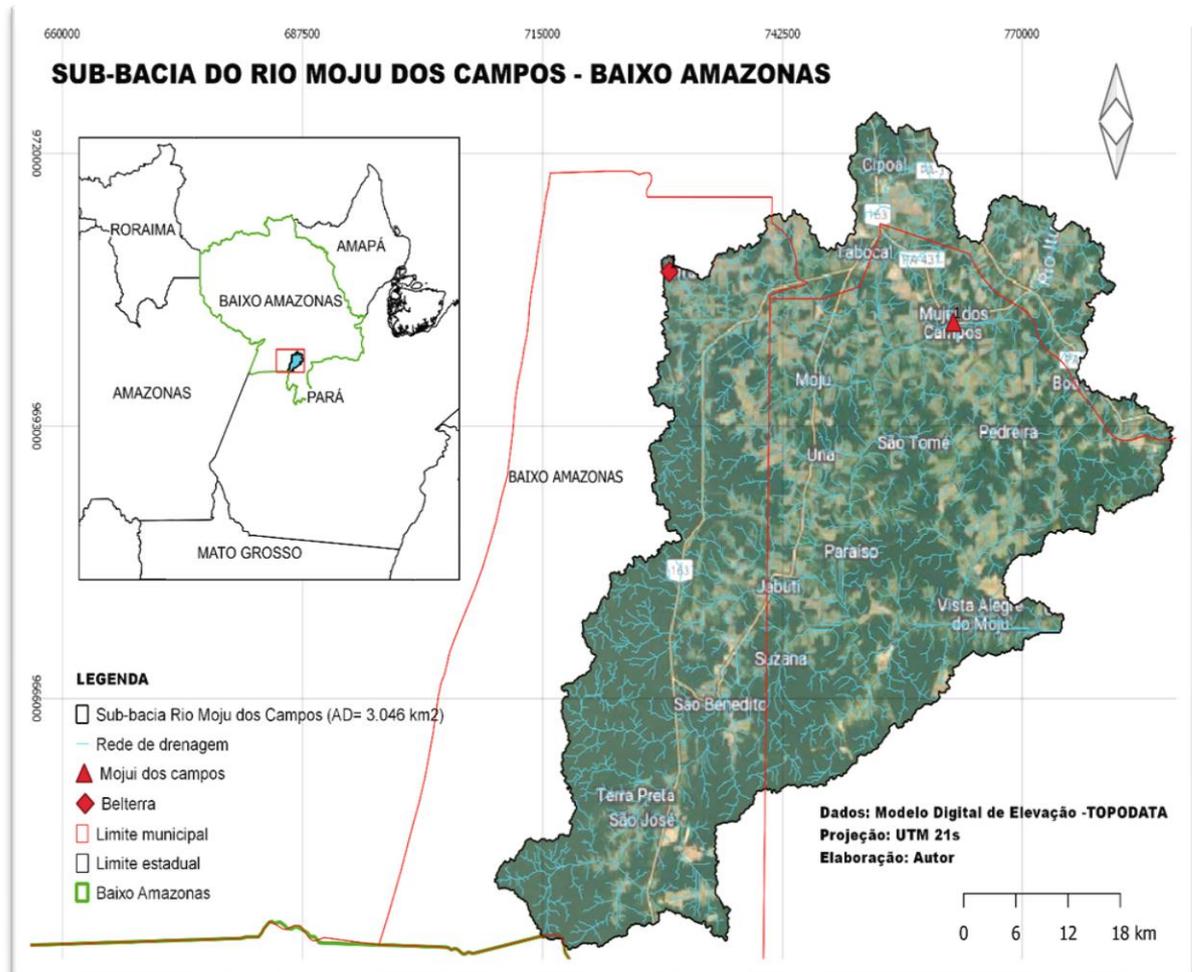
## **MATERIAL E MÉTODOS**

### ***Caracterização da área de estudo***

A sub-bacia hidrográfica do Rio Moju (Figura 1), com uma área de drenagem de 3.046 km<sup>2</sup> está localizada na região metropolitana de Santarém, composta pelos municípios de Santarém, Belterra e Mojuí dos Campos que formam, juntamente com os municípios de Alenquer, Curuá, Monte Alegre, Placas e Prainha a microrregião de Santarém pertencente à mesorregião do Baixo Amazonas.

Para efeito de melhor compreensão, neste trabalho, a região onde está localizada a área de estudo será chamada de microrregião de Santarém, pertencente à mesorregião do Baixo Amazonas, e que além dos municípios abarcados pela sub-bacia do Rio Moju, também é composta pelos municípios de: Curuá; Monte Alegre; Placas e Prainha.

Figura 1 – Mapa de localização da Sub-bacia do Rio Moju.



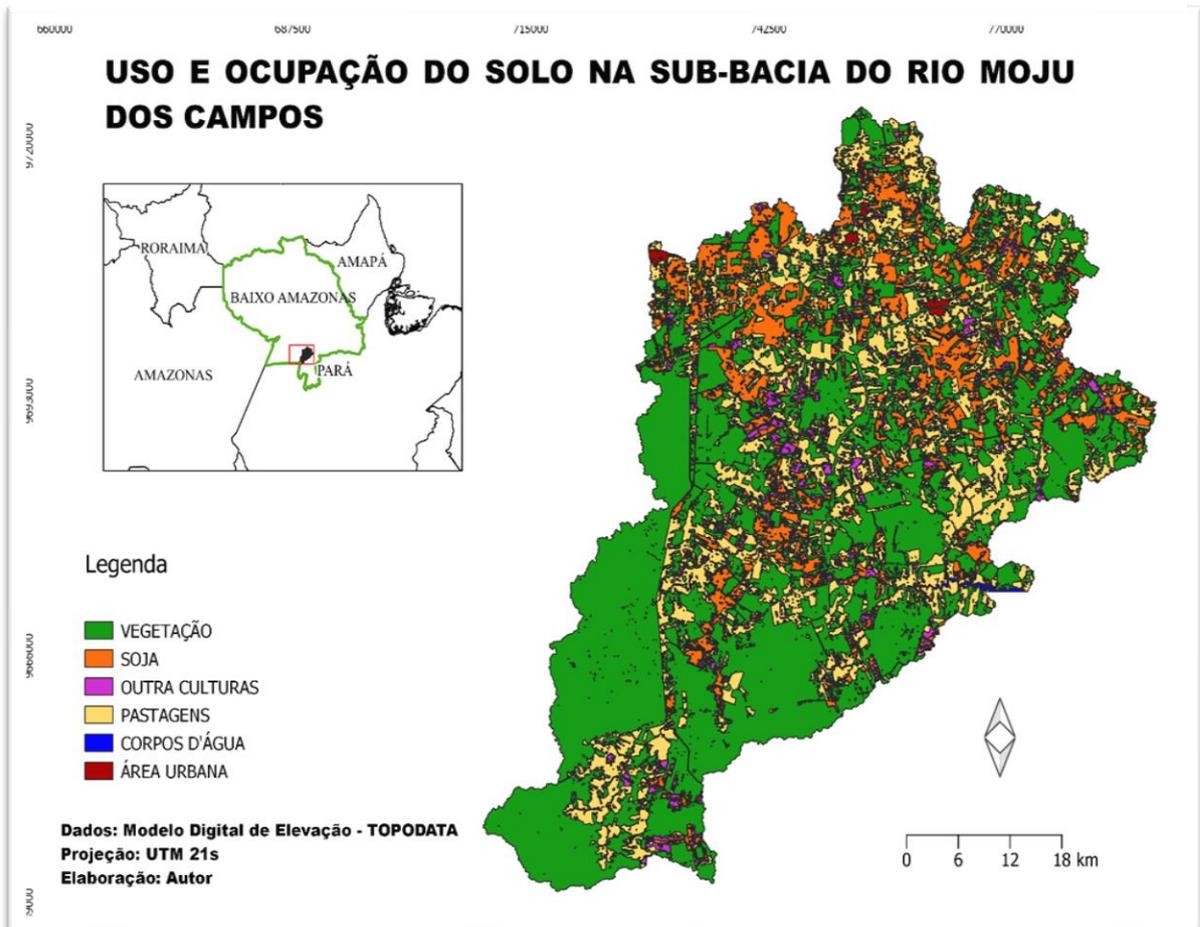
Fonte: Autor do estudo.

O clima da região é classificado por Köppen e Geiger (1948) como tipo “Ami” com características de clima tropical, quente e úmido, sem estação fria e com temperaturas médias que oscilam entre a mínima de 25°C e máxima de 31°C. Essa região apresenta umidade relativa do ar em torno de 80%, com dois períodos distintos, um seco e o outro chuvoso cuja pluviosidade média anual é de 2150 mm distribuídos ao longo do ano.

O Rio Moju é um afluente do Rio Curua-Úna que por sua vez é afluente do Rio Amazonas. Assim como estes, os demais rios da região representam um importante fator socioeconômico, tendo em vista o modo de vida da população local, que os utilizam tanto para pesca de subsistência quanto para atividades de comércio, como o transporte de pessoas e mercadorias, atividades turísticas, além da captação do recurso hídrico para o consumo humano e animal.

A microrregião de Santarém é caracterizada pela forte presença de grandes áreas cultivadas agrícolas (Figura 2). Os monocultivos se destacam devido ao importante papel sócio econômico que representam para a região, tendo a soja e o milho como as principais culturas temporárias cultivadas.

Figura 2 – Mapa de uso e ocupação do solo na Sub-Bacia do Rio Moju, na microrregião de Santarém.



Fonte: Autor do estudo.

### ***Sistema de informações geográficas - SIG***

Para o desenvolvimento das etapas que envolvem o uso de Sistema de Informações Geográficas, optou-se pela utilização do SIG QGIS®, que se trata de software livre com código-fonte aberto, multiplataforma que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

A construção do banco de dados utilizou os modelos digitais de elevação (MDE) do projeto TOPODATA, cujos dados altimétricos possuem uma resolução espacial de 30 x 30 metros, além de dados da coleção 6 do projeto MAPBIOMAS Brasil para o uso e ocupação do solo.

### ***Procedimentos para a análise multicritério***

O organograma sequencial dos procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho é exibido na Figura 4, e é descrito da seguinte forma:

1 – Primeiramente procedeu-se uma análise e tratamento do Modelo Digital de Elevação da sub-bacia do Rio Moju para o processo de delimitação dos limites físicos da sub-bacia e sua rede de drenagem.

2 – A segunda etapa consistiu na elaboração dos mapas base ou critérios principais (Uso e Ocupação do Solo, Declividade, Fluxo Acumulado, e Teor de Argila no solo) a serem considerados na abordagem da análise multicritério.

3 – Em um processo de análise multicritério, os dados envolvidos, na maioria das vezes, apresentam valores com unidades diferentes, o que impede os seus cruzamentos de forma imediata. Portanto, a terceira etapa consistiu nos procedimentos de normalização (valor de dados numa escala de 0 a 1) dos critérios qualitativos (uso e ocupação do solo, pedologia), utilizando uma ordem hierárquica arbitrária e dos critérios quantitativos (declividade, teor de argila no solo e fluxo acumulado) utilizando função *fuzzy*.

Eastman (1997) afirma que a forma mais simples de se realizar um processo de normalização de valores é uma variação linear, definida pela seguinte equação 1:

$$X_i = (R_i - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) * \text{Intervalo Normalizado} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$R_i$  = valor a ser normalizado;

$R_{\min}$  = valor mínimo para o critério;

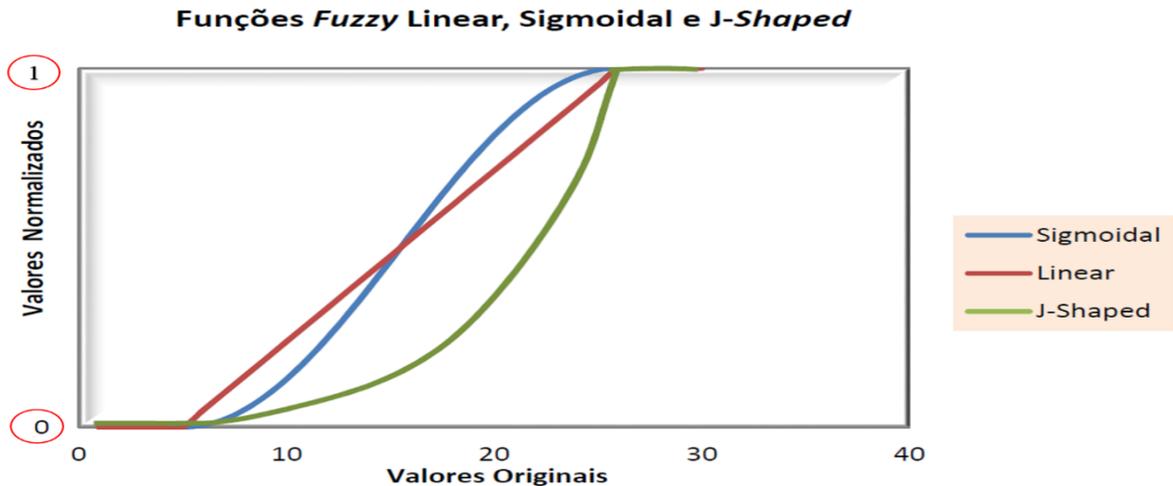
$R_{\max}$  = valor máximo para o critério.

Segundo Ramos (2000), a maneira mais adequada para a normalização de critérios com valores desuniformes é a aplicação de uma função *fuzzy*. Em critérios que envolvam dados qualitativos, os valores normalizados devem ser atribuídos de forma arbitrária, de acordo com a escala de normalização utilizada.

De acordo com Falcão (2013), a teoria dos conjuntos fuzzy, desenvolvida por Lofti A. Zadeh, em 1965, é uma extensão da teoria de conjuntos clássicos e está associada aos conceitos básicos de funções de pertinência, onde pela lógica *fuzzy*, um conjunto de valores é transformado em outro, porém, em uma escala normalizada (0 a 1).

Segundo Ramos (2000), das várias funções fuzzy existentes, as mais comumente utilizadas são: Linear, Sigmoidal e J-Shaped, que podem ser crescentes ou decrescentes. As Figura 3 apresenta as formas crescentes destas funções, onde os valores originais foram normalizados para escala de 0 a 1.

Figura 3 – Formas de funções fuzzy linear, sigmoidal e J-Shaped crescentes



Fonte: Adaptado de Falcão (2013).

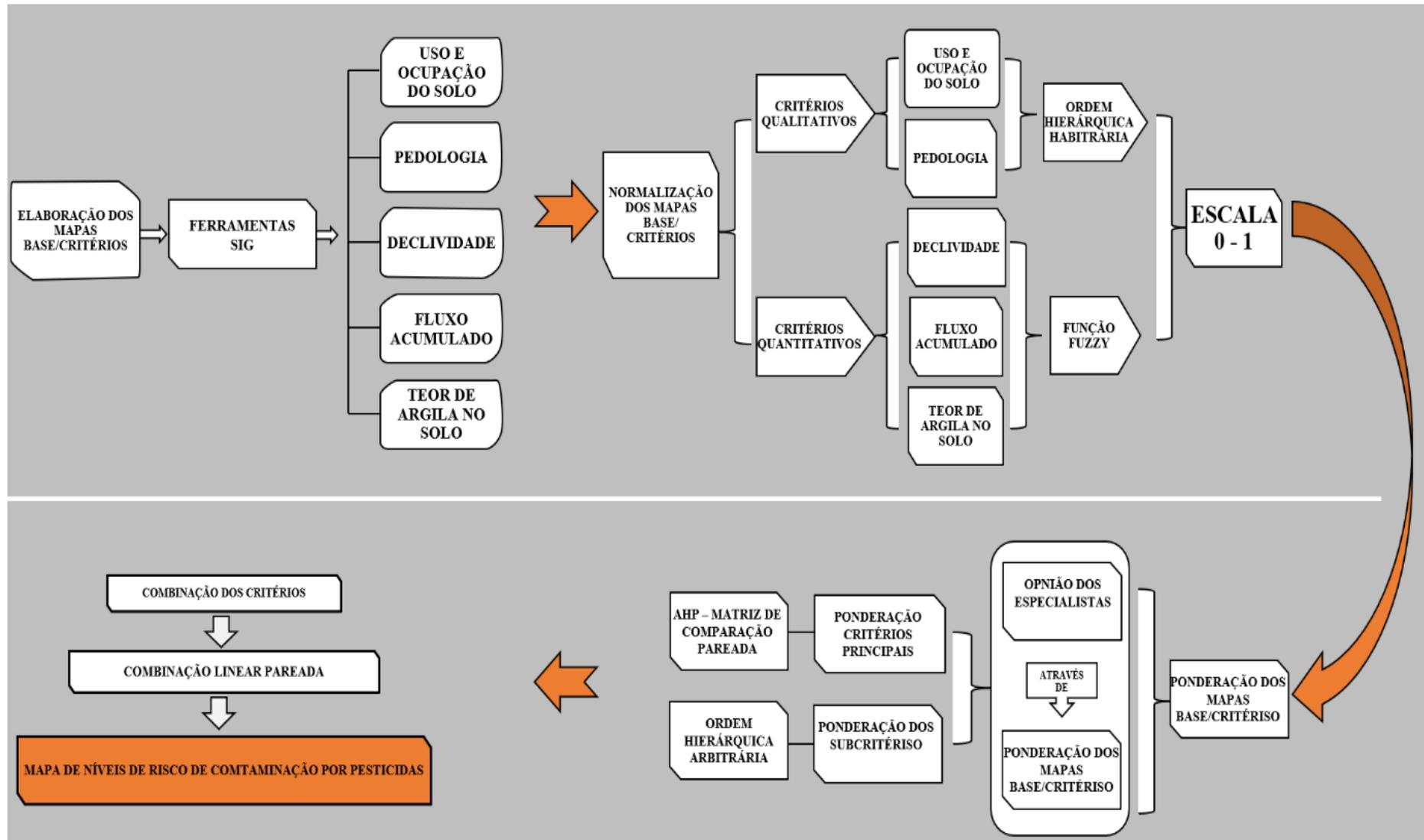
4 – A quarta etapa trata da ponderação dos critérios principais. A ponderação de critérios se refere à atribuição de pesos a cada fator que contribui para um fim, o que significa determinar a importância relativa entre esses critérios utilizados em um estudo. Quantificar a importância proporcional de cada um dos critérios é a maior dificuldade enfrentada em um processo de tomada de decisão que envolve múltiplos critérios (Ramos, 2000)

Esta etapa foi realizada de uma “consulta” as posições/opiniões técnico-científicas de especialistas no tema objeto do trabalho, a cerca de cada critério principal. Essas opiniões foram definidas por meio de um levantamento na literatura acerca dos temas que tratam de cada um dos critérios utilizados no trabalho, ou seja, as posições dos especialistas foram retratadas através de seus trabalhos e pesquisas publicadas em periódicos científicos. Para efeito entendimento, esta etapa será citada no decorrer deste estudo como “posição/opiniões técnico-científica dos especialistas”.

5 – Na quinta etapa realizou-se combinação dos critérios, através de uma combinação linear ponderada. Nesse método, a aplicação de pesos ponderados permite que seja feita uma equiparação entre os critérios. Assim sendo, um critério a qual tenha sido atribuído um valor muito baixo, pode ser compensado por valores mais altos atribuídos aos demais critérios (Eastman, 2003).

6 – Por fim, a sexta etapa consistiu na elaboração do mapa temático digital com os níveis de risco à contaminação por pesticidas dentro dos limites da sub-bacia.

Figura 4 - Organização sequencial dos procedimentos metodológicos.



Fonte: Adaptado de Falcão (2013).

### ***Delimitação da sub-bacia do Rio Moju***

O processo de delimitação da Sub-bacia do Rio Moju para obtenção da linha poligonal dos seus limites físicos foi feito pelo método automático desenvolvido no SIG QGIS. Inicialmente criou-se um mosaico das cenas TOPODATA 02S54\_ZN; 02S55\_ZN; 02S57\_ZN; 03S54\_ZN; 03S55\_ZN; 03S57\_ZN; 04S54\_ZN; 04S55\_ZN E 04S57\_ZN para a obtenção de um único arquivo MDE de toda a área de estudo. Posteriormente, os pixels sem valores foram eliminados, originando um novo MDE, denominado de hidrológicamente consistente. A partir do novo MDE, pode-se obter a área de contribuição correspondente aos limites da sub-bacia indicando o seu exutório com o auxílio dos algoritmos das ferramentas GRASS e SAGA do SIG QGIS.

### ***Mapas/critérios principais***

Com o intuito de se elaborar o mapa temático de risco de contaminação por pesticidas na área de estudo, os critérios principais foram separados quanto a sua natureza qualitativa ou quantitativa. Os critérios de natureza qualitativa foram: uso e ocupação de solo e pedologia (tipos de solo), pois suas classes correspondem a áreas representadas de forma não numérica. Cada um desses critérios, contribui para o processo de análise com uma importância maior, igual ou menor, comparadas aos demais critérios.

Dessa mesma forma, um subcritério ou classe contribui para o mesmo processo em menor, igual ou maior nível, se comparada aos demais subcritérios ou classes do mesmo critério. Portanto, cada uma dessas classes de mapas/critérios qualitativos principais é um subcritério, por exemplo, a classe “soja”, é um subcritério do critério principal “uso e ocupação do solo”, da mesma forma que a classe “Argissolos” é um subcritério do critério principal “pedologia”.

### ***Critério principal: Uso e ocupação do solo***

Para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo obteve-se os dados da coleção 6 do projeto MAPBIOMAS Brasil que possui informações de uso e cobertura do solo no formato matricial com resolução espacial 30 x 30 metros. Os mapas do projeto são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat. Os dados originais passaram por uma reclassificação por tabela onde somente as classes de uso e ocupação de interesse para o trabalho foram mantidas.

Um aspecto limitante para a análise de risco que se cabe ressaltar é o fato de que grande parte das áreas identificadas como pastagens (Figura 2), são pastagens utilizadas

somente como cobertura verde que tem como função a proteção do solo nos períodos de entressafra em áreas de milho e soja, e que posteriormente são dessecadas e incorporadas ao solo no momento do plantio.

Ao final da reclassificação dos dados da coleção 6 do projeto MAPBIOMAS, as classes de uso e ocupação do solo foram:

- Vegetação: áreas ocupadas por vegetação natural arbórea e arbustiva densa, com árvores de médio e grande porte, que indicam baixo uso agrícola;
- Soja: áreas de monocultivos de soja, cultura anual de ciclo curto que nas entressafras é ocupada pelos monocultivos de milho;
- Outras culturas: áreas identificadas com outros cultivos anuais e perenes, fruticultura e hortaliças;
- Pastagens: áreas destinadas a pecuária de leite e corte. Áreas de monocultivos que nas entressafras são cultivadas com capim de cobertura.
- Área urbana: áreas antropizadas
- Corpos d'água: representam águas de superfície ou águas superficiais.

#### ***Critério principal: Pedologia***

As classes de solo representativas dentro dos limites da sub-bacia do Rio Moju foram obtidas junto a plataforma GEOINFO da Embrapa e adaptadas conforme as diretrizes firmadas no sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa, 1999). Dentro dos limites físicos da sub-bacia, as classes de solo encontradas são: Latossolo Amarelo Distrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Neossolo Quartzarênico órtico.

#### ***Critério principal Declividade***

As classes de declividade da sub-bacia do Rio Moju foram obtidas a partir das cenas dos modelos digitais de elevação do projeto TOPODATA como produtos do processo de delimitação da sub-bacia. O mapa de declividade foi gerado tendo seus valores apresentados em porcentagem e visando a análise de variação de declividade da sub-bacia, os valores foram reclassificados de acordo com as classes de declividade elaboradas pela EMBRAPA (2008) (Tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de relevo e faixas de declividades de acordo com a EMBRAPA

Relevo	Declividade (%)
Plano	0 a 3
Suave Ondulado	3 a 8
Ondulado	8 a 20
Forte Ondulado	20 a 45
Montanhoso	45 a 75
Escarpado	Superior a 75

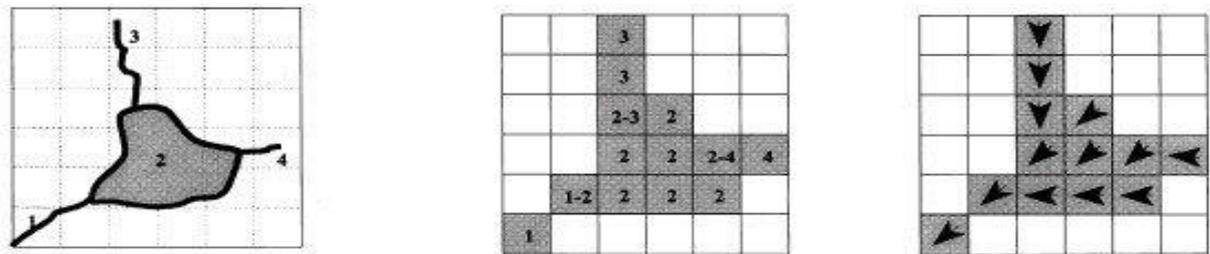
Fonte: EMBRAPA (2008)

### ***Critério principal: Fluxo Acumulado***

O fluxo acumulado, obtido a partir da direção de fluxo representa uma área de aclave apresentada em termos de números de células do modelo digital de elevação. Essa variável é obtida através do algoritmo *Flow Accumulation* da ferramenta SAGA do QGIS a qual computa o fluxo acumulado em uma grade que contém o número total de células que drenam para cada célula vizinha no MDE de entrada, conforme observa-se no exemplo da Figura 5.

Portanto, as células com os maiores valores, indicam uma alta concentração de fluxo acumulado (água), possibilitando identificar os canais de drenagem, ou em outras palavras as áreas por onde ocorre um maior escoamento de água (Mendes & Irilo, 2001).

Figura 5 - Exemplo de determinação do Fluxo Acumulado.



Fonte: Adaptado de Turcote et al (2001).

### ***Normalização dos mapas/critérios principais***

Para que fosse possível o cruzamento dos critérios no processo de análise multicritério, cada mapa teve que passar por um processo de ponderação, para que seus dados estivessem representados em uma mesma escala, portanto, os mesmos foram normalizados a partir de uma análise comparativa de pixel a pixel.

Desta forma, foi feita a normalização da escala de variação dos valores dos mapas de uso e ocupação do solo, declividade, fluxo acumulado, pedologia e teor de argila no solo, de modo que os valores dos mesmos passassem a variar dentro de uma escala de 0 a 1.

***Normalização do mapa/critério principal: Uso e ocupação do solo***

O critério principal Uso e ocupação do solo é representado pelas classes ou subcritérios: vegetação, soja, outras culturas, pastagens, área urbana e corpos d'água. Por apresentarem características qualitativas e valores não numéricos, os mesmos não puderam ser prontamente utilizados nas operações de cruzamento de informações, no âmbito da análise multicritério.

Cada subcritério ou classe de uso e ocupação de solo, foi analisada utilizando uma escala de normalização com intervalo de 0 a 1, e a elas foi atribuído um valor numérico com base na opinião dos especialistas. Ao subcritério com maior potencial risco de contaminação, o subcritério “soja”, foi atribuído o valor mais alto dessa escala, enquanto o subcritério com menor potencial de risco de contaminação, o subcritério “vegetação” foi dado o valor menor, e às demais classes foram atribuídos valores intermediários devido as mesmas apresentarem risco de contaminação considerados intermediários.

Atribuídos os valores equivalentes entre os subcritérios do critério principal “uso e ocupação”, a operação de normalização do mesmo foi realizada com o auxílio da ferramenta “calculadora raster” do software QGIS. Desta forma, foi possível se obter um critério normalizado numa escala de 0 à 1, de natureza quantitativa, tornando capaz a sua utilização, ou seja, seu cruzamento com os demais critérios de natureza quantitativa no processo de análise multicritério.

***Normalização do mapa/critério principal: Declividade***

O mapa de declividade da sub-bacia do Rio Moju foi produzido inicialmente com seus dados quantitativos apresentados em porcentagem, de acordo com a classificação da EMBRAPA (2008) (Tabela 1). Para o processo de normalização, os dados passaram primeiramente por um processo de reclassificação por tabela no software QGIS. Os valores em porcentagem passaram a variar numa escala de 1 a 6, onde a classe de declividade de 0 à 3 % passou a corresponder ao valor 1, as classes de 3 à 8 % passou a corresponder ao valor 2, a classe de 8 à 20 % passou a corresponder ao valor 3, a classe de 20 à 45 % passou a corresponder ao valor 4, a classe de 45 à 75 % passou a corresponder ao valor 5 e a classe de declividade superior a 75 % passou a corresponder ao valor 6.

Para a normalização desses valores para uma escala de 0 à 1, foi utilizada uma função *fuzzy*, do tipo linear crescente (Figura 3), tendo em vista de acordo posição técnico/científica dos especialistas, quanto maior o valor da declividade de uma área, maior será sua contribuição para o escoamento superficial e portanto, maior o seu potencial de risco

contaminação por pesticidas. A operação de normalização do critério principal Declividade foi realizada no software QGIS com o auxílio da calculadora raster.

#### ***Normalização do mapa/critério principal: Pedologia***

O critério Pedologia assim como o critério uso e ocupação do solo, por apresentar características qualitativas não mensuráveis numericamente, precisaram ser submetidos a um processo de normalização com base na posição técnico científica dos especialistas a cerca deste critério, foi feita a normalização utilizando-se uma escala de 0 à 1.

Ao tipo de solo cujas características físicas, em interação com os princípios ativos dos pesticidas, proporcionam um maior risco de contaminação, foi atribuído o maior valor da escala, da mesma forma que o tipo de solo cujas características ofereçam um menor risco de contaminação por pesticidas, receberam um menor valor na escala.

Portanto, o processo de normalização das classes de tipos de solo ou subcritérios, corresponde ao processo de ponderação dessas classes, pois para a conversão de dados qualitativos para dados quantitativos na escala de 0 à 1, foi considerado o nível de importância de cada subcritério para o risco de contaminação por pesticidas. O processo de ponderação dos critérios será melhor discutido nos tópicos a seguir.

Atribuídas as correspondências entre os subcritérios (tipos de solo), seus valores foram normalizados com o auxílio da ferramenta calculadora raster do software QGIS. Desta forma, foi possível se obter um mapa temático normalizado de com valor variando em uma escala de 0 à 1, de natureza quantitativa, tornando capaz a sua utilização no processo de análise multicritério.

#### ***Normalização do mapa/critério principal: Fluxo Acumulado***

Para o processo de normalização do mapa do critério principal fluxo acumulado da sub-bacia do Rio Moju, também foi utilizada uma função *fuzzy* (Figura 3) do tipo linear crescente, tal como foi feito para o critério declividade. A operação de normalização deste mapa foi realizada no software QGIS com o auxílio da ferramenta “calculadora Raster”.

#### ***Normalização do mapa/critério principal: Teor de Argila no Solo***

O mapa de teor de argila no solo na Sub-bacia do Rio Moju, que originalmente foi dado em porcentagem, variava entre 5 e 10 %. Este critério, tal como o critério “Declividade” foi reclassificado e os valores resultantes também foram normalizados através de uma *função fuzzy*, do tipo linear decrescente para uma escala de 0 à 1.

A norma de definição para que esta função seja decrescente é explicada considerando que de acordo a posição técnico/científica de especialistas, quanto maior a porcentagem de argila em um solo, menor será o risco de contaminação por pesticidas, tendo em vista a argila tender a retardar o deslocamento das moléculas no solo. A operação de normalização deste critério para uma escala de zero a 1, foi realizada através da ferramenta “Calculadora Raster” do software QGIS.

Ao fim desta etapa, obteve-se um novo conjunto de mapas/critérios devidamente normalizados que são os parâmetros de entrada para o modelo de análise multicritério, onde seus respectivos valores estão distribuídos em uma escala de 0 à 1. As características gerais dos mapas de critérios são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Características dos critérios para o processo de normalização de dados.**

<b>Critérios principais</b>	<b>Natureza dos dados</b>	<b>Normalização</b>	<b>Norma de definição</b>
<b>Uso e Ocupação do Solo</b>	Qualitativo	Atribuída por “consulta” aos especialistas	Ex.: Áreas de cultivo de soja podem representar maior risco de contaminação.
<b>Pedologia</b>	Qualitativo	Atribuída por “consulta” aos especialistas	Ex.: Neossolosx’ podem representar maior risco de contaminação.
<b>Declividade</b>	Quantitativo	Fuzzy	Ex.: Áreas com declive acentuado podem representar maior risco de contaminação.
<b>Fluxo Acumulado</b>	Quantitativo	Fuzzy	Ex.: Áreas com maior acumulo podem representar maior risco de contaminação.
<b>Teor de Argila</b>	Quantitativo	Fuzzy	Ex.: Áreas com menor teor de argila podem representar maior risco de contaminação

**Fonte: Adaptado de Oliveira (2009)**

#### ***Ponderação dos mapas/critérios principais***

A atribuição de pesos a cada critério principal (uso e ocupação do Solo, pedologia, declividade, fluxo acumulado e teor de argila) utilizou, o processo de análise hierárquica – AHP (Analytic Hierarchy Process), que se trata de um método de comparação pareada, adaptado da metodologia proposta por Saaty (1977).

A ponderação dos critérios foi realizada seguindo as posições/opiniões técnico-científicas dos especialistas, e as atribuições dos pesos à cada critério são descritas da seguinte forma:

- Definição da importância relativa entre os critérios principais no processo de

análise multicritério (uso e ocupação do solo, pedologia, declividade, fluxo acumulado e teor de argila no solo), atribuindo-lhes pesos através do processo de análise hierárquica – AHP;

- Definição da importância relativa dos subcritérios do critério principal qualitativo uso e ocupação do solo (vegetação, soja, outras culturas, pastagens, área urbana e corpos d'água), utilizando ordem hierárquica arbitrária, com valores que variam de 0 a 1, etapa equivalente ao procedimento de normalização do referido critério principal;
- Definição da importância relativa dos subcritérios do critério principal qualitativo pedologia (latossolo amarelo distrófico, argissolo vermelho-amarelo distrófico e neossolo quartzarênico órtico<sup>1</sup>), utilizando ordem hierárquica arbitrária, com valores que variam de 0 a 1, etapa equivalente ao procedimento de normalização do referido critério principal.

De acordo com as posições/opiniões técnico-científicas dos especialistas, ordenou-se a importância na causalidade de cada critério ou subcritério no risco de contaminação por pesticidas nos corpos d'água da sub-bacia do Rio Moju. Um modelo de matriz quadrada ( $n \times n$ ) para a comparação pareada entre os fatores, de acordo com Saaty (1977). Em seguida, definiu-se a ordem de importância dos critérios principais, que foram listados na primeira linha e na primeira coluna da matriz, obedecendo a mesma ordem ao longo das linhas e das colunas. Posteriormente, a matriz foi preenchida de acordo com os valores obtidos após a “consulta” aos especialistas. Esses valores que expressam a importância relativa entre os pares de fatores, usando a escala de comparação de critérios.

Após o fim do preenchimento da matriz de comparação, verificou-se a razão de consistência a qual indica a probabilidade de que os resultados das avaliações são aleatórios. A razão de consistência visa evitar resultados tendenciosos e seu valor deve ser menor que 0,1. O processo de avaliação e a ponderação foram reavaliados e o preenchimento da matriz foi refeito até se alcançar o valor de consistência adequado.

Para a execução do processo de análise hierárquica – AHP, utilizou-se o SIG QGIS. A escala fundamental proposta por Saaty (1977) foi adaptada quanto à apresentação dos valores e as definições dos pesos ou importância dos critérios (Tabela 3).

**Tabela 3 – Valores e definições de peso ou importância dos critérios no QGIS.**

Intensidade do peso ou da importância	Definição do peso ou da importância
1	Igual peso ou importância
2	Peso ou importância vagamente melhor
3	Peso ou importância um pouco melhor
4	Peso ou importância moderadamente melhor
5	Peso ou importância melhor
6	Peso ou importância bem melhor
7	Peso ou importância muito melhor
8	Peso ou importância criticamente melhor
9	Peso ou importância absolutamente melhor

Fonte: Adaptado de Falcão (2012).

#### ***Combinação dos critérios principais***

Para a combinação dos mapas de critérios utilizou-se um processo denominado CLP – Combinação Linear Ponderada, que combina os critérios através de uma média ponderada. Nessa combinação de critérios, os mapas normalizados (padronizados em uma escala numérica comum, 0 a 1) são combinados por meio da equação 2, definida no processo de atribuição de pesos às variáveis.

$$S = \sum_i w_i x_i \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

S = valor final do escore;

$w_i$  = peso do fator e

$x_i$  = valor normalizado do fator.

Cada imagem ou mapa de critério normalizado (uso e ocupação do solo, pedologia, declividade, fluxo acumulado e teor de argila) teve os valores de seus *pixels* multiplicados pelos respectivos coeficientes ou pesos e os valores resultantes nos *pixels* de mesma localização de cada mapa/critério, foram somados, obtendo-se desta forma, a imagem ou mapa correspondente aos níveis de risco de contaminação por pesticidas. Este procedimento foi realizado com o auxílio da ferramenta “calculador RASTER” do software Qgis.

### ***Mapa de risco de contaminação por pesticidas***

Os intervalos de cada classe do mapa de risco de contaminação por pesticidas na sub-bacia do Rio Moju foram definidos tomando-se por referência as próprias faixas de valores do mapa contínuo gerado. Este por sua vez, foi reclassificado no software QGIS a partir do qual foi gerado o mapa de risco final, contendo as seguintes classes de nível de risco: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### ***Normalização dos critérios principais***

O processo de normalização dos critérios de natureza quantitativa, cujos valores originais variavam dentro de um intervalo percentual, possibilitou que os valores dos mesmos passassem a variar no intervalo numérico de 0 e, permitindo, assim que estes critérios pudessem ser combinados com os demais no processo de análise multicritério.

Com relação ao critério principal de natureza qualitativa “uso e ocupação do solo” e suas classes ou subcritérios, após a “consulta” as posições/opiniões técnico-científicas dos especialistas à cerca do grau de importância para o processo de contaminação, conclui-se que a classe ou subcritério “soja” é o que representa o maior risco de contaminação tendo em vista que se trata das áreas onde ocorrem o maior volume de aplicações de pesticidas.

De acordo com Gomes & Barizon (2014), na região amazônica o comprometimento da qualidade dos corpos d’água está diretamente ligado ao avanço da agricultura e com o uso intensivo de pesticidas, principalmente nos monocultivos de soja. Soares & Porto (2007) evidenciaram que no Mato Grosso e no Mato Grosso do Sul, pesticidas foram detectados na água principalmente próximos aos locais onde ocorrem grandes plantações de soja e milho.

A classe ou subcritério de uso e ocupação do solo que recebeu o segundo maior valor de importância foi “outras culturas”. Esse fato justifica-se tendo em vista que, nessas áreas encontram-se os demais tipos de cultivos, a exemplo das culturas perenes, como as que ocorrem nas áreas de fruticultura e outras culturas de ciclo curto, como é o caso das encontradas em áreas de produção de hortifruti, setor bastante desenvolvido na região de estudo e que, embora em menor volume, também exerce o uso de pesticidas para o controle de pragas.

O uso de pesticidas por produtores familiares, se torna mais preocupante, tanto do ponto de vista ambiental como do social, devido ao fato de que grande parcela desses produtores, dispensam ou não tem acesso à orientação técnica de um profissional, e fazem o uso de forma indiscriminada. Segundo o Censo Agropecuário (2017), o número de analfabetos

que aplicam pesticidas no campo é de 15,6%, e destes, 89% declararam não ter recebido qualquer tipo de orientação técnica.

Os valores dados às classes ou subcritérios do critério principal “uso e ocupação do solo”, após a “consulta” aos especialistas sobre o seu grau de importância para o processo de contaminação por pesticidas são descritos na Tabela 4.

**Tabela 4 – Importância atribuída às classes de ocupação do solo.**

Subcritérios / Classes de uso	Importância
Vegetação	0.02
Soja	1
Outras Culturas	0.6
Pastagens	0.4
Corpos d'água	0
Área Urbana	0.05

Fonte: Adaptado de Falcão (2013).

#### ***Normalização dos critérios qualitativos: Pedologia***

De acordo as posições/opiniões técnico-científicas dos especialistas à cerca do critério Pedologia, a classe de solo “Neossolo”, dentre as classes de solo identificadas na área do limite da sub-bacia do Rio Moju é a classe que oferece maior contribuição para o risco de contaminação por pesticidas devido principalmente as características da maior ocorrência de solos arenosos na região tendo em vista que solos com menor concentração de matéria orgânica e argila tendem a exercer uma menor influência no processo de adsorção das moléculas pesticidas nos colóides do solo, tornando-as disponíveis e susceptíveis aos processos de lixiviação e escoamento superficial.

Segundo Dellamatrice & Monteiro (2014), solos de textura arenosa, a exemplo dos Neossolos, exercem uma grande influência no processo de contaminação, principalmente devido ao seu baixo potencial de adsorção, fator que favorece o processo de escoamento superficial das moléculas pesticidas. De acordo com Gomes & Spadotto (2004), devido aos Neossolos serem arenosos e, portanto, pobres em argila e material orgânico, e também devido à predominância de uma caráter maciço poroso, ocorre o favorecimento da movimentação vertical de solutos, características essas que favorecem o acontecimento do escoamento superficial, principal fenômeno responsável pelo transporte de pesticidas para os corpos d'água.

Os valores dados subcritérios critério principal Pedologia, após o processo de análise de literatura sobre o seu grau de importância para o processo de contaminação por pesticidas são descritos na Tabela 5.

**Tabela 5 – Valores atribuídos às classes de solo.**

Subcritério / Classes de solo	Importância
Latossolo Amarelo Distrófico	0.45
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	0.55
Neossolo Quartzarênico Órtico	0.95

Fonte: Adaptado de Falcão (2013).

### *Ponderação dos critérios*

A ponderação dos critérios refere-se à atribuição de pesos à cada critério que contribui para o processo de contaminação por pesticidas. Seguindo a posição/opinião técnico-científica dos especialistas e a Metodologia de Comparação Pareada – AHP, foi definida a seguinte ordem de importância relativa dos critérios que contribuem para o processo de contaminação por pesticidas na sub-bacia do Rio Moju.

1. Uso e Ocupação do Solo
2. Pedologia (tipos de solo)
3. Fluxo Acumulado
4. Declividade
5. Teor de Argila

Em seguida com o auxílio do software Excel, elaborou-se a matriz de comparação pareada, onde atribui-se os pesos de importância relativa a cada critério. Os resultados são exibidos na Tabela 6.

**Tabela 6 – Matriz de comparação pareada com os critérios principais e pesos atribuídos.**

	Uso e ocupação do solo	Pedologia	Fluxo acumulado	Declividade	Teor de argila no solo
Uso e ocupação do solo	1	3	8	8	9
Pedologia	1/3	1	5	5	5
Fluxo acumulado	1/8	1/5	1	1	3
Declividade	1/8	1/5	1/1	1	2

Teor de argila	1/9	1/5	1/3	1/2	1
----------------	-----	-----	-----	-----	---

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Finalizado o preenchimento da matriz de comparação pareada e o processo de julgamento das importâncias relativas dos critérios, obteve-se uma RC – razão de consistência no valor de 0.05, portanto, estando de acordo com os preceitos da metodologia proposta por Saaty (1977) e garantindo a aleatoriedade dos resultados do processo de análise hierárquica – AHP, ou seja, razão de consistência inferior a 0.1.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6, e considerando-se as posições/opiniões técnico-científicas dos especialistas, concluiu-se que o critério uso e ocupação de solo, apresenta um peso ou uma importância um pouco melhor (grau de importância 3, quando comparado com o critério pedologia ou tipos de solo, e tem um peso ou importância absolutamente melhor (grau de importância 9) quando comparado com o critério teor de argila.

Embora o critério “pedologia” ou tipos de solo, e suas características físicas sejam importantes do ponto de vista do seu papel de influência no comportamento dos pesticidas no meio ambiente, o critério “uso e ocupação do solo” recebeu um maior grau de importância, devido ao fato de que suas classes ou subcritérios como “soja” e “outras culturas”, representam as regiões da sub-bacia onde provavelmente ocorrem a maior parte das aplicações de pesticidas.

Segundo (Spadotto et al., 2004), as monoculturas de soja e milho, cultivadas em extensas áreas estão entre as que mais consomem pesticidas durante o ciclo de produção. Já com relação a culturas praticadas principalmente pela agricultura famílias, o tomate, que é a espécie do grupo das hortaliças mais cultivadas no Brasil, também é a cultura que mais requer a utilização de pesticidas para o controle de pragas (Reis-Filho et al., 2009)

O critério fluxo acumulado foi considerado com um peso ou importância um pouco melhor (grau de importância 3) quando comparado com o critério teor de argila. Já o critério pedologia foi considerado com um peso ou importância igual (grau de importância 1) quando comparado com o critério fluxo acumulado. O fluxo acumulado indica as áreas relacionadas as rotas de escoamento superficial sendo, portanto, um importante critério no processo de análise do risco de contaminação por pesticidas, esse motivo explica o fato de ele ter sido considerado com uma importância um pouco melhor para o risco de contaminação, quando comparado com o critério “teor de argila”, por exemplo.

Os pesos ou valores de importância gerados pela matriz de comparação pareada, com razão de consistência considerada aceitável para o processo de análise multicritério são

apresentados na Tabela 7. Estes valores obtidos representam os resultados sobre a colaboração de cada critério para o processo de contaminação por pesticidas. Percebe-se que o critério uso e ocupação do solo (50,8 %) colabora de forma significativamente grande neste processo, seguido do critério pedologia com 28.6 % de contribuição e fluxo acumulado com 0.93 %. Já os critérios que contribuem em menor importância para o processo de contaminação por pesticidas são declividade e teor de Argila com 0.7 % e 0.3 %, respectivamente.

Embora o critério declividade em uma análise preliminar possa ser visualizado como tendo uma grande importância no processo de contaminação, após a análise multicritério, verificou-se que possivelmente devido às extensas áreas de monocultivos estarem localizadas na maioria dos casos em locais com relevos planos (declividade de 0 a 3%) e suavemente ondulados (declividade de 3 a 8%), contribuiu para que a sua importância (declividade) no processo de contaminação fosse considerada baixa.

**Tabela 7 – Resultados da ponderação de critérios, a partir da matriz de comparação pareada**

Critérios	Pesos
Uso e ocupação do Solo	0.508
Pedologia	0.286
Fluxo acumulado	0.093
Declividade	0.076
Teor de argila no solo	0.038
TOTAL	1.000

Fonte: Adaptado de Falcão (2013).

### ***Combinação dos critérios***

Obteve-se como resultado da combinação linear ponderada, um plano de informação representando um mapa de níveis de risco de contaminação por pesticidas na sub-bacia do Rio Moju.

O mapa de risco de contaminação por pesticidas apresenta valores contínuos em um intervalo de 0 a 1, conforme os valores da escala de normalização utilizada em todos os critérios envolvidos no processo de análise multicritério. Os valores variaram de 0.12456 a 0.82960, sendo que os valores mais baixos desta escala representam os níveis com menor potencial de contaminação e os valores mais altos correspondem aos níveis de risco com o maior potencial de contaminação.

Analisando as classes de risco obtidas no mapa de risco de contaminação (Figura 6), e fazendo um comparativo com o mapa de uso e ocupação de solo (Figura 2), é possível notar que as áreas que apresentam um risco “alto”, correspondem principalmente às áreas de cultivo de soja e milho. Por outro lado, aquelas, identificadas como tendo um risco de contaminação “muito baixo”, podem ser identificadas no mapa de uso e ocupação de solo, primordialmente com áreas de vegetação natural.

Os níveis obtidos (0.12456 a 0.82960) não chegaram aos seus valores mínimo e máximo, corroborando para o fato de que uma das características mais importantes da metodologia de análise multicritério é que devido ao emprego de pesos, a metodologia estabelece um equilíbrio entre os critérios, ou seja, um peso mais baixo que tenha sido atribuído a um critério, foi compensado por pesos mais altos aplicados a outros critérios. Desta forma, não se atingiu os valores mínimo e máximo.

#### ***Análise dos níveis de risco de contaminação por pesticidas***

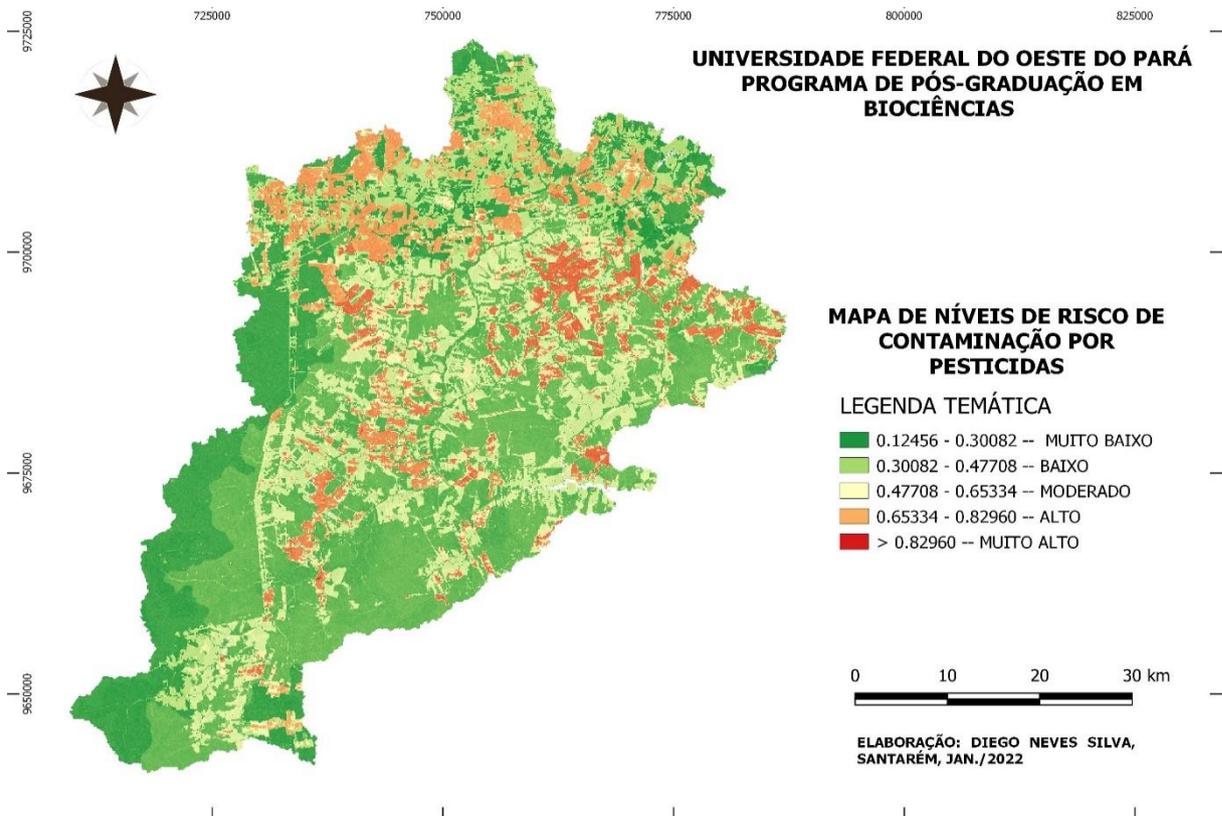
O layout do mapa final de risco de contaminação por pesticidas com valores contínuos foi elaborado de modo a apresentar um mapa do modelo temático, composto por cinco classes de nível de risco de contaminação: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

Esta forma de apresentar os resultados favorece o entendimento e a visualização espacial das áreas de risco, assim como proporciona aos gestores ambientais um melhor planejamento das ações de reparo e controle dos problemas. A Figura 6 apresenta o mapa temático das classes de nível de contaminação por pesticidas na sub-bacia do Rio Moju.

As classes cujos valores variam de 0.12456 a 0.30082 e 0.30082 a 0.47708 (menores valores) risco muito baixo e baixo, respectivamente, com área de aproximadamente 2.273 km<sup>2</sup>, ou seja, mais de 75% da área total da sub-bacia do Rio Moju, correspondem principalmente as áreas de vegetação natural, que são na sua maioria, áreas pertencentes à unidades de conservação onde as atividades agrícolas praticamente não existem e, portanto, embora algumas dessas áreas sejam limítrofes à áreas de monocultivos de soja e milho, estimasse que não ocorra a presença de pesticidas nesse ambiente.

Observa-se no mapa de risco que a classe cujos valores contínuos variam de 0.47708 a 0.65334, risco moderado com área de aproximadamente 109 km<sup>2</sup>, compreende áreas

Figura 6 – Mapa temático das classes de níveis de contaminação por pesticidas na sub-bacia do Rio Moju, Baixo Amazonas.



Fonte: Autor do estudo.

quase sempre vizinhas às áreas de maior risco de contaminação por pesticidas. A classe cujos valores variam de 0.65334 a 0.82960 (risco alto) compreende as regiões da sub-bacia onde estão localizados os monocultivos de soja, e milho nas entressafras, esta classe de risco abrange uma área significativa de aproximadamente 367 km<sup>2</sup>. São áreas agricultáveis que recebem todos os anos uma grande quantidade de aplicações de pesticidas devido às exigências da cultura no combate a pragas e doenças.

Estima-se, portanto, mediante o processo de análise dos critérios que estas sejam as áreas que necessitam de maior atenção no que diz respeito a fiscalização, tendo em vista que toda a área de estudo é cortada por uma extensa rede de drenagem que capta água para os rios e igarapés da região. Vale ressaltar que em toda a região, existem inúmeras comunidades, muitas dessas rodeadas de monocultivos, onde a grande parte dessa população está indiretamente exposta aos efeitos diretos e indiretos do uso indiscriminado de pesticidas

O processo de análise não identificou classes cujas áreas representassem um nível “muito alto” de contaminação por pesticidas (valores acima de 0.82960), e embora a região tenha como característica forte o cultivo de grãos que exigem a aplicação de um montante considerável de pesticidas, análise não revelou nenhuma área com um risco de contaminação

“muito alto”, porém, as áreas com risco “alto” merecem uma atenção especial por serem áreas de tamanho consideráveis.

## **CONCLUSÃO**

A análise multicritério espacial mostrou-se uma ferramenta robusta e adequada na utilização de critérios intervenientes na dinâmica do território estudado e o uso das tecnologias do ambiente SIG se mostrou indispensável para o processamento e combinação de diferentes tipos de informações, bem como na elaboração dos critérios principais e do mapa de risco de contaminação por pesticidas.

## REFERENCIAS

- Balsan L. 2019. Spatialization of the intrinsic risk of pesticide contamination in water bodies and determination of monitoring points. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v 42, (1), 496–513. [https://doi.or/ 10.11137/2019\\_1\\_496\\_513](https://doi.or/ 10.11137/2019_1_496_513).
- Bédard, M. do C. B. M. 2007. Os impactos ambientais, A consciência ecológica e ‘A questão amazônica’ como problema sócio-político internacional. *Revista de Doutrina Jurídica*, v 8, (82), 112–32.
- Chaves, T. F. 2016. Uma análise dos principais impactos ambientais verificados no estado de Santa Catarina. *Revista Gestão Sustentável Ambiental*, v 5, (2), 611–34.
- Dellamatrice, P. M., e R. T. R. Monteiro. 2014. Principais aspectos da poluição de rios Brasileiros por pesticidas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v 18 (12), 1296–1301. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n12p1296-1301>.
- Eastman, J. R. Idrisi Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing. 2003. Worcester: Clark University, 328p. Manual Version 14.
- EMBRAPA. 1999. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 412p
- EMBRAPA Solos, 2008. Recuperado de: <[http://hotsites.cnps.embrapa.br/blogs/paqlf/wp-content/uploads/2008/08/textura\\_solo.pdf](http://hotsites.cnps.embrapa.br/blogs/paqlf/wp-content/uploads/2008/08/textura_solo.pdf)> Brasília, Distrito Federal, Brasil. Acessado em: 10 de Fevereiro de 2022.
- Falcão, E. C. 2013. Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no município de Boa Vista-PB. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande.
- Gomes, M. A. F.; Barizon, R. R. M. 2014. Panorama da Contaminação Ambiental por Agrotóxicos e Nitrato de Origem Agrícola no Brasil: Cenário 1992/2011. *Embrapa Meio Ambiente*, v 36. recuperado de: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/987245/1/Doc98.pdf>.
- Gomes, M. A. F.; Spadotto, C. A. 2004. Subsídio à Avaliação de Risco Ambiental de Agrotóxicos em Solos Agrícolas Brasileiros. Embrapa: Comunicado Técnico, (11) 1–5. recuperado de <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=248200>.
- Hinz, R. T., L. V. D. Valentina, e A. C. Franco. 2007. Monitorando o desempenho ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela avaliação do ciclo de vida. *Revista Produção*, v 7, (3). <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v7i3.66>
- Lima, W. da S. G. de, F. de A. Barroso, J. M. de A. Silva, J. C. Oliveira, T. da S. Maciel, e G. H. de Souza. 2018. Impactos ambientais na produção de energia na hidroelétrica”. *Revista Campo do Saber*, (4), 106–32.

- Kattwinkel, M. Kühne, J. Kaarina, F. Liess, M., 2011. Climate change, agricultural insecticide exposure, and risk for freshwater communities. *Ecological Applications* 21 (6): 2068–81. <https://doi.org/10.1890/10-1993.1>.
- Köppen, W.; Geiger, R. 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes.
- Marangon, F. 2016. Vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por análise multicritério. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alfenas. Alfenas.
- Maria, H., e D. G. Martinho. 2016. Petróleo no ambiente marinho e os impactos ambientais e socioeconomicos. *Atas de saúde ambiental*, (4) 190–205.
- Mendes, C.A.B., Cirilo J.A. 2001. *Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação*. ABRH, Porto Alegre 536 p
- Ramos, R. A. R. 2000. *Localização Industrial: Um Modelo Espacial Para o Noroeste De Portugal*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Braga.
- Reis-Filho, J. de S., J. O. B. Marin, e P. M. Fernandes. 2009. “Os agrotóxicos na produção de tomate de mesa na região de Goianópolis, Goiás. *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, v 39, (4), 307–16. <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/4947/5876>.
- Ribeiro, D. D. de M. 2014. Modelagem da potencialidade hídrica e vulnerabilidade à Contaminação das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri, estado de Sergipe: Um estudo com base em Geotecnologias. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana 133.
- Saaty, T. L. 1977. A scaling method for priorities in hierarachical strutures. *Journal of Mathematical Psychology*, V 15, (3), 234-281.
- Santos, P. V. dos. 1980. Impactos ambientais causados pela perfuração de petróleo. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas*, v 1, (1), 153–63.
- Silva, M. F. da. 2016. Impactos ambientais da mineração e da expansão urbana em Minas Gerais , Brasil : o caso de Congonhas – patrimônio cultural da humanidade. *Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas*, (8) 121–36. <https://doi.org/10.18468/planetaamazonia.2016n8.p121-136>.
- Soares, W. L.; Porto, M. F. 2007. Atividade agrícola e externalidade ambiental: uma análise a partir do uso de agrotóxicos no cerrado brasileiro. *Revista Ciência & Saúde Coletiva*, v 12, 131-143.
- Spadotto, C. A., M. A. F. Gomes, L. C. Luchini, e M. M. de Andréa. 2004. Monitoramento do risco ambiental do agrotóxicos: princípios e recomendações”. *Embrapa Meio Ambiente*, (42) 29.
- Suguio, K., 2008. *Mudanças Ambientas da Terra*. Instituto Geológico, São Paulo, 336 p.
- Turcotte, R.; Fortin, J.P.; Rousseau, A. N.; Massicotte, S. Villeneuve, J. P. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and

a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, v 240, (2001), 225-242.

Williams, R. J., D. N. Brooke, P. Matthiessen, M. Mills, A. Turnbull, e R. M. Harrison., 1995. Pesticide Transport to Surface Waters within an Agricultural Catchment. *Water and Environment Journal*, v 9, (1), 72–81. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1995.tb00928.x>.