



Impacto de los plaguicidas en la cuenca Amazónica: una revisión multidisciplinaria

Pablo Ochoa^{1*}; Maria Gabriella da Silva Araújo²; Ana Claudia Batista²; Fátima A. Arcanjo³; Mario Rique Fernandes⁴; Ulysses Madureira Maia⁵; Isabela Maria Souza Silva²

¹ Departamento de Ciências Biológicas e Agrárias, Universidade Técnica Particular de Loja (UTPL), Equador – paochoa@utpl.edu.ec

² Laboratório de Ecologia Isotópica – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo (CENA/USP), Brasil – gabriella.araujo@usp.br, anaclaudiabatista89@gmail.com, isabela_souza@usp.br

³ Laboratório de Biodiversidade e Restauração de Ecossistemas, Departamento de Biologia Animal e Vegetal, Universidade Estadual de Londrina (LABRE-UEL), Brasil – fatimaa.arcanjo@gmail.com

⁴ Núcleo de Estudos da Amazônia Indígena, Universidade Federal do Amazonas (Neai/UFAM) – riquemario@gmail.com

⁵ Instituto Tecnológico Vale, Belém, Brasil – ulymm86@hotmail.com

*Autor para correspondencia: Pablo Ochoa – paochoa@utpl.edu.ec

RESUMEN

Los plaguicidas son productos químicos utilizados en la agricultura para controlar plagas y enfermedades en los cultivos. Sin embargo, su uso excesivo y poco controlado puede tener graves consecuencias en la salud de las personas y el ambiente. Esta revisión analizó el uso de plaguicidas en la cuenca del Río Amazonas, considerando su impacto socioeconómico en la salud de la población, la biodiversidad regional, la disponibilidad del suelo y los recursos hídricos. Se revisaron las bases de datos científicas Scopus y SciELO para recopilar la literatura relevante, incluidas las publicaciones de los países que integran la cuenca, también se analizó la distribución temporal de la información. Los resultados muestran el incremento sustancial de investigación científica realizada en las últimas décadas, sobre el uso de plaguicidas en la cuenca Amazónica. El estudio describe las afectaciones en cuanto a la pérdida de bosque natural y aumento de la frontera agropecuaria, principalmente en los últimos años. Estas prácticas han resultado en serios problemas de salud particularmente en las poblaciones locales e indígenas. Además, ha habido una disminución de la biodiversidad regional, lo que afecta a especies animales cruciales que contribuyen al equilibrio ecológico al ofertar servicios ecosistémicos como polinización, y la dispersión de semillas. Finalmente se presenta un estudio de caso que muestra un modelo agroecológico exitoso, enfatizando la necesidad urgente de medidas de control, para reducir el uso de plaguicidas en toda la cuenca Amazónica. Estas medidas son vitales para garantizar la salud humana y ambiental. Esto demanda la implementación de acuerdos y políticas que promuevan enfoques sostenibles por parte de los agricultores y eleven la conciencia pública sobre los riesgos asociados con el uso indiscriminado de agrotóxicos y el consumo responsable de alimentos.

Palabras clave: deforestación, monocultivos, uso de plaguicidas, salud humana y ambiental, bioeconomía, cuenca Amazónica.

Introducción

La cuenca Amazónica es una región rica en biodiversidad, hogar de miles de especies de flora y fauna (Nobre *et al.* 2021). Además, es uno de los tres principales centros de convección atmosférica profunda, incrustados en la zona de vaguada ecuatorial (Reis *et al.* 2022). A pesar de su importancia mundial, la deforestación ha experimentado en las últimas décadas, un debilitamiento de aproximadamente un 30% entre 2018 y 2019. Para el año 2020 volvieron a presentarse fuertes incendios forestales, que según algunos expertos se deben principalmente al acaparamiento de tierras, la expansión de la frontera agropecuaria, la presión de los mercados internacionales, la falta de regulaciones y ausencia de políticas públicas adecuadas, y a efectos del cambio climático (de Araújo Mascarenhas *et al.* 2020).

La producción agropecuaria es uno de los principales rubros que ha aumentado en esta cuenca desde la denominada "Revolución Verde" (Júnior *et al.* 2022), lo que ha llevado al cambio del sistema productivo diverso, por el monocultivo que demanda el uso intensivo de fertilizantes químicos y agrotóxicos (Marin *et al.* 2022). Estos productos químicos son actualmente considerados "indispensables" para ser utilizados en prácticas agrícolas convencionales e intensivas. A pesar de su importancia para el control de malezas, plagas, o enfermedades; su uso genera fuertes impactos nocivos para la salud humana y la de los ecosistemas (Arévalo-Jaramillo *et al.* 2019; Silva *et al.* 2019).

Por otra parte, ciertos países que integran la cuenca amazónica tienen leyes que regulan el registro de los agrotóxicos; principalmente en los ingredientes activos del producto, la delimitación del sitio y cultivo donde se lo usará, la cantidad, frecuencia y tiempo de uso, prácticas de almacenamiento y la eliminación final de residuos y recipientes (Júnior *et al.* 2022). Sin embargo, se desconoce cómo estas leyes respaldan el compromiso de los países que integran la cuenca, en temas como la producción y consumo responsable de alimentos (Ochoa-Cueva *et al.* 2022), que es una meta clave del Objetivo 12 de Desarrollo Sostenible (<http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainabledevelopment-goals>).

Solo en Brasil, país que posee la mayor superficie de la cuenca Amazónica se ha incrementado el consumo de agrotóxicos en las últimas dos décadas, pasando de cerca de 150.000 en el año 2000 a más de 600.000 toneladas de ingrediente activo para el año 2019 (IBAMA 2020). Por lo tanto, es necesario revisar las publicaciones científicas sobre plaguicidas que se han realizado en todos los países que integran la cuenca Amazónica. Además, sistematizar la información obtenida según su temporalidad, el país en el que se realizaron los estudios, así como los principales enfoques o temas que fueron abordados en estas investigaciones. Fi-

nalmente, describir un caso de éxito de la cuenca, que pueda ser replicado por otras comunidades, localidades o cultivos. Esta revisión es de gran utilidad para investigadores, tomadores de decisión, entes de control y gobiernos locales o regionales que forman parte de la cuenca Amazónica. En consecuencia desarrollar acuerdos y políticas que contribuyan a reducir el uso de plaguicidas sintéticos y fomenten el desarrollo de alternativas que estén en armonía con el ambiente.

Materiales y métodos

Para llevar a cabo esta revisión sistemática se utilizó el método propuesto por Page *et al.* (2021), denominado (PRISMA) por sus siglas en inglés de (Preferred Reporting Items for Systematic and Meta-Analyses). Esta revisión se basó en la recopilación de artículos científicos que se encuentren disponibles en los repositorios Scopus y SciELO. Las palabras clave para la búsqueda fueron: "pesticides" AND "Amazon"; y "Agrotóxicos" AND "Amazônia", respectivamente. La última revisión de búsqueda antes del análisis de datos fue en enero de 2023.

Área de estudio

La cuenca del Río Amazonas incluye uno de los sitios con la mayor biodiversidad del planeta reconociéndose ocho zonas de endemismo (Rodrigues-Alcântara 2013). La selva Amazónica es la más extensa del planeta, con una superficie aproximada de siete millones de km², que se extiende desde la cordillera de Los Andes hasta la costa Atlántica (Nobre *et al.* 2021). Además, la cuenca Amazónica tiene una cobertura y uso de suelo diverso como lo muestra la Figura 1; que ha experimentado importantes cambios a lo largo de los años. Si bien la cobertura de bosque natural sigue siendo dominante en la región, solamente en Brasil (país con el mayor porcentaje de superficie y deforestación); se estima una pérdida de cerca de 45 Mha de bosque nativo entre 1985 y 2021, casi un 12%. El uso del suelo agropecuario fue el que más creció en este mismo período, con casi 244% (MapBiomas). Y la distribución territorial de uso agropecuario se concentra en la Amazonia oriental, pero se expande gradualmente hacia el interior.

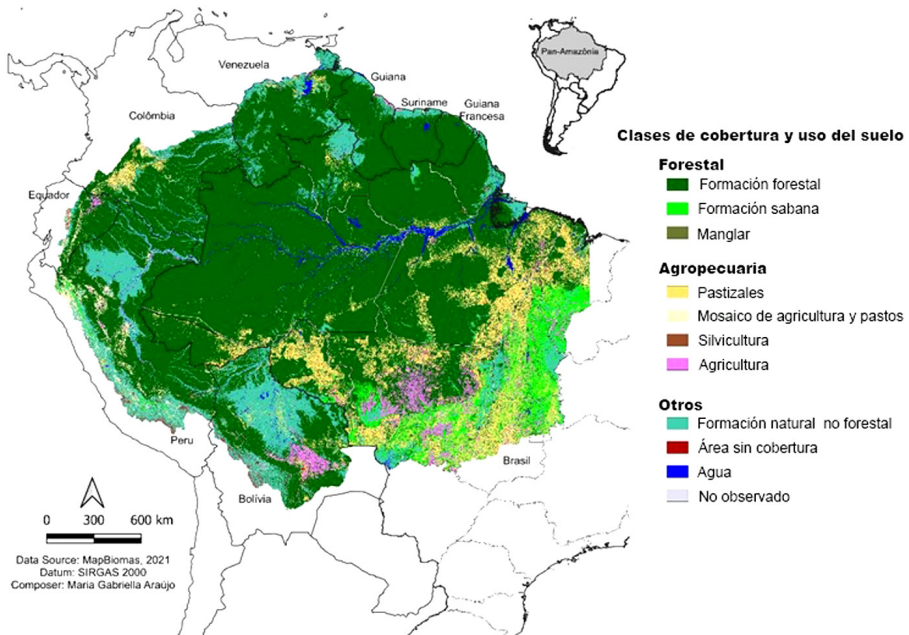


Figura 1 Área de estudio con el mapa de coberturas y usos del suelo de la cuenca Amazónica.

Selección y análisis de datos

Los artículos seleccionados para el análisis posterior fueron los que cumplían con los siguientes criterios: 1) que sean estudios con el tema principal de los plaguicidas; 2) la investigación se haya realizado en la cuenca Amazónica; 3) los artículos hayan sido publicados en revistas indexadas. Estos tres criterios se evaluaron inicialmente en el título, resumen y tipo de documento (artículo, revisión, conferencia, o capítulo de libro); para posteriormente, revisar el documento completo de las investigaciones cuya información no fue consistente en los apartados antes mencionados.

Para el análisis de datos de los artículos seleccionados y revisados, se generó una base de datos con información como: a) Año de publicación; b) Tipo de documento (artículo, revisión, capítulo de libro, y artículo de conferencia); c) País en el que se hizo la investigación y que forma parte de la cuenca Amazónica; y d) temas específicos relacionados con los impactos de los plaguicidas, mismos que fueron agrupados considerando los atributos de la sostenibilidad que se dividen conceptualmente en: económicos, ambientales, y socio-culturales (Reid *et al.* 2005). Obteniéndose así cinco subtemas distintos que son: Bioeconomía, Deforestación y pérdida de biodiversidad, Salud humana, Impacto social, y Agua-Suelo (recursos).

Se utilizó el lenguaje R para el análisis de la base de datos en la versión 4.2.2. para Windows, con las librerías dplyr y reshape2 para la tabulación de datos, ggplot2 y cowplot para generar las gráficas (Team Core, R.)

Resultados y discusión

Tendencias de publicación en el tiempo

De acuerdo con los resultados obtenidos para la cuenca Amazónica los primeros reportes de publicación en el tema de uso de productos químicos agrícolas inician en la década de los ochenta. Un estudio desarrollado por Brinkman (1983) describe el desbalance de nutrientes entre áreas naturales y los sistemas agropecuarios intervenidos por el ser humano. De las bases de datos, fueron revisados cerca de 100 artículos para analizar la tendencia histórica de las publicaciones, teniendo cuidado porque se repiten algunos registros entre ambas bases de datos.

La Figura 2 muestra la distribución temporal de los artículos científicos sobre plaguicidas sintéticos y sus impactos en la cuenca Amazónica. Inicialmente, se registran artículos desde la década de los ochenta en los que se inicia con la caracterización o descripción del problema, pero al pasar el tiempo se fueron diversificando las temáticas y publicando exponencialmente hasta la década actual de los 2020. Más del 85% de las investigaciones registradas en las bases de datos, han sido publicadas en los últimos 15 años.

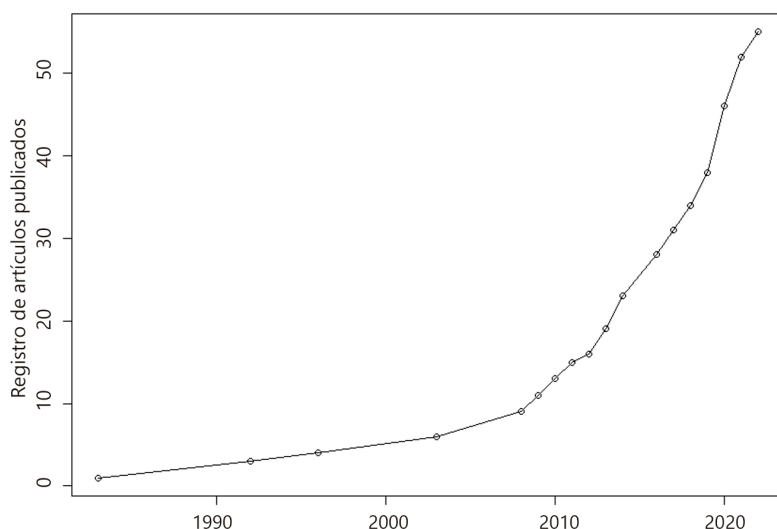


Figura 2 Distribución temporal de artículos científicos sobre el uso de plaguicidas en la cuenca Amazónica.

Analizando los datos colectados se puede afirmar que la investigación sobre el impacto de los plaguicidas sintéticos en la cuenca Amazónica sigue siendo escasa y novedosa, comparada con el contexto mundial. Al revisar las mismas bases de datos con el mismo tema general (plaguicidas), están disponibles estudios desde 1940, y estos registros sobrepasan los cien mil artículos. Por lo que a pesar de tener importancia mundial este tema, la capacidad científica instalada en la cuenca aún es escasa en relación con los esfuerzos de publicación de otras regiones.

Otro punto importante a destacar es la dificultad para internarse en la selva tropical amazónica, lo que detuvo inicialmente la fragmentación del bosque natural y la expansión de la frontera agrícola. Sin embargo, estudios más recientes como de Araújo Mascarenhas *et al.* (2020), mencionan que los herbicidas y la implementación de técnicas agrícolas intensivas son actualmente prácticas comunes en la Amazonia, favoreciendo el pilotaje fluvial, aéreo y terrestre; pero con fuertes impactos negativos en la salud humana y del medio ambiente. Vasco *et al.* (2021), mencionan que ha existido más esfuerzos de investigación en tratar de entender los factores que impulsan la deforestación en la Amazonía, que en entender por qué la población amazónica utiliza fertilizantes químicos y plaguicidas para su producción agrícola.

Tendencias de publicaciones por país que integra la cuenca amazónica

Como muestra la Figura 3 el país que ha tenido mayor producción científica sobre agrotóxicos es Brasil con el 81,5%, seguido por Ecuador que muestra el 11,8%. Curiosamente, ambos países muestran una fuerte diferencia en su extensión territorial amazónica. Sin embargo, el registro de publicaciones de los demás países que comparten la cuenca amazónica es muy bajo con el 1,3%. También la Figura 3 describe estudios desarrollados en más de un país integrante de la cuenca, nominados como "Regional". Cabe destacar que Guayana, Surinam y Venezuela, los 3 países restantes de la cuenca, no registran artículos sobre agrotóxicos en estas bases de datos revisadas. Este análisis nos permitió detectar un vacío de conocimiento en cuanto al número de artículos publicados, la temporalidad, y su relación con las políticas de gobierno que han sido implementadas en cada país. Además plantea interrogantes sobre si estas políticas han facilitado u obstaculizado los esfuerzos de publicación, discutidos en el apartado anterior.

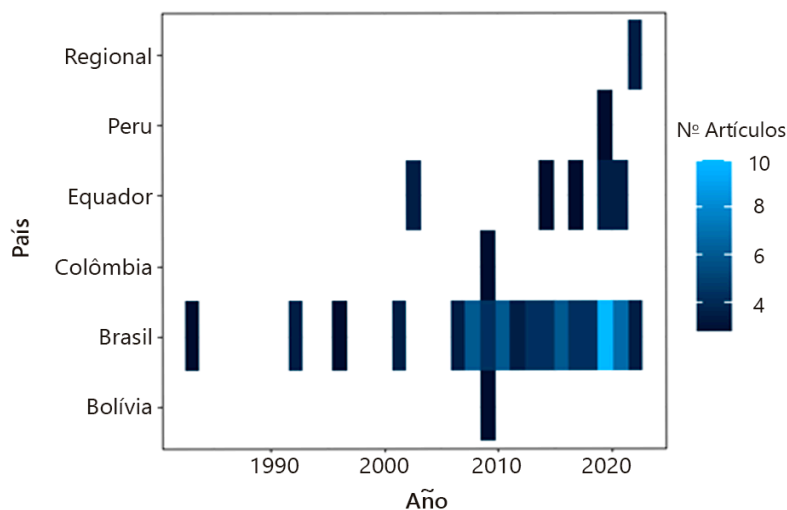


Figura 3 Distribución temporal de artículos registrados por país integrante de la cuenca Amazónica.

Tendencias de publicaciones por temas

La Figura 4 describe los temas en los que se clasificaron los impactos que genera el uso de los plaguicidas sintéticos sobre los atributos de la sostenibilidad pudiendo estos afectar en lo económico, ambiental, y/o sociocultural. Por lo que a continuación se hace un análisis detallado de estos cinco temas.

Agua / suelo (recursos)

Estos dos recursos naturales son objeto de estudio más frecuente cuando se investiga el impacto de los agrotóxicos sintéticos sobre el medio ambiente (Ochoa-Cueva *et al.* 2022). La revisión de este tema específico representa más del 30% de todos los temas bajo análisis. La mayoría de estos estudios se han desarrollado en Brasil, con excepción de un capítulo de un libro y un artículo que fueron abordados para toda la región sudamericana. Sin embargo, el primer registro de investigación sobre este tema es de mediados de 1990, de un estudio básico desarrollado por Louter *et al.* (1996). El objetivo de su estudio fue identificar micro contaminantes en muestras de agua superficial.

Los siguientes estudios se desarrollaron con diferentes enfoques, partiendo desde lo descrito por Winemiller *et al.* (2008) quienes estudian la diversidad y ecología de peces en los arroyos de los ríos tropicales, enfocándolo principalmente sobre la producción y consumo responsable de alimento, intentando conservar la biodiversidad tropical. En el mismo año Römbke *et al.* (2008), evalúa los riesgos de plaguicidas en suelos de la Amazonía central, comparándolos con zonas tem-

pladas para cotejar los posibles efectos en el suelo y biodiversidad de la región. Los siguientes estudios desarrollados por Copatti *et al.* (2009), Pessoa *et al.* (2010), enfocaron sus investigaciones en la calidad del agua usada para la producción agrícola, y Rico *et al.* (2011) evaluaron los efectos tóxicos de los agrotóxicos en peces e invertebrados endémicos de agua dulce.

En los siguientes estudios se enfoca el impacto de los plaguicidas en la calidad del suelo. Mussy *et al.* (2013), identificaron los microorganismos resistentes a uno de los herbicidas más usados para controlar malezas de hoja ancha y pastos (2,4-D). Mientras que Mendez *et al.* (2016) y Rodrigues *et al.* (2017) estudiaron la dinámica del DDT sobre el suelo y sedimentos en una llanura tropical inundable y en Belém respectivamente; ambos estudios dentro de la cuenca Amazónica encontraron indicios del DDT, pese a su prohibición. Otros estudios establecen comparaciones entre zonas con cobertura natural, frente a zonas con producción de la palma aceitera, encontrándose afectaciones en poblaciones de macroinvertebrados de estos arroyos amazónicos (Shimano & Juen 2016).

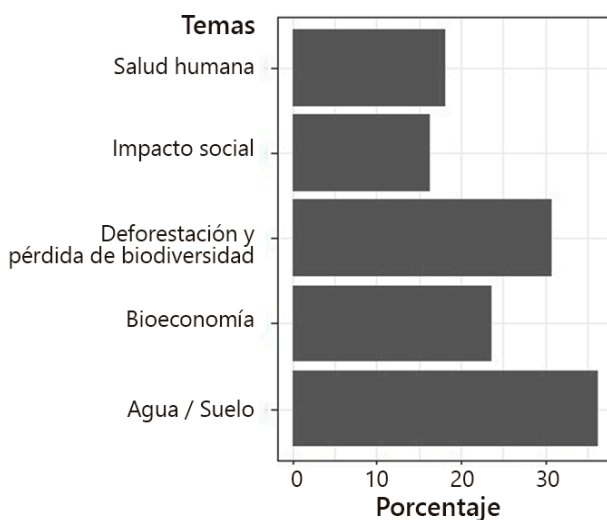


Figura 4 Tendencia de artículos publicados por temas.

A inicios del reciente quinquenio de análisis las publicaciones están relacionadas con la deposición de plaguicidas en agua y sedimentos (Neves *et al.* 2018; Viana *et al.* 2019). Todas las investigaciones siguientes que se registran en esta base de datos hacen referencia a la evaluación de riesgos ecológicos o ambientales (Guarda *et al.* 2020; Rico *et al.* 2022; Val *et al.* 2022; Viana *et al.* 2020), esta es una tendencia actual detectada para toda la región y el último fin que deberían

buscar estas, es encontrar un marco normativo local, nacional o con el apoyo de organizaciones internacionales, globalmente (Daam 2023).

Deforestación y pérdida de biodiversidad

Los avances de las fronteras agrícolas es uno de los principales factores de la deforestación de la selva amazónica. que tiene aproximadamente 7.000.000 km² y es una fuente de biodiversidad que representa aproximadamente el 25% de la biodiversidad global (Nobre *et al.* 2021). Y justamente esta vasta dimensión territorial y un estado ineficiente en el manejo de sus recursos naturales, han hecho atractiva a la cuenca Amazónica para muchos empresarios del sector agroalimentario (Neves *et al.* 2018).

Cuando hablamos de la Amazonía, es importante destacar que principalmente el cultivo de soja y el pastoreo de ganado son el buque insignia de la agroindustria. Para el éxito de la empresa, los plaguicidas sintéticos están presentes como el principal activo para el control de malezas, plagas, y/o enfermedades. Al abordar este tema es importante mencionar que Brasil tiene la Ley N° 7802 del 11 de julio de 1989 que prevé desde la etapa inicial de producción, su uso, hasta el destino final en la eliminación de los envases de estos productos químicos (Römcke *et al.* 2008; Waichman *et al.* 2007). Sin embargo, a pesar de esta legislación, el uso y manejo de plaguicidas sigue siendo intensivo y generalizado y las medidas de mitigación o alternativas de manejo integrado de plagas (MIP) siguen siendo mínimas, o casi nulas, en términos de competencia con los productos químicos disponibles en el mercado (Waichman 2012). Lamentablemente, en la Amazonía brasileña esta ley se vuelve ineficaz, porque desde el 2018 la agroindustria ha avanzado exponencialmente como si no existieran organismos reguladores o de aplicación de la normativa ambiental (Júnior *et al.* 2022; Lermen *et al.* 2018).

De acuerdo con una investigación realizada por Kleanindustries en el 2020, por muchos años los plaguicidas han sido liberados en la selva amazónica por rutas aéreas para tratar de evadir al Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables (IBAMA). El método de fumigación aérea con plaguicidas sintéticos funciona como una forma de limpieza de áreas que presentan dificultad de acceso. Como se mencionó anteriormente esta es una práctica que se viene utilizando desde el 2018, y esta forma de deforestación por envenenamiento de árboles ocurre más lentamente que por tala rasa o incendios. Lamentablemente esta "táctica" está ganando fuerza porque no puede ser detectada por las imágenes satelitales en tiempo real. Según Gonzales (2022), el glifosato y el 2,4-D son los herbicidas más utilizados para el envenenamiento de los árboles en las áreas naturales, y después de su muerte son removidos mecánicamente; facilitando así el posterior esparcimiento de semillas para la implantación de cultivos agrícolas.

El glifosato, el carbosulfán y el 2,4-D fueron los plaguicidas utilizados en la guerra de Vietnam donde aún se registran casos de malformaciones congénitas. Según la Agencia Brasil, estos plaguicidas se encontraron en claros de la región del arco de deforestación, donde la frontera agrícola avanza hacia la selva amazónica. Más de 30.000 hectáreas de selva ya han sido taladas utilizando productos químicos para el envenenamiento de árboles, por lo que de acuerdo con el (IBA-MA 2018) el drama en la Amazonia no hace más que aumentar.

A pesar de haber muchos estudios realizados sobre la práctica del uso de plaguicidas, o agroquímicos que es la nomenclatura más aceptada en el sector agroindustrial ya que es “menos ofensiva” para el mercado externo, esta sigue siendo intensiva como se mencionó anteriormente, a pesar de que el mercado externo exija medidas de disminución o mitigación del impacto ambiental, estas resultan ineficaces y lentas (Marin *et al.* 2022).

La Figura 1 muestra el área destinada para el uso agropecuario, solo entre el año 2000 y 2020 la producción agrícola en la Amazonia se incrementó en un 327,3%, totalizando 11,4 millones de ha de área cosechada, lo que representa aproximadamente a R\$ 57,3 mil millones (Possamai & Serigati 2022), y el estado de Mato Grosso represente casi el 70% de este total. Aun así, se cree que Brasil necesita más tierras cultivables, si con lo que actualmente se produce sirve para abastecer el mercado local y para la exportación. Por lo que Martinelli *et al.* (2016), consideran necesario repensar el modelo agrícola y ganadero; “abrir nuevas áreas talando la selva ya no es el plan”. Las áreas destinadas a ganadería en la Amazonia brasileña suelen estar asociadas con la deforestación ilegal, donde los títulos de propiedad falsos dificultan el control y regulación (Ribeiro 2020). Según profesionales del Instituto de Desarrollo Sostenible Mamirauá: “El ganado en si no es el problema, sino la forma de producción es la que puede ser beneficiosa o perjudicial”. Expresiones o posiciones como estas, debilitan los argumentos y las luchas para combatir la deforestación de la selva amazónica, favoreciendo la expansión de la soja y la ganadería. Perspectivas similares pueden estar dentro de los institutos académicos o de investigación (Júnior *et al.* 2022). Por lo tanto es indispensable difundir estudios que destaquen la importancia de la restauración de tierras, el uso de Buenas Prácticas de Producción Agrícola (BPPA), y el Manejo Integrado de Plagas (MIP), como alternativas de producción más sustentables.

Son necesarias acciones urgentes para prohibir o limitar el uso de los plaguicidas químicos en la producción agropecuaria, sugiriendo al mismo tiempo el uso de productos orgánicos que impulsen la bioeconomía de la zona. También es crucial contar con un estado eficaz para combatir la deforestación en la Amazonía, con fuertes órganos de control y supervisión, principalmente a los métodos de

pulverización aérea de agrotóxicos sobre el bosque. Esto requiere la inversión en tecnologías como teledetección y drones, necesarios para mejorar los esfuerzos de control y vigilancia.

Impacto social

Al tema del impacto social se puede abordar desde diferentes ámbitos, incluido el sector económico. Sin embargo, al tener un análisis específico del tema relacionado con la bioeconomía, se analizará desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos. Estos bienes y servicios igualmente los obtiene el ser humano de los ecosistemas, dentro de los cuales se encuentran los servicios ecosistémicos de apoyo, los de provisión y los culturales (Reid *et al.* 2005). La polinización y la dispersión de semillas están dentro de los servicios de apoyo y provisión. Por lo que, analizar estos servicios ambientales resulta fundamental para garantizar la salud y el bienestar humano, así como para mantener el equilibrio y la supervivencia de muchas especies en el planeta.

En relación con el tema central de esta revisión (los plaguicidas sintéticos), estos pueden provocar un impacto significativo sobre algunos servicios ecosistémicos. Por ejemplo, en la polinización se ha asociado el uso de algunos agrotóxicos con la disminución de las poblaciones de abejas (Sánchez-Bayo *et al.* 2016); teniendo un efecto negativo en la salud y el comportamiento de estas (Zhao *et al.* 2022), reduciendo su capacidad de forrajeo, aprendizaje y memoria (Siviter *et al.* 2018). Colin *et al.* (2019), sugiere que insecticidas como los neonicotinoides, incluso en dosis subletales favorecen la propagación de enfermedades en las abejas. Y más allá de matar directamente a las abejas, también puede afectar la salud de las colmenas (Gill *et al.* 2012). En consecuencia, también afecta la productividad de los cultivos dependientes de la polinización. En la Amazonía, la mayoría de las plantas que producen frutos comestibles son polinizadas por abejas (Paz *et al.* 2021). Por lo que el uso descontrolado de plaguicidas tendría severas implicaciones en los aspectos socioeconómico y de seguridad alimentaria, particularmente para las comunidades locales de la cuenca Amazónica.

Otro importante servicio ecosistémico de provisión y cultural para el mantenimiento de la biodiversidad es la dispersión de semillas que lo realizan principalmente las aves y los murciélagos. Incluso, algunas aves y murciélagos promueven la regeneración de áreas degradadas con esta dispersión de semillas (Athiê & Dias 2016). Mientras que, la exposición directa por la pulverización de los plaguicidas a las aves y murciélagos les compromete directamente en su salud, o de forma indirecta al consumir alimentos, agua, o al destruir su hábitat (Oliveira *et al.* 2020).

Los principales efectos de la contaminación por el uso de plaguicidas sobre las aves, es la pérdida de hábitats seguros, cambio en sus hábitos o comportamientos principalmente alimentarios, y disminución en su población por alteraciones en la reproducción, lo que podría conducir a su extinción local (Arya *et al.* 2019). En cambio los murciélagos que se alimentan de insectos son considerados con mayor susceptibilidad a los plaguicidas debido a que se encuentran en la parte superior de la cadena alimenticia (de Oliveira & Aguiar 2015). Los murciélagos insectívoros ayudan a controlar las poblaciones de insectos, incluidos los vectores de enfermedades como el dengue, la leishmaniosis y la malaria, así como de algunas plagas agrícolas (Oliveira *et al.* 2020). Así, el control biológico de plagas, que también es un servicio ecosistémico de regulación se ve afectado por el uso de plaguicidas. Las poblaciones de murciélagos observadas forrajeando en áreas de cultivo orgánico mostraron tiempos de alimentación más prolongados y mayor riqueza de especies en comparación con las encontradas en áreas cercanas a cultivos tratados con productos químicos (Barré *et al.* 2018). Los impactos son altos para estos animales y pueden reducir la capacidad de supervivencia de sus poblaciones, lo que genera grandes pérdidas no solo para los esfuerzos ecológicos de conservación, sino también en la socioeconomía dentro del área de estudio.

Salud humana

Sobre este tema de salud existen algunos aspectos por analizar; por ejemplo la salud de las poblaciones locales que son las que reciben afectaciones directas por el uso de plaguicidas para la producción agropecuaria de los cultivos cercanos a sus viviendas. Al mismo tiempo, muchas veces estas comunidades locales son las primeras en actuar para resguardar el ambiente con sus prácticas de manejo sostenible que cuidan el ambiente. Particularmente los pueblos indígenas, poseen conocimientos ancestrales y un profundo respeto por la “Madre Tierra”, lo que les otorga una perspectiva holística de su entorno. Esta perspectiva les permite proporcionar múltiples servicios ecosistémicos en beneficio de la humanidad como un todo (Ribeiro & de Sá Neto 2019).

Sin embargo, a pesar de sus contribuciones las comunidades ancestrales y los pueblos indígenas se enfrentan a desafíos como la marginación y los impactos negativos generados por la sociedad. También se enfrentan a políticas destructivas que invaden sus territorios (Oliveira *et al.* 2018). La contaminación por agrotóxicos y el envenenamiento son las principales amenazas para estos pueblos, junto con la minería que genera conflictos territoriales por el uso y prospección del suelo (Lima *et al.* 2022; Pignati *et al.* 2021; Ribeiro & de Sá Neto 2019).

Como se mencionó anteriormente, Brasil tiene una larga historia de uso de plaguicidas, que se refleja en las prácticas actuales y en los efectos nocivos observados, particularmente en las poblaciones indígenas (Ribeiro & de Sá Neto 2019). Si bien es imposible pasar por alto este problema histórico, es fundamental abordar los casos recientes de intoxicación por plaguicidas en poblaciones amazónicas, que son frecuentemente justificados como simples sucesos accidentales (Oliveira *et al.* 2018). Como se mencionó, la mayoría de los casos de intoxicación denunciados de afectación a pueblos indígenas se concentran en áreas cercanas a la frontera agrícola, principalmente en el sur de la Amazonía Legal, y específicamente en la región norte del estado de Mato Grosso. Esta área ha sido testigo de la implementación e imposición generalizada de prácticas de agronegocio a gran escala (Pinheiro *et al.* 2022). Mato Grosso es uno de los principales contribuyentes a la deforestación en la región amazónica, y también es el hogar de numerosos grupos indígenas, cuyos territorios están cada vez más invadidos por la expansión de los monocultivos. Y es un caso desatado de la degradación ambiental que puede causar el modelo de agronegocios, si continúa expandiéndose a otros estados amazónicos (Bombardi 2017; Oliveira *et al.* 2018).

En ese sentido, Gustavo Silveira indigenista de la Operación Nativa Amazonía (OPAN), sugiere un libro antropológico conciso que aborda la percepción indígena sobre la contaminación por plaguicidas. El libro busca comprender cómo los indígenas reflexionan sobre este tema en la región hidrográfica de la cuenca del Juruena, ubicada en el noroeste del estado de Mato Grosso (Oliveira *et al.* 2018). Comunidades indígenas como Paresi, Rikbaktsa, Manoki, Myky y Nambiquara destacan una intrínseca relación entre los plaguicidas, la pérdida de biodiversidad y la inseguridad alimentaria. Lo que representa una amenaza para la sostenibilidad de sus territorios. Es interesante notar que las perspectivas indígenas sobre la contaminación y los cambios observados en el paisaje difieren del discurso dominante en campos académicos especializados.

Desde la perspectiva del conocimiento indígena, los autores argumentan que "la atención no se centra en el daño que sufre únicamente la especie humana, sino que existe una preocupación por el bienestar de diversos seres vivos que, también están en riesgo de contaminación". En las narrativas de los indígenas se refleja esta preocupación al resaltar la contaminación de seres específicos como el emú, el pecarí, el pacú, la miel, y tantos otros, considerados como sujetos por derecho propio. Además el autor enfatiza que la forma en como ocurre la contaminación difiere entre varios seres. Por ejemplo, la contaminación para el ñandú, el pequí, el pacú y los humanos, es distinta entre sí". Esto subraya la íntima relación entre los cuerpos y el territorio que habitan. Los autores argumentan que la

naturaleza recíproca de esta relación es evidente, ya que la condición de habitar un lugar específico informa la condición de formar cuerpos, ya sean humanos, peces, animales terrestres, plantas u otros seres.

Otra referencia que ilustra la perspectiva indígena sobre los impactos de la agroindustria en Mato Grosso en sus territorios es el cortometraje *"Para onde foram as andorinhas?"* (disponible en YouTube), producido por Instituto Socioambiental e Instituto Catitu en el Parque Indígena Xingú (PIX). El cortometraje destaca que en los últimos 30 años el 42% de los bosques aledaños al PIX han sido talados para dar paso a monocultivos de soja y maíz. El PIX es el hogar de aproximadamente 6500 indígenas de 16 comunidades diferentes que dependen del bosque para su alimentación, materiales para rituales, recursos medicinales y materiales de construcción para sus viviendas. Los indios Xingú han observado la propagación de incendios forestales y como los frutos de su plantación se echan a perder antes de alcanzar su madurez.

Sin embargo en Brasil, faltan datos o informes sobre intoxicaciones por plaguicidas en poblaciones tradicionales. Los incidentes de envenenamiento en pueblos y aldeas se desconocen o no están incluidos en las estadísticas oficiales del gobierno (Marques *et al.* 2022). Esta disponibilidad limitada de información dificulta una comprensión integral del problema y plantea un obstáculo significativo para el desarrollo de políticas públicas de salud efectivas que puedan proteger a las comunidades locales (Ochoa-Cueva *et al.* 2022). Por consiguiente se vuelve un desafío abordar este problema en todas las escalas posibles.

Ampliar la investigación para evaluar los efectos adversos de los plaguicidas sobre las personas que habitan en lugares cercanos a las plantaciones de monocultivos, sigue siendo un desafío importante a resolver en el campo de la salud pública. Esta prospectiva de investigación también debe enfrentar los conflictos socioeconómicos y políticos actuales entre las comunidades indígenas que contribuyen al mantenimiento de la producción agrícola básica (Lima *et al.* 2022). Además es importante considerar el contexto histórico, de la fumigación con plaguicidas en áreas que rodean a las poblaciones amazónicas locales y sus efectos perjudiciales en su salud. También está pendiente analizar cómo las agroindustrias externas y transnacionales, promueven el uso de estos productos químicos para la producción agrícola incluso dentro de las comunidades indígenas (Leite 2007). Este último aspecto será ampliado con mayor detalle en el contexto de la bioeconomía que se describe a continuación.

Bioeconomía

Sobre este tema se encontraron registros de publicaciones científicas, siendo el 70% originarias de Brasil, 23% de Ecuador y el 7% de Perú. Los registros de

publicaciones iniciando con un solo artículo en la década de 1980, 1990, y 2010. Por tanto, más del 50% de las publicaciones sobre este tema se han registrado en los tres últimos años.

Por otra parte, la economía de Brasil depende en gran medida del sector agropecuario (Ribeiro 2020), lo que lo ha convertido en uno de los mayores consumidores de plaguicidas del mundo, solo superado por Estados Unidos (FAO 2022). Adicionalmente, Schiesari *et al.* (2013) destacan que en la región amazónica la falta de asistencia técnica conduce a un uso inadecuado de estos productos químicos, resultando en una sobre o sub dosificación. Ambas prácticas a corto y largo plazo contribuyen al aumento de la contaminación de los recursos naturales, por falta de eficacia del producto, por consiguiente se hacen aplicaciones más frecuentes; afectando directa e indirectamente en la salud de la población.

Ante esta realidad, es muy importante cambiar estratégicamente la dinámica del desarrollo agrícola de la cuenca, hacia un modelo más sostenible, que abarque aspectos económicos, sociales y ambientales (Arvor *et al.* 2017; Martinelli *et al.* 2010). Por ello, es fundamental difundir y reproducir casos exitosos de agricultura sustentable que hayan logrado eliminar o reemplazar el uso de estos insumos sintéticos por alternativas no perjudiciales para el ambiente y la salud humana. Esto se ejemplifica en Durofil *et al.* (2021) y Spletozer *et al.* (2021), quienes muestran el gran potencial que tienen algunas plantas amazónicas como las piperáceas para ser usadas como insecticidas naturales.

Impactos en la bioeconomía de comunidades amazónicas (Guaraná)

En el contexto de la bioeconomía relacionada con la producción agrícola en la región amazónica, existe un cultivo nativo conocido como guaraná [*Paulinia cupana* var. *sorbilis* (Martius) Ducke]. Originalmente clasificada como liana (trepadora) se transforma en arbusto cuando se cultiva en ambientes abiertos. Brasil es el único país que produce guaraná comercialmente en una escala significativa.

Según el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística - IBGE (2021), la producción de guaraná en el 2021 fue de aproximadamente 2.732 toneladas. Esto se produjo en un área de aproximadamente 10.099 ha, lo que resultó en un rendimiento promedio de 271 kg/ha. La facturación total generada por la producción de guaraná fue de R\$ 39.857.000,00. Entre los estados de Brasil, Bahía lidera en términos de producción con alrededor de 1.831 t, y un rendimiento promedio de 160 kg/ha.

En el estado de Amazonas, particularmente en la ciudad de Maués, una parte importante de la producción de guaraná es realizada por agricultores familiares. Los indígenas de la etnia Sateré Mawé, que se consideran hijos y descendientes

de la planta, se refieren a ella como “Waraná”, término que con el tiempo dio origen a su nombre comercial. Fueron los primeros en cultivarlo, con fines medicinales, alimenticios, espirituales y rituales. En esta etnia se cree que el fruto encarna el poder espiritual del conocimiento y sabiduría de los “Wará”. El guaraná tiene un gran significado para la población local de este municipio, representando su historia y cultura, al mismo tiempo que hace contribuciones sustanciales a la economía local y, posteriormente fomenta el avance social (Beaufort *et al.* 2008; Figueroa 2016; IDESAM 2018).

Actualmente, la producción de guaraná satisface principalmente la demanda en la industria farmacéutica con fines medicinales y en la industria de refrescos, donde se usa como extracto principal para las bebidas. El mercado de guaraná se ha expandido significativamente, lo que demanda aumentar la producción. Como resultado, los sistemas agrícolas tradicionales que anteriormente cultivaban guaraná han pasado a prácticas mayoritariamente de monocultivo (Filoche & Pinton 2014).

Para conseguir una mayor productividad, disminuir pérdidas, y mayor resistencia la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA) ha venido realizando mejoramiento genético y estudiando “plantas matrices” desde 1976. Esto les permitió desarrollar los “clones” que son la base del sistema de siembre en monocultivos (Atroch *et al.* 2012).

Para inducir el enraizamiento de estos “clones” se aplican fitohormonas, siendo el ácido indol-3-butírico el más utilizado. El sustrato para el cultivo consiste en una mezcla de tierra forestal, arena y superfosfato simple. El agua, la urea, y el cloruro de potasio se usan generalmente para la fertilización de las plántulas. A pesar de la resistencia de estos clones, aún tienen incidencia de enfermedades como la antracnosis [*Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. and Sacc.], y plagas como los trips (*Liothrips adisi*), que pueden afectar a las plantas en varios estados de crecimiento. Para mitigar las infestaciones se utilizan agroquímicos como acefato y deltametrina clasificados como insecticidas, y fungicidas como azoxistrobina, difenoconazol, metiltiofanato, tebuconazol y flutriafol (Pereira 2005).

Según Pereira *et al.* (2018), el uso de matrices clonadas en este “novedoso” sistema de producción, a provocado que algunos de los pequeños productores se vuelvan dependientes de agroquímicos y otros insumos, lo que ha incrementado los costos de producción y lo ha vuelto económicamente inviable. Una encuesta realizada por el Instituto de Conservación y Desarrollo Sostenible de la Amazonia - IDESAM (2018), revela que el 69% de los productores de la región establecen sus plantaciones de guaraná usando clones, de los cuales del 25 a 30% emplean fertilización química, los demás prefieren mantener las prácticas tradicionales y utilizar abonos orgánicos como la tierra negra, palos, ramas, hojas secas y restos de poda.

Los clones que no reciben el cuidado necesario, a menudo por la falta de recursos financieros de los productores, se vuelven más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades, afectando negativamente en los resultados finales de producción.

Además de los problemas económicos, el uso de agroquímicos tiene un impacto directo sobre las poblaciones de la familia Apidae, particularmente a las especies *Meliponia seminigra*, *Xylocopa muscaria* y *Apis mellifera*; las cuales son consideradas las principales polinizadoras del guaraná (Gondim 1984; Lima & Rocha 2012). Sin embargo, son necesarios estudios específicos que investiguen el comportamiento de las abejas frente a los plaguicidas aplicados al guaraná. También se sabe que adoptar prácticas agrícolas que apoyen a los polinizadores, como reducir el uso de plaguicidas especialmente durante la floración, y conservar el bosque cercano a los cultivos, para crear un ambiente favorable para la anidación y la disponibilidad de recursos florales para abejas, es crucial para mejorar la producción (Wintermantel *et al.* 2022).

En línea con la adopción de modelos agroecológicos sostenibles (MAS), los productores de las comunidades ribereñas del río Urupadi decidieron rescatar la forma ancestral de cultivar guaraná, reemplazando los clones, denominados por ellos como “hijos” de las lianas (planta madre) conocidos como “guaraná silvestre”, que se encuentran en estado natural dentro del bosque. La recolección de plántulas del bosque se lleva a cabo en áreas que alberga un banco genético diverso de guaraná silvestre. Estas plántulas luego se siembran junto a los árboles existentes, incluidos árboles frutales y otras especies naturales. Este enfoque de agroecosistema crea un entorno para el cultivo de guaraná que se parece mucho a su hábitat natural. Es probable que esta reproducción del entorno natural contribuya a la regulación natural de plagas y enfermedades. Como resultado, el área cultivada se transforma en un agroecosistema forestal que se beneficia de fuentes naturales de fertilización (Aguiar *et al.* 2021).

Para fortalecer el mercado, los productores del río Urupadi fundaron en 2015 la asociación AAFAU (Asociación de Agricultores Familiares del Alto Urupadi). Esta asociación está conformada por alrededor de 50 familias dedicadas al cultivo sostenible de guaraná, a través de la agricultura familiar. La asociación posee el sello ECOCERT (*Guaraná Organic Conformity Certificates*) que no solo certifica que el producto es 100% orgánico, sino que también enfatiza el valor del producto y de los productores, asegurando un precio justo para las ventas nacionales e internacionales (Trindade *et al.* 2021).

Adoptar un MAS en el que sus miembros participan activamente en la preservación y conservación de los bosques, ha demostrado ser un éxito para la AAFAU. Además de vender granos de guaraná tostado, la asociación ofrece pro-

ductos secundarios como polvo de guaraná orgánico, y una bebida refrescante hecha a base de guaraná. En 2017, los productores de esta asociación recibieron el registro de Organización de Control Social (OCS), que les permitió vender sus productos directamente en ferias, mercados o al gobierno (Pereira *et al.* 2020).

Actualmente la AAFAU vende sus productos a través de tiendas físicas y digitales en su sitio web. Y debido a esto cada vez más guaranacultores (productores de guaraná) se están sumando al movimiento y utilizan el guaraná silvestre como su producto principal. Es importante destacar que estos productores se abstienen de usar agroquímicos, con el objetivo de conseguir una producción en mayor equilibrio con el ambiente.

Tras finalizar la revisión de la literatura científica en este tema, se observó la falta de estudios comparativos de productividad entre el "clon de guaraná y el guaraná silvestre". Si bien se ha realizado una extensa investigación sobre el clon de guaraná, el estudio del guaraná silvestre en su forma y manejo actual es un tema de investigación relativamente reciente. Esta discrepancia temporal pone de manifiesto la necesidad de realizar más estudios para evaluar y comparar la productividad de estas dos variedades. También es fundamental realizar investigaciones que reconozcan el valor de la producción orgánica y familiar del guaraná y otros cultivos silvestres de la Amazonía, considerando no sólo aspectos económicos, sino también la preservación y perpetuación de la cultura local.

Conclusiones

Este estudio hace una revisión temporal de las publicaciones indexadas en bases de datos científicas sobre agroquímicos para toda la cuenca amazónica. Muestra el inicio y número de publicaciones por década de los diferentes países que conforman la cuenca. También describe cómo se han distribuido los diferentes enfoques de los estudios sobre plaguicidas, revelando posibles sesgos y lagunas de conocimiento en los datos detallados.

El uso de plaguicidas y la ampliación de la frontera agropecuaria son temas relacionados e multifacéticos que involucran diferentes sectores, siendo el aspecto económico hacia un mercado global el que prevalece en la actualidad. En consecuencia, existe la necesidad apremiante de ampliar los esfuerzos de investigación en todos los temas abordados, pero particularmente en los efectos adversos sobre la salud humana y ambiental (partes biótica y abiótica) de la Amazonía.

También es importante enfatizar la necesidad de describir alternativas de producción sostenible para la región. Una solución potencial incluye, aprovechar la producción agrícola de especies silvestres con producción orgánica y la

transformación de estos productos naturales con los mismos integrantes de las comunidades locales, activando la bioeconomía y el impacto social. Numerosos estudios de caso como el ejemplificado del guaraná en esta revisión, demuestran la viabilidad de replicar enfoques similares en diferentes comunidades, cultivos y países que integran la cuenca Amazónica.

Aunque la investigación científica sobre plaguicidas ha aumentado exponencialmente en los últimos 15 años, sigue siendo necesario mejorar las políticas públicas y la colaboración entre los 8 países que componen la cuenca. Los vínculos internacionales entre universidades e institutos de investigación permitirán establecer redes de colaboración que promuevan futuras investigaciones a favor de la gestión sostenible de los recursos naturales de la Amazonia.

Agradecimientos – Los autores agradecen a la Fundación de Investigación de São Paulo (FAPESP) por apoyar en el desarrollo de la primera edición de la Escuela de São Paulo de Ciencia Avanzada (ESPCA) Amazonia Inclusiva y Sostenible, FAPESP 2022/06028-3. Nuestro especial agradecimiento a los profesores que fueron parte de la ESPCA, quienes dieron sus comentarios y sugerencias para mejorar esta revisión.

Contribuciones de los autores – Todos los autores contribuyeron por igual a la conceptualización, metodología y redacción de las versiones inicial y final del texto.

Conflictos de intereses – Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses relacionados con la publicación de este manuscrito.

Ética – El presente estudio no involucra seres humanos y/o ensayos clínicos que deban ser aprobados por el Comité de Ética Institucional.

Referencias

-
- AGUIAR, O. D. C. M., DA SILVA LOPES, S. K., CASCAES, S. F., TRINDADE, L. L. L., DONEGÁ, M. V. B., RABELO, N. P., DA SILVA, S. C. P., PEREIRA, C. F., DE SOUZA, L. A. N., & FRAXE, T. D. J. P. (2021). Sistema agrícola tradicional e certificação orgânica: o caso dos guaranazais nativos das comunidades tradicionais do Alto Urupadi, Maués (AM). In: **Carla da Silva Sousa, Sayonara Cotrim Sabioni, Francisco de Sousa Lima.(Org.). Agroecologia: Métodos E Técnicas Para Uma Agricultura Sustentável. 1ed. Guarujá: Editora Científica Digital, 2**, 80-100. <https://doi.org/10.37885/210203245>
- ARÉVALO-JARAMILLO, P., IDROBO, A., SALCEDO, L., CABRERA, A., VINTIMILLA, A., CARRIÓN, M., & BAILON-MOSCOSO, N. (2019). Biochemical and genotoxic effects in women exposed to pesticides in Southern Ecuador. **Environmental Science and Pollution Research, 26**(24), 24911-24921. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05725-7>

- ARVOR, D., TRITSCH, I., BARCELLOS, C., JÉGOU, N., & DUBREUIL, V. (2017). Land use sustainability on the South-Eastern Amazon agricultural frontier: Recent progress and the challenges ahead. **Applied geography**, **80**, 86-97.
- ARYA, A. K., SINGH, A., & BHATT, D. (2019). Pesticide applications in agriculture and their effects on birds: an overview. **Contaminants in agriculture and environment: health risks and remediation**, **5**(10), 130-137.
- ATHIÊ, S., & DIAS, M. (2016). Use of perches and seed dispersal by birds in an abandoned pasture in the Porto Ferreira state park, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, **76**, 80-92.
- ATROCH, A. L., NASCIMENTO-FILHO, F. J. D., ANGELO, P. D. S., FREITAS, D. V. D., SOUSA, N. R. D., RESENDE, M. D., & CLEMENT, C. (2012). Domestication and breeding of the guaraná tree. **Domestication and Breeding: Amazonian Species**, Federal University of Viçosa, Viçosa, 333-360.
- BARRÉ, K., LE VIOL, I., JULLIARD, R., CHIRON, F., & KERBIRIOU, C. (2018). Tillage and herbicide reduction mitigate the gap between conventional and organic farming effects on foraging activity of insectivorous bats. **Ecology and Evolution**, **8**(3), 1496-1506.
- BEAUFORT, B., WOLF, S., & MARY, R. (2008). **Le guarana, trésor des indiens Sateré Mawé: mythes fondateurs, biodiversité, commerce équitable**. Y. Michel.
- BOMBARDI, L. M. (2017). **Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia**. São Paulo.
- BRINKMAN, W. (1983). Nutrient balance of a central Amazonian rainforest: comparison of natural and man-managed systems. **Hydrology of Humid Tropical Regions IAHS Publication**(140).
- COLIN, T. O., MEIKLE, W. G., WU, X., & BARRON, A. B. (2019). Traces of a neonicotinoid induce precocious foraging and reduce foraging performance in honey bees. **Environmental Science & Technology**, **53**(14), 8252-8261.
- COPATTI, C. E., GARCIA, L. D. O., & BALDISSEROTTO, B. (2009). Uma importante revisão sobre o impacto de agroquímicos da cultura de arroz em peixes. **Biota Neotropica**, **9**.
- DAAM, M. A. (2022). Towards a tiered regulatory framework for the prospective aquatic effect assessment of pesticides in (Neo) tropical areas. **Integrated environmental assessment and management**.
- DE ARAÚJO MASCARENHAS, G. M., DE ARAÚJO, L. M., & TIETZMANN, J. A. (2020). Agrotóxicos, dominação e fronteiras: significação, relação e perspectivas sobre o pacote tecnológico agrícola e a Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, **10**(3).
- DE OLIVEIRA, H. F. M., & AGUIAR, L. M. S. (2015). The response of bats (Mammalia: Chiroptera) to an incidental fire on a gallery forest at a neotropical savanna [Article]. **Biota Neotropica**, **15**(4), Article e0091. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2015-0091>
- DUROFIL, A., RADICE, M., BLANCO-SALAS, J., & RUIZ-TÉLLEZ, T. (2021). Piper aduncum essential oil: a promising insecticide, acaricide and antiparasitic. A review. **Parasite**, **28**, 42. <https://doi.org/10.1051/parasite/2021040> (L'huile essentielle de Piper aduncum: un insecticide, acaricide et antiparasitaire prometteur. Une synthèse.)
- FAO. (2022). Pesticides use, pesticides trade and pesticides indicators – Global, regional and country trends, 1990–2020. **FAOSTAT Analytical Briefs**, no. 46. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cc0918en>
- FIGUEROA, A. L. G. (2016). Guaraná, a máquina do tempo dos Sateré-Mawé. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, **11**.
- FILOCHE, G., & PINTON, F. (2014). Who Owns Guaraná? Legal Strategies, Development Policies and Agricultural Practices in Brazilian Amazonia. **Journal of Agrarian Change**, **14**(3), 380-399.
- GILL, R. J., RAMOS-RODRIGUEZ, O., & RAINE, N. E. (2012). Combined pesticide exposure severely affects individual-and colony-level traits in bees. **Nature**, **491**(7422), 105-108.
- GONDIM, C. J. E. (1984). Alguns aspectos da biologia reprodutiva do guaranazeiro (*Paullinia cupana* var. *sorbilis* (Mart.) Ducke - Sapindaceae. **Acta Amazonica**, **14**.

GONZALES, J. (2022). **Chemical defoliant sprayed on Amazon rainforest to facilitate deforestation in Brazil**. Retrieved February 14, 2023 from [https://news.mongabay.com/2022/01/pesticides-released-into-brazils-amazon-to-degrade-rainforest-and-facilitate-deforestation/#:~:text=Glyphosate%2C%20carbosulfan%20\(prohibited%20on%20aerial,of%20Deforestation%20\(the%20Legal%20Amazon](https://news.mongabay.com/2022/01/pesticides-released-into-brazils-amazon-to-degrade-rainforest-and-facilitate-deforestation/#:~:text=Glyphosate%2C%20carbosulfan%20(prohibited%20on%20aerial,of%20Deforestation%20(the%20Legal%20Amazon)

GUARDA, P. M., PONTES, A. M. S., DOMICIANO, R. D. S., GUALBERTO, L. D. S., MENDES, D. B., GUARDA, E. A., & DA SILVA, J. E. C. (2020). Assessment of Ecological Risk and Environmental Behavior of Pesticides in Environmental Compartments of the Formoso River in Tocantins, Brazil. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, 79(4), 524-536. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00770-7>

IBAMA. (2018). **Instrução Normativa Nº 27, De Dezembro de 2018. Ministério do Meio Ambiente Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais e Renováveis**. Retrieved 21 de Janeiro de 2023 from www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&force=1&legislacao=138813

IBAMA. (2020). **Consumo de agrotóxicos e afins (2000 - 2019)**. Retrieved 14 de Fev. 2023 from http://www.ibama.gov.br/phocadownload/qualidadeambiental/relatorios/2019/grafico_do_historico_de_comercializacao_2000-2019.pdf.

IBGE. (2021). **Produção do guaraná**. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/guarana/am>

IDESAM. (2018). INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA. A cadeia de valor do guaraná de Maués. **Ana Carolina Bastida da Silva, Eric Marotta Brosler, Laís Bentes de Almeida, Marina Yasbek Reia, Ramon Weinz Morato**, 82 p. il. Color. ISBN:978-85-64371-34-7.

JÚNIOR, J. M. V., VARGAS, L. P., & BET, V. T. (2022). Flexibilização dos agrotóxicos no Brasil: a expansão dos registros e do consumo. **Iniciação Científica Cesumar**, 24(1), 1-22.

LEITE, M. S. (2007). **Transformação e persistência: antropologia da alimentação e nutrição em uma sociedade indígena amazônica**. Editora Fiocruz.

LERMEN, J., BERNIERI, T., RODRIGUES, I. S., SUYENAGA, E. S., & ARDENGHI, P. G. (2018). Pesticide exposure and health conditions among orange growers in Southern Brazil. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, 53(4), 215-221.

LIMA, F. A. N. D. S., CORRÊA, M. L. M., & GUGELMIN, S. A. (2022). Territórios indígenas e determinação socioambiental da saúde: discutindo exposições por agrotóxicos. **Saúde em Debate**, 46, 28-44.

LIMA, M. C. D., & ROCHA, S. D. A. (2012). Efeitos dos agrotóxicos sobre as abelhas silvestres no Brasil. **Brasília, IBAMA** (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis).

LOUTER, A. J. H., VAN BEEKVELT, C. A., CID MONTANES, P., SLOBODNIK, J., VREULS, J. J., & BRINKMAN, U. A. T. (1996). Analysis of microcontaminants in aqueous samples by fully automated on-line solid-phase extraction-gas chromatography-mass selective detection. **Journal of Chromatography A**, 725(1), 67-83. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9673\(95\)00979-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-9673(95)00979-5)

MARIN, F. R., ZANON, A. J., MONZON, J. P., ANDRADE, J. F., SILVA, E. H. F. M., RICHTER, G. L., ANTO-LIN, L. A. S., RIBEIRO, B. S. M. R., RIBAS, G. G., BATTISTI, R., HEINEMANN, A. B., & GRASSINI, P. (2022). Protecting the Amazon forest and reducing global warming via agricultural intensification. **Nature Sustainability**, 5(12), 1018-1026. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00968-8>

MARQUES, N. R., DE LIMA, I. C. M., LOPES, A. C., DE ALCÂNTARA MENDES, R., FAIAL, K. R. F., MOTA, A. M., & MIRANDA, F. P.-J. (2022). Neurological Evaluation in Quilombolas Individuals Exposed to Organophosphorus Pesticides in the Brazilian Amazon Population. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 9, 7.

MARTINELLI, L. A., COLETTA, L. D., LINS, S. R. M., MARDEGAN, S. F., & DE CASTRO VICTORIA, D. (2016). Brazilian Agriculture and Its Sustainability. In G. Steier & K. K. Patel (Eds.), **International Food Law and Policy** (pp. 767-792). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978->

3-319-07542-6_32

- MARTINELLI, L. A., NAYLOR, R., VITOUSEK, P. M., & MOUTINHO, P. (2010). Agriculture in Brazil: impacts, costs, and opportunities for a sustainable future. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, 2(5), 431-438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.09.008>
- MENDEZ, A., NG, C. A., TORRES, J. P. M., BASTOS, W., BOGDAL, C., DOS REIS, G. A., & HUNGER-BUEHLER, K. (2016). Modeling the dynamics of DDT in a remote tropical floodplain: indications of post-ban use? **Environmental Science and Pollution Research**, 23(11), 10317-10334. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5641-x>
- MUSSY, M. H., BRUCHA, G., REIS, M. G., USHIMARU, P. I., YAMASHITA, M., & BASTOS, W. R. (2013). Identification of microorganisms resistant to the herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) in soils of Rondonia, Brazil. **Interciencia**, 38(5), 353-357.
- NEVES, P., COLABUONO, F., FERREIRA, P., KAWAKAMI, S., TANIGUCHI, S., FIGUEIRA, R., MAHIQUES, M., MONTONE, R., & BÍCEGO, M. (2018). Depositional history of polychlorinated biphenyls (PCBs), organochlorine pesticides (OCPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an Amazon estuary during the last century. **Science of the Total Environment**, 615, 1262-1270.
- NOBRE, C., ENCALADA, A., ANDERSON, E., & NEVES, E. G. (2021). Science panel for the Amazon: Amazon Assessment Report 2021: executive summary.
- OCHOA-CUEVA, P. A., ARTEAGA, J., ARÉVALO, A. P., & KOLOK, A. S. (2022). A potential pesticides exposure index (PPEI) for developing countries: Applied in a transboundary basin. **Integr Environ Assess Manag**, 18(1), 187-197. <https://doi.org/10.1002/ieam.4470>
- OLIVEIRA, J., DESTRO, A., FREITAS, M., & OLIVEIRA, L. (2020). How do pesticides affect bats?—A brief review of recent publications. **Brazilian Journal of Biology**, 81, 499-507.
- OLIVEIRA, L. K. D., PIGNATI, W., PIGNATTI, M. G., BESERRA, L., & LEÃO, L. H. D. C. (2018). Processo sócio-sanitário-ambiental da poluição por agrotóxicos na bacia dos rios Juruena, Tapajós e Amazonas em Mato Grosso, Brasil. **Saúde e Sociedade**, 27, 573-587.
- PAGE, M. J., MCKENZIE, J. E., BOSSUYT, P. M., BOUTRON, I., HOFFMANN, T. C., MULROW, C. D., SHAMSEER, L., TETZLAFF, J. M., AKL, E. A., BRENNAN, S. E., CHOU, R., GLANVILLE, J., GRIMSHAW, J. M., HRÓBJARTSSON, A., LALU, M. M., LI, T., LODER, E. W., MAYO-WILSON, E., MCDONALD, S., . . . MOHER, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **International Journal of Surgery**, 88, 105906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2021.105906>
- PAZ, F. S., PINTO, C. E., DE BRITO, R. M., IMPERATRIZ-FONSECA, V. L., & GIANNINI, T. C. (2021). Edible fruit plant species in the Amazon forest rely mostly on bees and beetles as pollinators. **Journal of economic entomology**, 114(2), 710-722.
- PEREIRA, C. F., DA SILVA, S. C. P., DONEGÁ, M. V. B., FRAXE, T. D. J. P., DA SILVA LOPES, S. K., CASCAES, S. F., AGUIAR, O. D. C. M., JUNIOR, S. V. C., TRINDADE, L. L. L., & PEREIRA, J. V. R. G. (2020). Certificação Orgânica de Cultivos de Guaraná Originários de Sementes Nativas pelas Comunidades Tradicionais do Alto Urupadí, Maués, AM. **Cadernos de Agroecologia**, 15(4).
- PEREIRA, C. F., SILDARRIAGA, G. M., SANTIAGO, J. L., FRAXE, T. D. J. P., & CASTRO, A. P. D. (2018). Organização de controle social da produção agroecológica do guaraná selvagem (Paullinia cupana Khunt.): experiência da Associação dos Agricultores Familiares do Alto Urupadí, no município de Maués—Amazonas. **Cadernos de Agroecologia**, 13(1).
- PEREIRA, J. C. (2005). Cultura do guaranzeiro no Amazonas (4. Edição). **Embrapa Amazônia Ocidental** 40 p. ISSN 1679-8880
- PESSOA, M. C. P. Y., FIGUEIREDO, R. D. O., DE QUEIROZ, S. C. N., GOMES, M. A. F., SOARES PEREIRA, A., CARVALHO, E. J. M., FERRACINI, V. L., SOUZA, M. D. D., LIMA, L. M., & CRUZ, F. M. (2010). CMLS94 Trends on Water Risk Contamination by Pesticide at Two Field Crops over Areas of Aquifers at Amazon and Southeast Regions, Brazil.
- PIGNATI, W. A., CORRÊA, M., & LEÃO, L. (2021). Desastres sócio-sanitário-ambientais do agronegócio e resistências agroecológicas no Brasil. **São Paulo: Outras Expressões**, 15, 364.

- PINHEIRO, C. D. P. D. S., SILVA, L. C., MATLABA, V. J., & GIANNINI, T. C. (2022). Agribusiness and environmental conservation in tropical forests in the eastern Amazon. **Sustainable Production and Consumption**, **33**, 863-874. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.015>
- POSSAMAI, R., & SERIGATI, F. (2022). A relevância do bioma Amazônia para a produção agrícola. **AgroANALYSIS**, **42**(2), 16-18.
- REGINA, A. W. (2021). Como os indígenas percebem a contaminação por agrotóxicos. **Cuiabá: OPAN**, **23**. <https://amazonianativa.org.br/wp-content/uploads/2022/10/Como-os-indigenas-percebem-a-contaminacao-por-agrotoxicos.pdf>
- REID, W. V., MOONEY, H. A., CROPPER, A., CAPISTRANO, D., CARPENTER, S. R., CHOPRA, K., DAS-GUPTA, P., DIETZ, T., DURAIAPPAH, A. K., & HASSAN, R. (2005). **Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment**. Island Press.
- REIS, L. S., BOULOUBASSI, I., MENDEZ-MILLAN, M., GUIMARÃES, J. T. F., DE ARAÚJO ROMEIRO, L., SAHOO, P. K., & PESSENDA, L. C. R. (2022). Hydroclimate and vegetation changes in southeastern Amazonia over the past 25,000 years. **Quaternary Science Reviews**, **284**, 107466. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107466>
- RIBEIRO, H. M., & DE SÁ NETO, C. E. (2019). Meios de extermínio na sociedade de risco: A pulverização de agrotóxicos em terras indígenas brasileiras. **Revista Jurídica Luso-Brasileira (RJLB)**, **5**.
- RIBEIRO, M. F. (2020). **Desmatamento zero: modelo sustentável inova a criação de gado na Amazônia**. Retrieved 14 de fev. 2023 from <https://brasil.mongabay.com/2020/04/desmatamento-zero-modelo-sustentavel-inova-a-criacao-de-gado-na-amazonia/#:~:text=A%20cria%C3%A7%C3%A3o%20de%20gado%20na%20Amaz%C3%B4nia%2C%20contudo%2C%20est%C3%A1%20quase%20sempre,Quase%20tudo%20ilegal>
- RICO, A., DE OLIVEIRA, R., SILVA DE SOUZA NUNES, G., RIZZI, C., VILLA, S., DE CAROLI VIZIOLI, B., MONTAGNER, C. C., & WAICHMAN, A. V. (2022). Ecological risk assessment of pesticides in urban streams of the Brazilian Amazon. **Chemosphere**, **291**, 132821. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132821>
- RICO, A., WAICHMAN, A. V., GEBER-CORRÊA, R., & VAN DEN BRINK, P. J. (2011). Effects of malathion and carbendazim on Amazonian freshwater organisms: comparison of tropical and temperate species sensitivity distributions. **Ecotoxicology**, **20**(4), 625-634. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0601-9>
- RODRIGUES-ALCÂNTARA, C. (2013). **Amazon: Biodiversity Conservation, Economic Development, and Human Impact**. Nova Publishers.
- RODRIGUES, A. O., DE SOUZA, L. C., DA SILVA ROCHA, C. C., DA COSTA, A. C. G., & DE ALCÂNTARA MENDES, R. (2017). Assessment of DDT and Metabolites in Soil and Sediment of Potentially Contaminated Areas of Belém, Amazon Region, Brazil. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, **99**(1), 125-130. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2090-x>
- RÖMBKE, J., WAICHMAN, A. V., & GARCIA, M. V. (2008). Risk assessment of pesticides for soils of the Central Amazon, Brazil: comparing outcomes with temperate and tropical data. **Integrated environmental assessment and management**, **4**(1), 94-104.
- SÁNCHEZ-BAYO, F., GOULSON, D., PENNACCHIO, F., NAZZI, F., GOKA, K., & DESNEUX, N. (2016). Are bee diseases linked to pesticides?—A brief review. **Environment international**, **89**, 7-11.
- SCHIESARI, L., WAICHMAN, A., BROCK, T., ADAMS, C., & GRILLITSCH, B. (2013). Pesticide use and biodiversity conservation in the Amazonian agricultural frontier. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, **368**(1619), 20120378.
- SHIMANO, Y., & JUEN, L. (2016). How oil palm cultivation is affecting mayfly assemblages in Amazon streams [10.1051/limn/2016004]. **Ann. Limnol. - Int. J. Lim.**, **52**, 35-45. <https://doi.org/10.1051/limn/2016004>
- SILVA, G. S. D., MATOS, L. V. D., FREITAS, J. O. D. S., CAMPOS, D. F. D., & ALMEIDA E VAL, V. M. F. D. (2019). Gene expression, genotoxicity, and physiological responses in an Amazonian fish, *Colossoma macropomum* (CUVIER 1818), exposed to Roundup® and subsequent acute hypoxia. **Comparative biochemistry and physiology. Toxicology & pharmacology : CBP**, **222**, 49-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.04.008>

org/10.1016/j.cbpc.2019.04.010

SIVITER, H., KORICHEVA, J., BROWN, M. J., & LEADBEATER, E. (2018). Quantifying the impact of pesticides on learning and memory in bees. **Journal of Applied Ecology**, **55**(6), 2812-2821.

SPLETOZER, A. G., SANTOS, C. R. D., SANCHES, L. A., & GARLET, J. (2021). Plantas com potencial inseticida: enfoque em espécies amazônicas. **Ciência Florestal**, **31**.

TRINDADE, L. L. L., CASCAES, S. F., PINHEIRO, N. R., PEREIRA, J. V. R. G., DA SILVA LOPES, S. K., & DONEGÁ, M. V. B. (2021). Extensão universitária e certificação orgânica: o caso das comunidades tradicionais no alto rio Urupadí, Maués-AM University extension and organic certification: the case of traditional communities in the Urupadí upper river, Maués-AM. **Brazilian Journal of Development**, **7**(12), 115030-115054.

VAL, A. L., DUARTE, R. M., CAMPOS, D., & DE ALMEIDA-VAL, V. M. F. (2022). Environmental stressors in Amazonian riverine systems.

VASCO, C., TORRES, B., JÁCOME, E., TORRES, A., ECHE, D., & VELASCO, C. (2021). Use of chemical fertilizers and pesticides in frontier areas: A case study in the Northern Ecuadorian Amazon. **Land Use Policy**, **107**, 105490. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105490>

VIANA, J. L. M., DINIZ, M. D. S., SANTOS, S. R. V. D., VERBINNEN, R. T., ALMEIDA, M. A. P., & FRANCO, T. C. R. D. S. (2020). Antifouling biocides as a continuous threat to the aquatic environment: Sources, temporal trends and ecological risk assessment in an impacted region of Brazil. **Science of the Total Environment**, **730**, 139026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139026>

VIANA, J. L. M., DOS SANTOS, S. R. V., DOS SANTOS FRANCO, T. C. R., & ALMEIDA, M. A. P. (2019). Occurrence and partitioning of antifouling booster biocides in sediments and porewaters from Brazilian Northeast. **Environmental Pollution**, **255**, 112988. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112988>

WAICHMAN, A. V. (2012). A problemática do uso de agrotóxicos no Brasil: a necessidade de construção de uma visão compartilhada por todos os atores sociais. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, **37**, 42-47.

WAICHMAN, A. V., EVE, E., & DA SILVA NINA, N. C. (2007). Do farmers understand the information displayed on pesticide product labels? A key question to reduce pesticides exposure and risk of poisoning in the Brazilian Amazon. **Crop Protection**, **26**(4), 576-583.

WINEMILLER, K. O., AGOSTINHO, A. A., & CARAMASCHI, É. P. (2008). 5 - Fish Ecology in Tropical Streams. In D. Dudgeon (Ed.), **Tropical Stream Ecology** (pp. 107-III). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012088449-0.50007-8>

WINTERMANTEL, D., PEREIRA-PEIXOTO, M.-H., WARTH, N., MELCHER, K., FALLER, M., FEURER, J., ALLAN, M. J., DEAN, R., TAMBURINI, G., KNAUER, A. C., SCHWARZ, J. M., ALBRECHT, M., & KLEIN, A.-M. (2022). Flowering resources modulate the sensitivity of bumblebees to a common fungicide. **Science of the Total Environment**, **829**, 154450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154450>

ZHAO, H., LI, G., CUI, X., WANG, H., LIU, Z., YANG, Y., & XU, B. (2022). Review on effects of some insecticides on honey bee health. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, 105219.

Sobre los autores

Ana Claudia Batista es una Ingeniera Forestal graduada de la Universidad del Estado de Pará (UEPA), con una maestría en Ciencias (Tecnología de la Madera) de la Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). En la actualidad, está realizando su doctorado en el Centro de Energía Nuclear en Agricultura (CENA/USP). <https://orcid.org/0000-0001-8226-7996>

Fátima Aparecida Arcanjo es Bióloga, graduada de la Universidad Estatal de Londrina (UEL), con maestría y doctorado en Ciencias Biológicas con énfasis en Biodiversidad y Conservación en Hábitats Fragmentados/UEL. Actualmente, realiza un posdoctorado en la Universidad Estatal de Londrina. <https://orcid.org/0000-0002-9107-6339>

Isabela Maria Souza Silva es Ingeniera Forestal graduada de la Universidad del Estado de Amazonas (UEA), con una maestría del Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonia (INPA). En la actualidad, se encuentra realizando su doctorado en el Centro de Energía Nuclear en Agricultura de la Universidad de São Paulo (CENA/USP). <https://orcid.org/0000-0001-7311-359X>

Maria Gabriella da Silva Araújo es licenciada en Ingeniería Ambiental por la Universidad Federal Rural de la Amazonia (UFRA), máster en Ciencias con especialización en Ecología Aplicada de la Universidad de São Paulo (USP), y actualmente es alumna de doctorado en el programa de Ecología Aplicada interunidades ESALQ-CENA. <https://orcid.org/0000-0003-1366-9929>

Mario Rique Fernandes es Licenciado en Ecología, Magíster en Desarrollo Sostenible y Doctor en Antropología Social. Es miembro del Núcleo de Estudios sobre la Amazonía Indígena (NEAI/UFAM) y consultor del Comité Científico de la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA). <https://orcid.org/0000-0002-1891-2943>

Pablo Ochoa Cueva es Ingeniero en Gestión Ambiental por la Universidad Técnica particular de Loja - UTPL. Con doctorado en Ciencias y Tecnologías Agrarias, de los Recursos Naturales y de Desarrollo Rural por las Universidades de Córdoba y Málaga. Actualmente es profesor titular en la UTPL en las modalidades presencial y a distancia. <https://orcid.org/0000-0003-2230-1026>.

Ulysses Madureira Maia es Biólogo egresado de la Universidade do Estado do Rio Grande do Norte/UERN. Tiene una Maestría en Ciencia Animal de la Universidade Federal Rural do Semi Árido/UFERSA y un Doctorado en Zoología de la Universidad Federal de Pará/UFPA. <https://orcid.org/0000-0003-0940-9331>