

UNIVERSIDAD DEL VALLE



**ACCIÓN DEL TIAMETOXAM Y SU POTENCIAL EFECTO EN EL ENSAMBLAJE
DE HORMIGAS EN UN CULTIVO DE MAÍZ (*ZEA MAYS L*)**

DANIEL ALBERTO PEREIRA CASTAÑEDA

Director

James Montoya Lerma, Ph.D.

Codirector

Kris Wyckhuys, Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS-BIOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

SANTIAGO DE CALI

SEPTIEMBRE DE 2024

**ACCIÓN DEL TIAMETOXAM Y SU POTENCIAL EFECTO EN EL ENSAMBLAJE
DE HORMIGAS EN UN CULTIVO DE MAÍZ (*ZEA MAYS L*)**

DANIEL ALBERTO PEREIRA CASTAÑEDA

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de

Doctor en Ciencias – Biología

Director James Montoya Lerma, Ph.D.

Codirector

Kris Wyckhuys, Ph.D.

Comité doctoral

Evaluadora interna: Inge Armbrecht, PhD.

Evaluadora nacional: Ana Milena Caicedo PhD.

Evaluadora Internacional: Martha Lucia Baena, PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS-BIOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

SANTIAGO DE CALI

SEPTIEMBRE DE 2024

**ACCIÓN DEL TIAMETOXAM Y SU POTENCIAL EFECTO EN EL ENSAMBLAJE
DE HORMIGAS EN UN CULTIVO DE MAÍZ (*ZEAMAYS* L)**

UNIVERSIDAD DEL VALLE

DANIEL ALBERTO PEREIRA CASTAÑEDA

MATERIAS O TEMAS

Ecología

Neonicotinoides

Servicios ecosistémicos

Comportamiento animal

Ectatomma ruidum

Zea mays

UNIVERSIDAD DEL VALLE

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS-BIOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

SANTIAGO DE CALI

SEPTIEMBRE DE 2024

“Life is a miracle beyond our comprehension, and we should reverence it even
where we have to struggle against it. . .”

— Rachel Carson, *Silent Spring*

Nota de aceptación

La tesis de grado " Acción del tiametoxam y su potencial efecto en el ensamblaje de hormigas en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.)", presentada por el estudiante DANIEL ALBERTO PEREIRA CASTAÑEDA para optar al título de Doctor en Ciencias Biológicas, fue revisada por el jurado calificador y calificada como:

JAMES MONTOYA LERMA

Director

KRIS WYCKHUYS

Codirector

INGE ARMBRECHT

Jurado 1

ANA MILENA CAICEDO

Jurado 2

MARTHA LUCIA BAENA

Jurado 3

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	8
RESUMEN GENERAL	9
INTRODUCCIÓN GENERAL	11
CAPÍTULO 1:.....	17
Efectos del uso profiláctico del tiametoxam sobre la mirmecofauna del cultivo de maíz	17
Resumen	17
Abstract	18
Introducción	19
Hipótesis general	22
Hipótesis específicas	23
Objetivo general	23
Objetivos específicos	23
Materiales y métodos	24
Área de estudio, diseño experimental y manejo del cultivo.....	24
Muestreo	25
Experimento de depredación	26
Análisis estadístico.....	27
Aspectos éticos.....	28
Resultados	28
Abundancia y riqueza de hormigas.....	28
Experimento de depredación	34
Discusión.....	38
Conclusiones.....	41
Literatura citada.....	42
Anexos Capítulo 1	54
CAPÍTULO 2:.....	57

Efecto “knockdown” del tiametoxam sobre <i>Ectatomma ruidum</i> sp.2 (Hymenoptera: Formicidae: Ectatomminae)	57
Resumen	57
Abstract	58
Hipótesis general	61
Hipótesis específicas	62
Objetivo general	62
Objetivos específicos	62
Materiales y métodos	63
Organismo modelo	63
Colonias de <i>E. ruidum</i>	64
Experimento de una única exposición	64
Análisis estadístico	65
Resultados	65
Discusión	71
Conclusiones	73
Literatura citada	75
Anexos Capítulo 2	86
DISCUSIÓN GENERAL	91
CONCLUSIONES GENERALES	94
LITERATURA CITADA GENERAL	96

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en gran manera a mi director James Montoya Lerma por su acompañamiento durante todo el desarrollo de mi investigación doctoral. A mi codirector Kris Wyckhuys por su guía en la planeación y orientación en el proceso de propuesta y desarrollo de este proyecto.

A los doctores Inge Ambrecht, Carlos Santamaria y Aymer Vásquez por su apoyo durante toda la investigación, a Carolina Londoño por su apoyo durante la escritura del documento. A Martha Lucia Baena y a Federico Escobar por su soporte y orientación durante mi estancia doctoral. Agradezco a Wilmar Torres, estadístico del Postgrado en Ciencias-Biología de la Universidad del Valle, por su asistencia en lo referente al análisis de los datos. A Armando Zapata y la UNAL por permitirme utilizar el CEUNP. A don Sergio y don Adriano por su apoyo en el manejo de los cultivos. A Carlos Santamaria, Carolina Londoño y Mónica Hernández por su ayuda en campo.

A mis amigos Carlos Santamaria, Ana Hurtado, Alejandra Hurtado, Paola Gómez, Cristian Fong, Aymer Vásquez, Angie Castillo, Juliana Leyton, Anderson Arenas, Vanessa Muñoz, Mauricio Cepeda, Jessica López, Janine Herrera, Mónica Hernández, Mauricio Rengifo, Carlos Maldonado, Eliana y Marcos Mayor quienes me han brindado refugio con su amistad en los momentos difíciles. A mi familia por su apoyo, a mis padres Daniel Omar Pereira y Carneza Castañeda, a ellos dedico este trabajo, a mis hermanos Carlos, Sebastián y Juan por su apoyo y comprensión.

A la Universidad del Valle, al posgrado en Ciencias Biología (Facultad de Ciencias Naturales y Exactas). Esta tesis fue financiada por el apoyo a los proyectos de investigación de los beneficiarios de la convocatoria 727 de 2015 para el apoyo a estudiantes de Doctorado Nacionales de Colciencias y por el Postgrado en Ciencias Biología de la Universidad del Valle.

RESUMEN GENERAL

Existe una creciente preocupación por la disminución de las poblaciones de insectos, un fenómeno que podría tener consecuencias devastadoras para los ecosistemas naturales y la seguridad alimentaria global. Una de las principales causas identificadas para este declive es el uso de insecticidas de amplio espectro, entre los cuales destacan los neonicotinoides. Estos insecticidas, como el tiametoxam, se utilizan de manera profiláctica para la protección de múltiples cultivos, especialmente como tratamiento de semillas en el cultivo de maíz. Sin embargo, su impacto sobre las comunidades de insectos benéficos, como las hormigas, importantes controladoras biológicas en cultivos tropicales, sigue siendo poco comprendido. Esta investigación doctoral tuvo como objetivo evaluar los efectos del uso profiláctico del tiametoxam en semillas de maíz sobre la mirmecofauna local, su actividad como agentes de control y las posibles consecuencias de la exposición sobre una especie no objetivo. En el primer capítulo, se evaluó el efecto del tiametoxam sobre la comunidad de hormigas y se investigó el posible impacto en su papel como controladoras biológicas mediante un experimento con presas centinelas utilizando larvas de *Spodoptera frugiperda*. No se encontraron diferencias significativas en la composición y abundancia de las comunidades de hormigas debido al tratamiento con tiametoxam; sin embargo, se observaron variaciones según el tiempo y la localidad. Se registraron diferencias significativas en el número de larvas de *Spodoptera frugiperda* depredadas ($p = 0,003$), siendo mayor en las parcelas no tratadas con tiametoxam. Según el análisis SIMPER, las especies de hormigas *Ectatomma ruidum* y *Solenopsis*

geminata fueron las que más contribuyeron a las diferencias en la depredación de larvas de *S. frugiperda* entre parcelas tratadas y no tratadas. Entre las especies observadas depredando las larvas, *E. ruidum* y *Odontomachus bauri* se asociaron predominantemente con las parcelas sin tratamiento. En el segundo capítulo, se evaluaron los efectos del tiametoxam sobre el comportamiento y la supervivencia de colonias de la hormiga *Ectatomma ruidum* sp.2 mediante una exposición única a una solución azucarada con una concentración de 1,0 µg/mL de tiametoxam. Se encontraron diferencias en la proporción de obreras activas entre las colonias tratadas y no tratadas, observándose una mayor actividad en las colonias tratadas. Los movimientos involuntarios fueron casi exclusivos de las colonias tratadas. Finalmente, se encontraron diferencias significativas en la supervivencia de las colonias tratadas y no tratadas, tanto para larvas como para obreras, con una mortalidad total de los individuos expuestos en ambos casos. Los resultados de este estudio demuestran que el uso profiláctico de tiametoxam en semillas de maíz puede reducir la eficacia del control biológico de plagas proporcionado por las hormigas, como se evidencia en la menor depredación de larvas de *S. frugiperda* en parcelas tratadas. Además, la exposición de colonias de *E. ruidum* sp.2 al tiametoxam generó alteraciones significativas en el comportamiento y una mortalidad total de las larvas y obreras, sugiriendo efectos potencialmente perjudiciales para la mirmecofauna y su función ecológica en cultivos tropicales.

Palabras clave: Ecología, Neonicotinoides, Control biológico, Comportamiento animal, *Ectatomma ruidum* sp.2, *Zea mays*.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz (*Zea mays*, Linnaeus 1753), originario de Mesoamérica, fue domesticado hace unos 9.000 años en la región que hoy comprende México (Awika, 2011; Kennett et al., 2020). Después de una dispersión inicial en las Américas, fue rápidamente diseminado alrededor del mundo a lo largo de la colonización europea, convirtiéndose en el cereal más importante del mundo con una producción global anual de más de un billón de toneladas métricas (Erenstein et al., 2022) con 197 millones de hectáreas sembradas en el año 2022 (FAOStat, 2021). Sus usos alrededor del globo son variados: como alimento humano y animal y como fuente combustible y endulzante.

Desde el momento de la siembra, el maíz está expuesto a los ataques de numerosas plagas, y entre los factores principales que favorecen o dificultan la aparición de plagas y enfermedades en el cultivo están: condiciones de clima, labores preparatorias del terreno, rotación de cultivos y el control de malas hierbas, entre otros (Chavas & Mitchell, 2018). Savary y colegas (2019) reportan que el cultivo de maíz sufre una pérdida promedio global del 22,6% en su rendimiento debido a la presencia de patógenos y plagas. La magnitud de estas pérdidas varía según la región, siendo menor en áreas con manejo agrícola intensivo y tecnologías avanzadas, como es el medio oeste de Estados Unidos y Canadá, mientras que éstas se agravan en regiones con inseguridad alimentaria, donde pueden alcanzar hasta un 41,1%. Plagas como el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), hongos de los géneros *Fusarium* y *Gibberella*, la roya del sur, y la planta parásita *Striga* son especialmente dañinas (Savary et al., 2019).

En Colombia, el maíz es el tercer cultivo con mayor superficie de siembra después del café y el arroz (Galeano et al., 2019), con más de 462.626 hectáreas sembradas en el 2022 (FENALCE, 2023). Este cultivo juega un papel crucial en la dieta de millones de colombianos y aporta, aproximadamente, el 9% de la energía

diaria necesaria a través de alimentos tradicionales como arepas y mazamorra (Coronado et al., 2022). En promedio, cada colombiano consume alrededor de 30 kg de maíz al año (Galeano et al., 2019). Un análisis de la producción local revela que los departamentos con mayor producción en Colombia se encuentran en las regiones de Orinoquía, Andina y Caribe (FENALCE, 2023). Según los datos del gobierno, en 2016, solo cinco de los 32 departamentos del país concentraron el 63% de su producción nacional: Meta en la región de Orinoquía; Vichada en la Amazonía; Valle del Cauca y Tolima en la Andina y Córdoba en la del Caribe (Galeano et al., 2019).

Dentro de los principales retos que enfrenta el cultivo de maíz en el país está el manejo de plagas insectiles que afectan sus rendimientos, destacándose el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith, 1797) y la chicharrita del maíz (*Dalbulus maidis* DeLong, 1923) asociada como vector principal del virus del achaparramiento (Coronado et al., 2022) y, actualmente, como la plaga más limitante en maíz. En efecto, esta especie, en 2016 causó pérdidas superiores al 70% en la región del Huila. En el Valle del Cauca se reportaron 10 aplicaciones de insecticida durante el ciclo del cultivo (4 meses) para el control de esta plaga (Rodríguez Chalarca et al., 2020). No obstante, el cogollero continúa siendo una plaga ampliamente distribuida en todas las regiones maiceras del país y del mundo, con numerosos hospederos alternos que aumentan su capacidad de daño lo que implica que sea considerado como uno de los más importantes a nivel económico. En Colombia, se registran pérdidas superiores al 60% (Gómez et al., 2010). El control de esta plaga se hace principalmente por medio de insecticidas químicos, lo que representa alrededor del 10% de los costos totales de producción del maíz y que traduce en un problema económico importante (Jaramillo-Barrios et al., 2020). La creciente demanda de maíz en el país ha conllevado el aumento progresivo del área sembrada de maíz tecnificado (FENALCE, 2023). Al mismo tiempo se ha aumentado el uso de diversos de insecticidas, destacándose el uso de neonicotinoides tanto mediante rocío foliar, como su uso como cobertores de

semillas. En Colombia, para 2017 se encontraban aprobados para su uso más de 180 productos comerciales con mezclas de moléculas pertenecientes al grupo de los neonicotinoides (Gómez Maldonado, 2021).

Los neonicotinoides (neonicos en adelante) son receptores nicotínicos de acetilcolina. Cuando se unen al sistema nervioso central de los insectos (aún en bajas concentraciones), actúan agonísticamente causando bloqueo de los receptores, parálisis y muerte (Goulson, 2013) en altas concentraciones. Como características principales exhiben una alta toxicidad en artrópodos que, a la vez, es baja en vertebrados (Lexmond et al., 2015) y una alta solubilidad relativa que les permite ser rápidamente absorbidos por parte de las raíces y hojas de las plantas, haciéndolos ideales como insecticidas sistémicos. Esto ha permitido que sean aplicados de manera amplia: aspersión foliar o directa en el suelo y como cobertor de semillas. Este último uso es el más extendido mundialmente y, en éste, el ingrediente activo es aplicado profilácticamente a las semillas antes de la siembra, extendiéndose por todos los tejidos de la planta mientras crece (Simon-Delso et al., 2015).

Los tratamientos de semillas con neonicotinoides presentan varias incompatibilidades con los principios del manejo integrado de plagas (MIP) (Goulson, 2013; Tooker et al., 2017). Primero, su uso masivo y rutinario, sin basarse en la presencia real de plagas, contraviene el enfoque selectivo del MIP, que busca aplicar insecticidas solo cuando es necesario. Esa práctica, dada la exposición continua a pequeñas cantidades de neonicos ha favorecido la generación de poblaciones de plagas resistentes a los mismos (Lexmond et al., 2015); así como también compromete la sostenibilidad del control biológico al afectar negativamente a los enemigos naturales de las plagas y genera múltiples efectos no deseados a los polinizadores (Goulson, 2013; Guillade & Folgarait, 2014), lo que contraviene el objetivo del MIP de minimizar los impactos negativos en organismos no objetivo (Metcalf & Luckmann, 1994; Tooker et al., 2017).

Los efectos negativos del uso profiláctico de neonicotinoides está documentado en numerosos grupos de organismos incluidos mamíferos (Mineau, 2005; Gu et al., 2013), aves (Köhler & Triebkorn, 2013; Mineau & Whiteside, 2013), abejas (Kremen et al., 2002; Whitehorn et al., 2012; Goulson et al., 2015) y en insectos agentes de control biológico (Lundgren et al., 2013; Guillard & Folgarait, 2014; Roubos et al., 2014a; Douglas et al., 2015; Moscardi et al., 2015). El control biológico representa una gran relevancia económica en sistemas agrícolas al ayudar a mantener controlados los daños causados por los artrópodos plaga, disminuir las pérdidas económicas y reducir la necesidad de insumos agrícolas para el control de plagas (Losey & Vaughan, 2006; Naranjo et al., 2015).

Los insectos que ejercen control biológico sobre otros artrópodos lo hacen por medio de dos mecanismos: parasitación y depredación y, según el caso, los depredadores se pueden alimentar de todos los estados de desarrollo de la presa (Paredes et al., 2013). Cabe destacar la función de los artrópodos depredadores generalistas ya que persisten en el campo incluso cuando las poblaciones de plagas clave son bajas y también pueden depredar plagas secundarias, demostrando su valor fundamental como agentes de control biológico en entornos agrícolas (Symondson et al., 2002).

Al afectar a este último grupo de depredadores se compromete la invaluable función de mantener las poblaciones plagas por debajo del umbral de riesgo de impacto económico (Roubos et al., 2014b). Lo anterior trae consigo aumentos explosivos en dichas poblaciones, así como también la aparición de aquellas secundarias que, bajo otras condiciones, no representan un riesgo de impacto económico (Douglas et al., 2015).

Los insectos benéficos (polinizadores y depredadores) pueden ser afectados tanto de manera letal como sub-letal (Gontijo et al., 2015) ya sea por contacto directo o

indirecto con los tejidos vegetales, polen y néctar de origen floral o extra-floral (Jenkins et al., 2013; Moscardini et al., 2015). El néctar extra-floral al estar presente desde estadios tempranos de desarrollo de la planta, es una fuente de exposición a residuos de insecticidas para diversos grupos de insectos benéficos entre ellos las hormigas (Heil, 2008; Barbieri et al., 2013; Heil et al., 2015), uno de los principales grupos de depredadores en los sistemas agrícolas tropicales (Offenberg, 2015).

Las hormigas poseen atributos especiales no compartidos con otros insectos benéficos como su presencia en la gran mayoría de ecosistemas, entre otros, su alta abundancia relativa respecto a otros grupos de insectos y su facultad de responder a explosiones repentinas de poblaciones de insectos plaga debido a su capacidad de rápido reclutamiento (Risch & Carroll, 1982). Esto les hacen excelentes controladoras de plagas (Offenberg, 2015). Además, una gran proporción de especies de hormigas son depredadoras generalistas, que cooperan durante la cacería de presas y algunas especies tienen obreras polimórficas lo que les permiten abordar un amplio rango de presas y atacarlas en diferentes estadios de su desarrollo (Mañák et al., 2013). Por otra parte, su nivel de saciedad es elevado (Offenberg, 2015) por lo que, a diferencia de otros artrópodos depredadores, continúan cazando, superando sus límites de forrajeo (Rueppell & Kirkman, 2005). Todo esto las hace muy recomendables para su empleo en las estrategias de manejo integrado (Way & Khoo, 1992).

En la actualidad se estima que más de 100 millones de hectáreas de cultivos en todo el mundo son tratadas anualmente con neonicotinoides, con tiametoxam representando una parte sustancial de este total (Simon-Delso et al., 2015). Este compuesto es especialmente popular como cobertor de semillas, utilizado en más del 90% de las semillas de maíz plantadas en Estados Unidos y en una proporción similar en otros cultivos clave como la soja y el algodón (Douglas & Tooker, 2015). A pesar de su eficacia en la protección contra una variedad de plagas, el uso

extensivo de tiametoxam ha generado preocupación debido a sus efectos adversos sobre organismos no objetivo, siendo aún desconocidos los posibles efectos que pueda tener sobre la mirmecofauna en la región neotropical, donde juegan un papel fundamental en el control biológico de plagas en el cultivo de maíz, en particular en la depredación de insectos dañinos como el gusano cogollero (Perfecto, 1990; Perfecto 1991; Wyckhuys & O'Neil, 2007). Especies como *Ectatomma ruidum* y *Solenopsis geminata* han demostrado ser depredadoras eficaces en estos sistemas agrícolas, al contribuir significativamente a la reducción de poblaciones de esta y otras plagas que afectan el rendimiento del cultivo (Risch & Carroll, 1982; Perfecto, 1990; Wyckhuys & O'Neil, 2007; Santamaria et al., 2009).

Teniendo presente todo lo anterior, esta investigación buscó revelar los posibles efectos que el neonicotenoide tiametoxam, insecticida recomendado en el tratamiento profiláctico de semillas de maíz alrededor del mundo, tiene sobre algunas especies de hormigas. Para esto se desarrollaron ensayos experimentales tanto de laboratorio como de campo. En el capítulo 1, se compara el ensamblaje de hormigas entre parcelas de maíz, como también la actividad depredadora de las mismas mediante un experimento de campo en parcelas tratadas y no tratadas con neonicos. En el capítulo 2, se abordaron ensayos de laboratorio con el objeto de determinar el efecto de una exposición única de una dosis de tiametoxam, comparando los posibles efectos letales y subletales teniendo como modelo la hormiga cazadora *Ectatomma ruidum* sp.2.

CAPÍTULO 1:

Efectos del uso profiláctico del tiametoxam sobre la mirmecofauna del cultivo de maíz

Resumen

El uso profiláctico de neonicotinoides, como el tiametoxam, se ha extendido en la agricultura moderna debido a su eficacia en el control de plagas. Sin embargo, sus efectos sobre los organismos no objetivo, en particular sobre la mirmecofauna y su función en el control biológico, requieren un examen detallado. Este estudio evaluó el impacto del tiametoxam aplicado en semillas de maíz sobre la abundancia, riqueza y actividad depredadora de hormigas en dos localidades del Valle del Cauca, Colombia. Se utilizó un diseño experimental que comparó parcelas tratadas con tiametoxam y parcelas no tratadas, realizando muestreos regulares de la mirmecofauna y evaluando su actividad de depredación sobre *Spodoptera frugiperda*. Aunque no se presentó una reducción significativa en la abundancia y riqueza de hormigas en parcelas tratadas con tiametoxam, en comparación con parcelas no tratadas, la actividad depredadora de hormigas sobre larvas de *S. frugiperda* fue menor en parcelas tratadas, lo que sugiere un impacto negativo del tiametoxam en la función depredadora de esta especie. Además, se observó una alteración en la composición de la comunidad de hormigas depredadoras, con un desplazamiento hacia especies más tolerantes al insecticida. Estos hallazgos indican que, si bien el tiametoxam puede ser eficaz en el control directo de plagas, su uso podría comprometer el control biológico natural y afectar la sostenibilidad a largo plazo de los agroecosistemas. Este estudio subraya la importancia de considerar los efectos colaterales de los neonicotinoides sobre los depredadores naturales y plantea la necesidad de estrategias de manejo integrado de plagas que minimicen el impacto en los organismos no objetivo. Las implicaciones ecológicas y agronómicas de estos resultados son cruciales para el desarrollo de

prácticas agrícolas más sostenibles y la conservación de la biodiversidad en ambientes agrícolas.

Palabras claves: neonicotinoides, tiametoxam, insectos benéficos, diversidad, servicios ecosistémicos, control biológico.

Abstract

The prophylactic use of neonicotinoids, such as thiamethoxam, has become widespread in modern agriculture due to their efficacy in pest control. However, their effects on non-target organisms, particularly on myrmecofauna and their role in biological control, require detailed examination. This study evaluated the impact of thiamethoxam applied to corn seeds on ant abundance, richness and predatory activity at two locations in Valle del Cauca, Colombia. An experimental design was used comparing thiamethoxam-treated and untreated plots, carrying out regular sampling of myrmecofauna and evaluating *Spodoptera frugiperda* predation. Although results did not show a significant reduction in ant abundance and richness in thiamethoxam-treated plots compared to untreated plots, the predatory activity of ants on *S. frugiperda* larvae was lower in treated plots, suggesting a negative impact of thiamethoxam on the predatory function of these species. In addition, an alteration in the composition of the predatory ant community was observed, with a shift towards species more tolerant to the insecticide. These findings indicate that while thiamethoxam may be effective in direct pest control, its use could compromise natural biological control, affecting the long-term sustainability of agroecosystems. This study underscores the importance of considering the side effects of neonicotinoids on natural predators and raises the need for integrated pest management strategies that minimize the impact on non-target organisms. The ecological and agronomic implications of these results are crucial for the development of more sustainable agricultural practices and the conservation of biodiversity in agricultural environments.

Key words: neonicotinoids, thiamethoxam, beneficial insects, diversity, ecosystem services, biological control.

Introducción

La disminución alarmante de las poblaciones de insectos a nivel mundial es un fenómeno multifactorial, donde la interacción de diversas causas ha desencadenado un declive sin precedentes (Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019; Wagner et al., 2021). La pérdida y fragmentación de hábitats, principalmente por la expansión agrícola y urbana, ha reducido drásticamente las áreas disponibles para la supervivencia y reproducción de los insectos (Piano et al., 2020). A esto se suma el cambio climático, que altera las condiciones ambientales esenciales, como la temperatura y los patrones de precipitación, exponiendo a las especies a situaciones de estrés extremo que muchas no pueden soportar (Harrison et al., 2015; Nice et al., 2019). Además, la introducción de especies invasoras, facilitada por el comercio global, ha generado presión por competencia y depredación sobre las especies nativas, agravando su situación (Wagner et al., 2021). Sin embargo, una de las causas más perniciosas y extendidas es el uso indiscriminado de insecticidas, particularmente los neonicotinoides, cuyos efectos letales y subletales no solo afectan a las plagas objetivo, sino que también tienen un impacto devastador sobre una amplia gama de insectos beneficiosos, comprometiendo su papel crucial en los ecosistemas y en la sostenibilidad agrícola (Desneux et al., 2007; Neumann et al., 2015; Pisa et al. 2015; Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019; Wagner et al., 2021).

Los neonicotinoides actúan como agonistas de los receptores nicotínicos de acetilcolina en el sistema nervioso central de los insectos al unirse firmemente a estos y causar una estimulación nerviosa a bajas concentraciones. A concentraciones más elevadas, sin embargo, estos compuestos bloquean los receptores, lo que provoca parálisis y, finalmente, la muerte del insecto (Goulson,

2013). Estos insecticidas son conocidos por su alta toxicidad para los artrópodos, mientras que ésta es, relativamente, baja para los vertebrados (Lexmond et al., 2015). Además, debido a su alta solubilidad, pueden ser rápidamente absorbidos por las raíces y hojas de las plantas, lo que ha permitido su uso extendido a nivel mundial. Estos se aplican comúnmente mediante aspersión foliar, aplicación directa al suelo o, más frecuentemente, como recubrimiento de semillas. Este último método, que consiste en la aplicación profiláctica del ingrediente activo a las semillas antes de la siembra, permite que el compuesto se distribuya a través de todos los tejidos de la planta a medida que esta crece (Simon-Delso et al., 2015).

A pesar de los numerosos reportes sobre los efectos indeseados asociados al uso de neonicotinoides como tratamiento profiláctico, esta práctica se ha difundido ampliamente como método de control de plagas, y afecta a artrópodos no objetivo en distintos sistemas (Pisa et al., 2015, Mamy et al., 2023). Al presente, no se conocen estudios sobre el potencial impacto en la comunidad de artrópodos del cultivo de maíz en la zona tropical. De acuerdo con Hallmann et al. (2017) el uso extendido de neonicos durante las pasadas décadas sería una de las causas de la pérdida dramática tanto de la diversidad como abundancia de insectos voladores en Alemania. Esta pérdida trae como consecuencia la degradación de las distintas funciones ecosistémicas asociadas a ella. En la recopilación de Chagnon y colegas (2015) ponen de manifiesto los efectos negativos que estos insecticidas tienen sobre distintas funciones ecológicas de los agroecosistemas. Entre ellas se destaca la reducción de la polinización (Desneux et al., 2007; Klein et al., 2007; Sánchez-Bayo & Goka, 2014), ya sea mediante el aumento en la mortalidad de abejas durante la aplicación de los neonicos a los cultivos, como reporta Gross (2008) o, indirectamente, por distintos efectos subletales: afectación de la habilidad forrajera de las abejas (Guez et al., 2001; Decourtye et al., 2004; Aliouane et al., 2009) y por la reducción de la resistencia a patógenos y parásitos (Goulson, 2003; Goulson et al., 2015).

Otro aspecto muy afectado por los efectos negativos de los neonicos es el control biológico de plagas por depredadores y parasitoides. Ellos juegan un papel fundamental en el manejo integrado de plagas (Byrne & Toscano, 2007) y pueden estar expuestos a los neonicos en variedad de formas (Pisa et al., 2015): por translocación al consumir néctar o presas que se han alimentado en plantas tratadas (Albajes et al., 2003; Douglas et al., 2015; Krischik et al., 2007; Calvo-Agudo et al., 2019) o por exposición a superficies tratadas, exposición o consumo de productos de gutación (Prabhaker et al., 2011; Khani et al., 2012).

Entre los grupos de depredadores en los cuales se ha trabajado con relación a los neonicos destacan Hemíptera (Albajes et al., 2003; Prabhaker et al., 2011), Neuróptera (Rogers et al., 2007), Coleóptera (Khani et al., 2012; Douglas et al., 2015), Arachnida (Řezáč et al., 2022) e Himenóptera (Byrne & Toscano, 2007; Liu et al., 2010). Entre los estudios del efecto de los neonicos en himenópteros, distintos a abejas, se destacan los realizados en avispas parasitoides por Stapel et al. (2000), donde se encontró que se reduce la longevidad y habilidad para forrajear de la avispa parasítica *Microplitis croceipes* al alimentarse con el néctar extra floral del algodón tratado con imidacloprid. Resultados similares en la sobrevivencia fueron encontrados para la avispa *Anagyrus pseudococci* alimentada sobre flores de plantas tratadas con este insecticida (Krischik et al., 2007). El estudio de Tappert y colegas (2017) en avispas parasitoides de *Nasonia vitripennis* muestra que la eficacia de búsqueda de pareja y de presas disminuye significativamente después de ser expuestas a dosis moderadas del mismo producto.

Las hormigas son organismos claves que brindan múltiples papeles ecológicos fundamentales en los agroecosistemas (Diamé et al. 2018; Frizzi et al. 2023). En cuanto a la relación entre neonicotinoides y la biodiversidad de las hormigas, la atención se ha centrado en las especies de hormigas invasoras. Varios estudios evaluaron la eficacia de los neonicotinoides para controlar especies de hormigas

invasoras, como la hormiga argentina *Linepithema humile* (Daane et al., 2008; Blight et al., 2011) y la hormiga de fuego *Solenopsis invicta* (Wang et al., 2020; Sakamoto & Goka, 2021). En referencia al tiametoxam, solo se han realizado estudios de mortalidad sin indagar cuáles otros efectos puedan tener (Wiltz et al., 2010). Galvanho et al. (2013) demostraron que el comportamiento de acicalamiento en la hormiga *Acromyrmex subterraneus* se ve comprometido cuando es expuesta a dosis subletales de imidacloprid. De manera similar, Barbieri et al. (2013) reportaron una disminución en la producción de progenie y un incremento en la agresividad en la hormiga *Linepithema humile* tras la exposición a neonicotinoides. En línea con estos hallazgos, Thiel y Köhler (2016) observaron un aumento en la agresividad de *Lasius flavus* al ser expuesta a imidacloprid. En recientes trabajos, los individuos de *Solenopsis invicta* expuestos a neonicos fueron afectados en su comportamiento (Pan et al., 2017; Wang et al., 2020) y en la producción de progenie viable (Wang et al., 2015).

Aunque algunas especies de hormigas tienen importancia capital en los sistemas productivos de maíz, otras pueden tener un papel dual y controversial al actuar como depredadores de ciertos herbívoros plaga del cultivo (Rish & Carrol, 1982; Perfecto, 1990; Perfecto, 1991; Wyckhuys & O'Neil, 2007; Corbara et al., 2019) y al mismo tiempo favorecer poblaciones de chupadores de importancia económica (Cudjoe et al., 1993). En ambas situaciones, dado el uso extensivo de los neonicos como agentes profilácticos, resulta de particular interés dilucidar algunos efectos de estos compuestos sobre su diversidad, abundancia y función como controladores biológicos, lo cual es objetivo del presente trabajo.

Hipótesis general

El uso profiláctico del neonico tiametoxam como cobertor de semillas de maíz, afecta negativamente la mirmecofauna, presente en el cultivo de maíz, así como algunos de los servicios de control biológico que estas brindan.

Hipótesis específicas

1. La abundancia y composición de hormigas, expuestas a la acción del tiametoxam en parcelas de maíz tratadas difieren de aquellas no tratadas.
2. La actividad de forrajeo y tasa de depredación de las hormigas en parcelas de maíz es afectada por el uso del tiametoxam afectando las tasas de herbivoría de las plagas presentes en el cultivo.

Objetivo general

Determinar el impacto del uso profiláctico del tiametoxam en semillas de maíz comercial sobre la mirmecofauna, identificando los posibles efectos sobre depredación que ejercen sobre potenciales plagas en el cultivo del maíz en una zona de neotropical de bosque seco.

Objetivos específicos

1. Determinar, los cambios en la abundancia y riqueza de las hormigas, en parcelas de maíz tratadas y no tratadas con tiametoxam.
2. Analizar la actividad depredadora de las hormigas en las parcelas de maíz tratadas y no tratadas con tiametoxam en diferentes etapas de madurez del cultivo, así como los posibles efectos sobre la tasa de herbivoría de las plagas presentes del cultivo.

Materiales y métodos

Área de estudio, diseño experimental y manejo del cultivo

El presente trabajo se llevó a cabo en dos localidades del Valle del Cauca (Colombia), ambas situadas en la zona de vida de bosque tropical seco, en el valle geográfico del río Cauca, Colombia: en el centro experimental de la Universidad Nacional de Colombia, en Candelaria (N 3°25'35" O 76°25'49"), temperatura promedio de 35°C y 37°C como máxima y de 11°C a 19°C como mínima con una altura de 975 m.s.n.m. y en la Finca Pajonales del corregimiento de Santa Elena, en El Cerrito (N 3°40'6.39" O 76°15'22"), temperatura promedio de 33°C y 35°C como máxima y de 10°C a 18°C como mínima con una altura de 987 m.s.n.m (Figura 1). Para evitar el efecto de residuos de productos agroquímicos se usaron terrenos con un histórico libre de su exposición por más de cinco años. Para la siembra se usaron semillas de maíz certificadas, pero sin tratamiento previo. En cada localidad se demarcaron 20 parcelas (diez para el tratamiento y diez para el control). Las parcelas delimitadas fueron de 15mx30m, separadas por diez metros entre sí y del borde. En las diez elegidas como tratadas, las semillas a sembrar fueron sumergidas por 10 minutos en el neónico Tiametoxam 1 gramo por litro, y las diez parcelas restantes no recibieron tratamiento de cubrimiento de semilla alguno. El control de malezas se hizo químicamente empleando glifosato (una aplicación antes de la siembra) y paraquat una aplicación 15 días después de la emergencia. La siembra se hizo mecánicamente a una densidad de 60.000 plantas por hectárea. La siembra en Candelaria se realizó el 26 de febrero de 2019 y mientras que en El Cerrito se hizo en agosto de 2021.

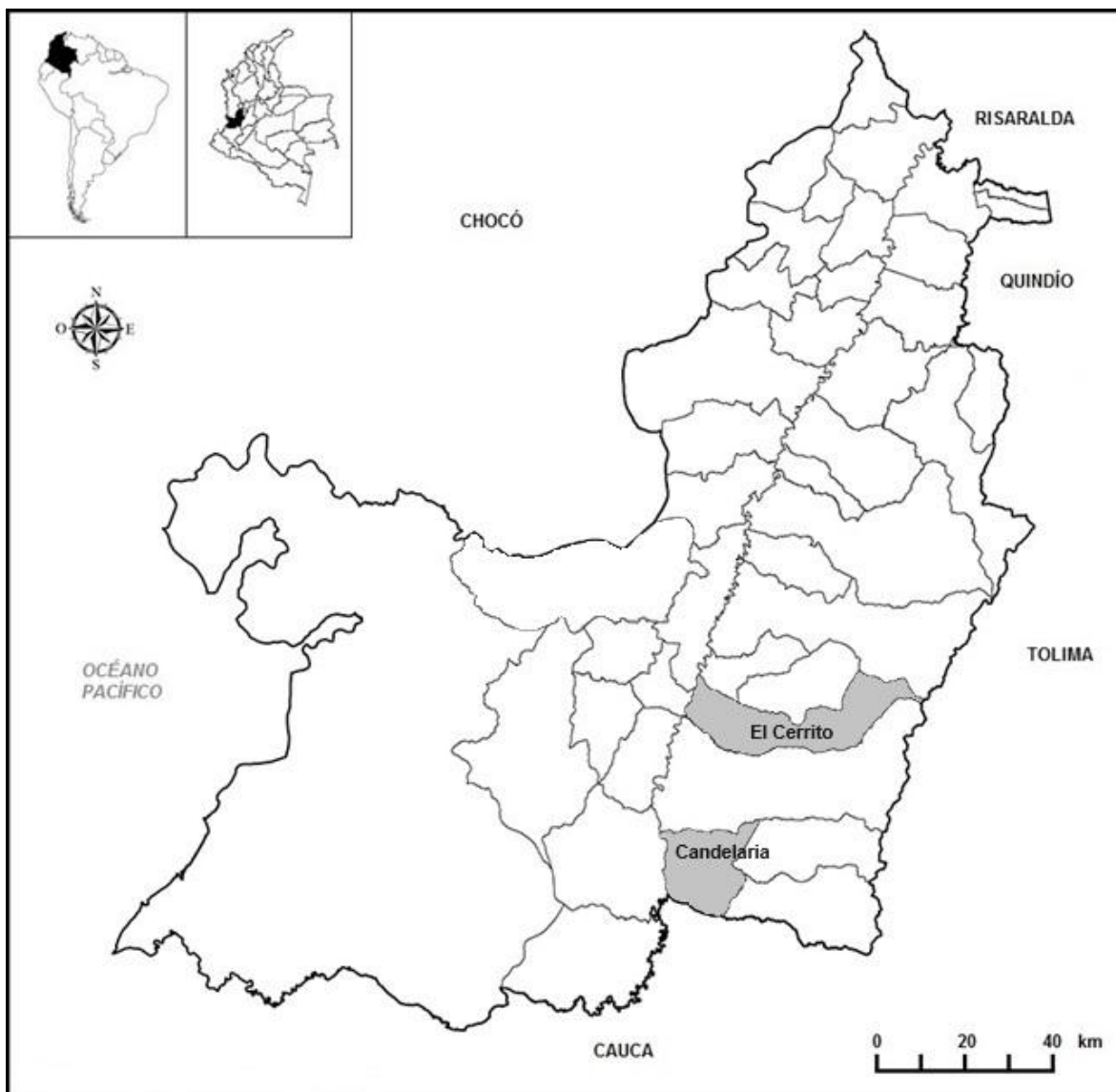


Figura 1. Ubicación de las fincas en Candelaria y El Cerrito (Valle del Cauca) para los experimentos de diversidad y depredación.

Muestreo

Para determinar la influencia del tratamiento profiláctico con tiametoxam en la abundancia y riqueza de hormigas y artrópodos benéficos del cultivo de maíz, se realizaron, desde la siembra hasta la cosecha, muestreos cada quince días por cuatro meses en dos ciclos de cultivo. En cada parcela, a una distancia mínima

con el borde de cinco metros, se instalaron aleatoriamente, diez estaciones consistentes en cinco trampas de caída o “pitfall” con alcohol al 70%, alejadas una de otra por un metro. Las trampas estuvieron activas por 72 horas, tiempo después del cual se recogieron. Como método complementario, en cada estación, se realizaron capturas manuales por diez minutos, enfocadas a los organismos que se encontraran en las plantas de maíz y el suelo adyacente. Los especímenes capturados por los distintos métodos de muestreo se llevaron al Laboratorio de ecología y comportamiento de Arthropoda, Departamento de Biología de la Universidad del Valle (Cali). Allí se realizó su respectiva identificación al nivel taxonómico más específico posible empleando las claves del libro de hormigas de Colombia (Fernández et al., 2019).

Además, desde la emergencia de las primeras hojas se realizó un monitoreo quincenal en las parcelas tratadas y no tratadas con tiametoxam para evaluar las poblaciones de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797), y otras plagas importantes del cultivo de maíz. Para esto se siguieron las directrices de monitoreo de Bellotti et al. (2007) ingresando por una orilla del cultivo y caminando en zig-zag hasta alcanzar el otro extremo, observando detalladamente 45 plantas del cultivo por parcela. En los monitoreos sucesivos, se hizo rotación ingresando al área del cultivo por extremos diferentes al inmediatamente anterior. Se registraron el número de plantas que estaban afectadas por *S. frugiperda* y otras plagas importantes.

Experimento de depredación

Para medir las tasas de actividad depredadora de las hormigas en las parcelas de maíz tratadas con tiametoxam se instalaron cebos, práctica usada en varios trabajos para este fin (Hahn & Wheeler, 2002; Nyamukondiwa & Addison, 2014; Kwon, 2016). Para medir la tasa de depredación por hormigas en cada parcela, se definieron, en cada estación, tres unidades experimentales (UE) consistentes cada

una de una larva de *Spodoptera frugiperda*, viva, expuestas en una trampa a ras de suelo que permitía la entrada a los depredadores, pero evitaba la huida de la larva. El montaje se realizó en el campo y una vez instaladas las unidades experimentales, se midió la supervivencia de estas a los 0, 15, 30, 60 y 120 minutos. El criterio para definir si una larva fue depredada fue que fuese consumida total o parcialmente. En cada ronda de observación se anotó el número de presas sobrevivientes y el número de presas depredadas. Las hormigas que se observaron depredando fueron puestas en tubos eppendorf con alcohol al 75% para su posterior identificación en laboratorio. Se realizó un experimento cada mes iniciando 15 días después de la siembra, siendo los siguientes días de muestreo al día 45, el 75 y por último el 105.

Análisis estadístico

Se construyeron modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) para establecer si la localidad, época de muestreo y el tratamiento afectaban la riqueza, abundancia de hormigas y la herbivoría por parte de las plagas del cultivo de maíz. Se seleccionó el modelo que mejor se ajustó a la naturaleza de los datos, basado en el Criterio de Información de Akaike AIC. Se utilizó el paquete *lme4* (Bates et al., 2015) para correr el análisis en R. Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson para medir la relación entre las variables y se realizó un gráfico de “pair-plot” para visualizar las relaciones entre las variables analizadas en los modelos.

En el experimento de depredación, se realizó un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) para visualizar las diferencias y similitudes en las comunidades de hormigas capturadas depredando *S. frugiperda* entre las parcelas tratadas y no tratadas. Como complemento se realizaron el análisis ANOSIM (análisis de similitudes) y SIMPER (porcentaje de similitud) para evaluar diferencias en la composición de comunidades entre las especies de hormigas que

contribuyen más a la disimilitud entre las parcelas tratadas y no tratadas. En el ANOSIM se utilizó el método de disimilitud de Bray-Curtis, agrupando los datos de acuerdo con el tratamiento con 9999 permutaciones. Para el desarrollo de estos análisis se utilizaron las librerías *vegan* e *indicspecies* en el programa estadístico R (R Development Core Team, 2019).

Aspectos éticos

La colecta de artrópodos se hizo bajo el amparo permiso de colecta de la resolución 1070 del 28 de agosto de 2015. Ninguno de los organismos objetivo del muestreo se encuentra en peligro de extinción. En los experimentos de campo con el insecticida tiametoxam se tomaron todos los cuidados y consideraciones de acuerdo con su protocolo de uso. En este trabajo no se tomaron muestras de tejido con fines de extracción de ADN.

Resultados

Abundancia y riqueza de hormigas

Se capturaron 14.055 individuos de Formicidae, repartidos en 50 especies de 26 géneros. Se registraron 39 especies de hormigas en Candelaria y 32 en El Cerrito. *Solenopsis geminata* (Fabricius, 1804) fue la especie más abundante, con 3.496 individuos, también tuvo el mayor número de registros tanto en Candelaria como en El Cerrito (219). La segunda especie más abundante fue *Wasmannia auropunctata*, con 2.850 individuos. En ambos sitios de muestreo no se encontró una especie asociada únicamente a un tratamiento (Tabla A1).

El análisis de devianza para evaluar los efectos del tratamiento, localidad, el tiempo y sus interacciones sobre la abundancia de hormigas, no se encontró efecto por el tratamiento, sin embargo, se mostró que la localidad tuvo un efecto

estadísticamente significativo ($\chi^2=19.8686$, $df=1$, $p=8,295e-6$), al igual que el tiempo ($\chi^2=44.6114$, $df=8$, $p=4,360e-7$). Además, se observó una interacción significativa entre la localidad y el tiempo ($\chi^2=44.4799$, $df=8$, $p=4,617e-7$). Estos resultados sugieren que tanto la localidad como el tiempo, así como su interacción, influyen de manera significativa en la abundancia de hormigas. En el análisis *post hoc* de Bonferroni se evidenciaron diferencias estadísticas que se observan en el comportamiento de los datos de abundancia gráficamente (Figura 2). Se encontraron diferencias en la localidad de Candelaria al inicio de la siembra ($p=0,002$), a los 30 días ($p< 0,001$) y a los 90 días después de la siembra ($p=0,003$). Para El Cerrito se encontraron diferencias a los 15 días ($p= 0,001$), 45 días ($p=0,001$) y a los 105 días después de la siembra ($p=0,05$).

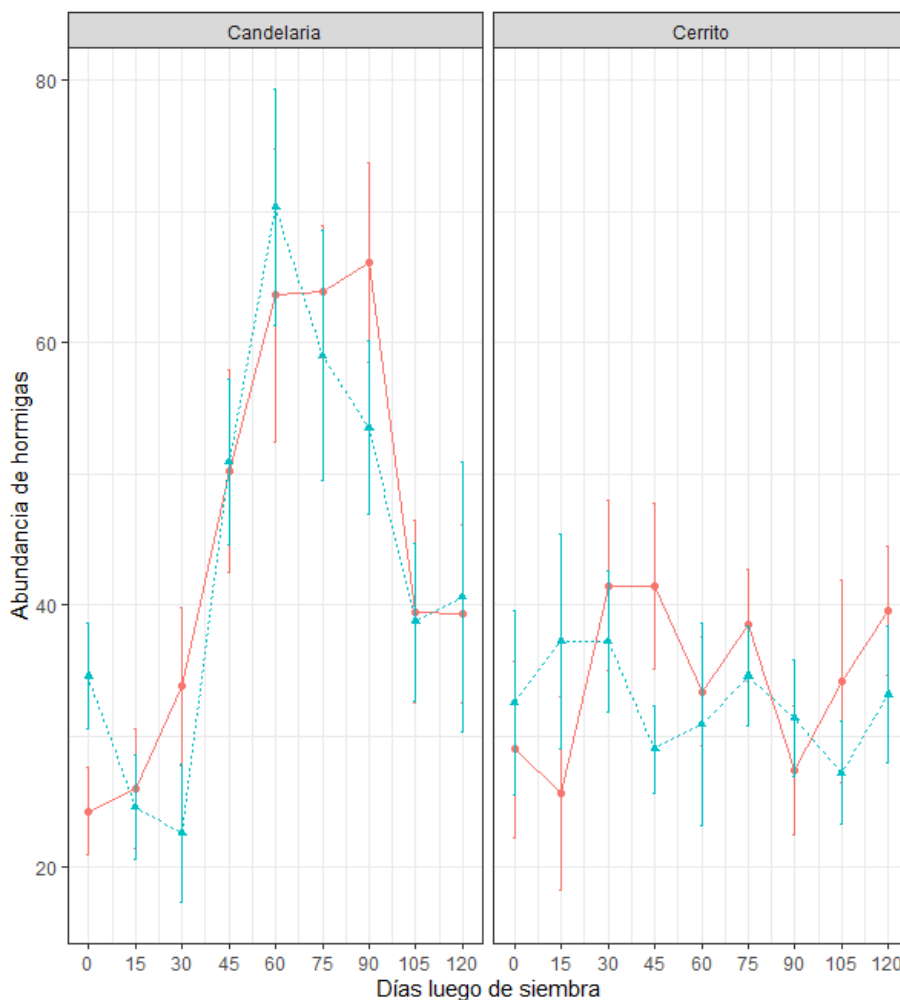


Figura 2. Abundancia promedio de Formicidae desde la siembra a la cosecha de maíz, las líneas rojas muestran el comportamiento de la abundancia en las parcelas no tratadas y las líneas azules el comportamiento en las parcelas tratadas. El asterisco denota el periodo donde se encontraron diferencias.

El análisis de devianza para evaluar los efectos del tratamiento, localidad, tiempo, y sus interacciones sobre la riqueza de hormigas reveló, ausencia de diferencias por tratamiento) tuvo un efecto estadísticamente significativo por localidad (Figura 3 ($\chi^2=71.588$, $df=1$, $p=2,2e-16$), al igual que el tiempo ($\chi^2=172.2571$, $df=8$, $p=2,2e-16$), Además, se observó una interacción significativa entre la localidad y el tiempo ($\chi^2=57.003$, $df=8$, $p=1,798e-9$). Estos resultados sugieren que tanto la localidad como el tiempo, así como su interacción, influyen de manera significativa en la riqueza de hormigas. En el análisis *post hoc* de Bonferroni se evidenciaron diferencias en la localidad de Candelaria a los 30 días después de la siembra ($p<0,001$).

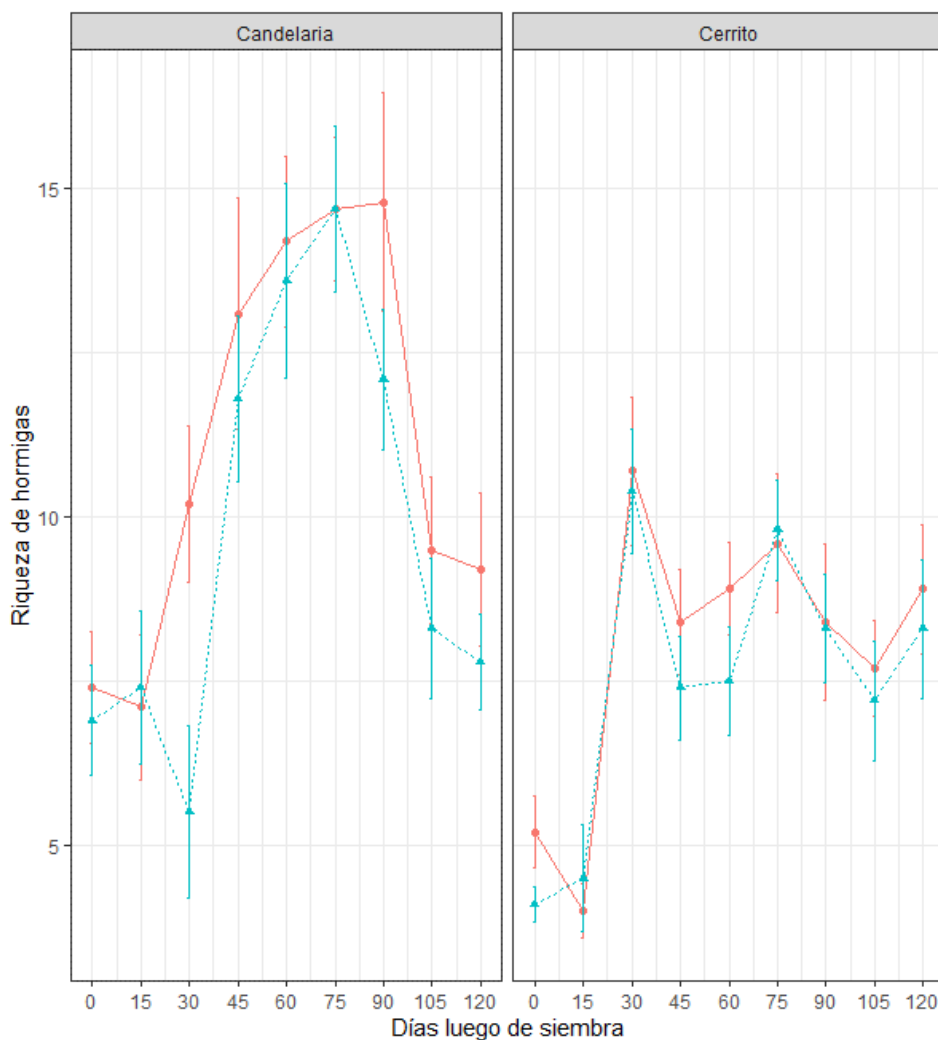


Figura 3. Riqueza promedio de Formicidae desde la siembra a la cosecha de maíz, las líneas rojas muestran el comportamiento de la riqueza en las parcelas no tratadas y las líneas azules el comportamiento en las parcelas tratadas. El asterisco denota el periodo donde se encontraron diferencias.

Finalmente, al realizar el análisis de devianza para evaluar los efectos de la localidad, el tratamiento, el tiempo, y sus interacciones sobre la herbivoría (Figura 4) se registraron efectos estadísticamente significativos para el tratamiento ($\chi^2=60.000$, $df=16$, $p=2,2e-16$), la localidad ($\chi^2=135.957$, $df=16$, $p=<2,2e-16$), y el tiempo ($\chi^2=510.585$, $df=29$, $p=2,2e-16$). Además, se observaron interacciones significativas entre la localidad y el tratamiento ($\chi^2=25.596$, $df=8$, $p=0,0001$), la

localidad y el tiempo ($\chi^2=127.175$, $df=15$, $p=2,2e-16$) y el tratamiento y el tiempo ($\chi^2=35.082$, $df=15$, $p = 0,002$). Estos resultados indican que la localidad, el tratamiento, el tiempo, y las interacciones entre estos factores influyen significativamente en la herbivoría. De acuerdo al análisis de Bonferroni en Candelaria, la herbivoría fue significativamente mayor en las plantas no tratadas en comparación con las tratadas en los tiempos 15 ($p = 0,0026$), 30 ($p = 0,0093$) y 60 ($p = 0,0200$). En El Cerrito, se observaron diferencias significativas en los tiempos 45 ($p = 0,0304$), 60 ($p = 0,0007$) y 120 ($p = 0,0083$), con mayores niveles de herbivoría en las plantas no tratadas en comparación con las tratadas.

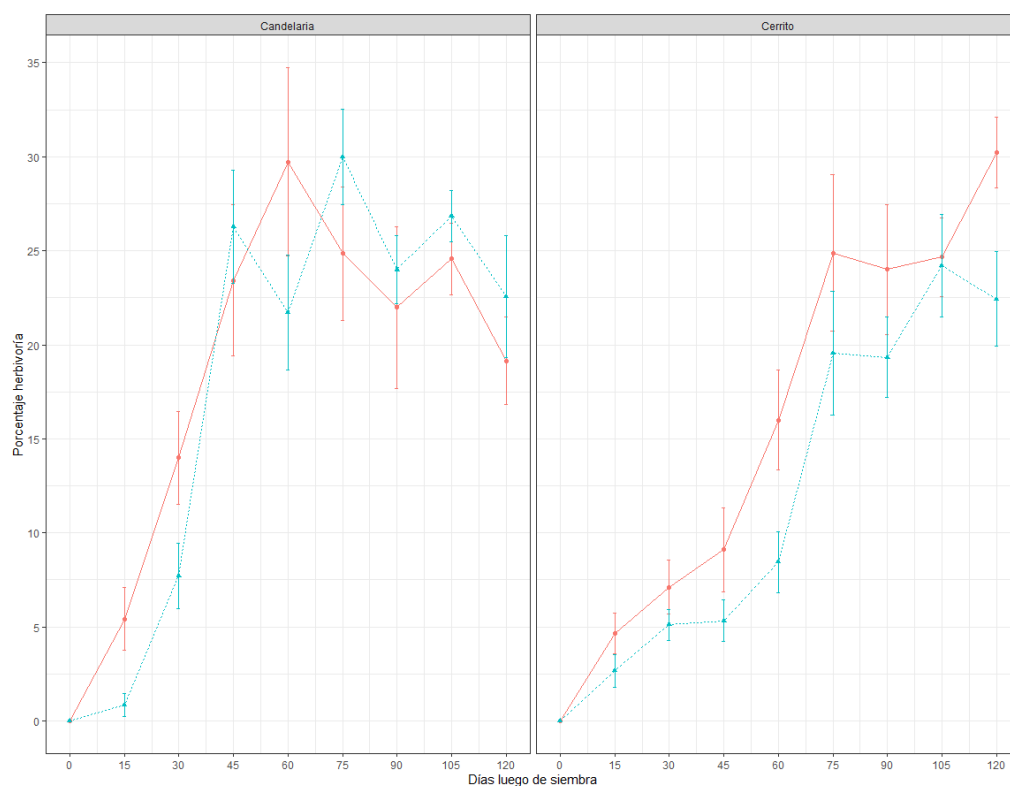


Figura 4. Porcentaje de herbivoría general desde la siembra a la cosecha de maíz, las líneas rojas muestran el comportamiento de la herbivoría en las parcelas

no tratadas y las líneas azules el comportamiento en las tratadas. Los asteriscos rojos denotan los periodos donde se encontraron diferencias.

El análisis de “pair-plot” (Figura 5) reveló varias correlaciones estadísticamente significativas entre las variables de herbivoría, riqueza y abundancia de hormigas. A nivel global, se observó una correlación positiva significativa entre la herbivoría y la riqueza de hormigas ($\text{Corr}=0,267$ así como entre la herbivoría y la abundancia de hormigas ($\text{Corr}=0,174$). De manera específica, en la localidad de Candelaria, tanto en parcelas tratadas como no tratadas, se detectan correlaciones positivas significativas entre la herbivoría y la riqueza ($\text{Corr}=0,374$ y $\text{Corr}=0,242$, respectivamente), y entre la herbivoría y la abundancia ($\text{Corr}=0,356$ y $\text{Corr}=0,252$, respectivamente). Además, se encuentra una correlación positiva significativa entre la riqueza y la abundancia en general ($\text{Corr}=0,644$), con valores en particular altos en Candelaria no tratada ($\text{Corr}=0,740$) y Candelaria tratada ($\text{Corr}=0,680$).



Figura 5. “Pair plot” para las variables de herbivoría, riqueza y abundancia de hormigas para ambas localidades y tratamientos. En la parte inferior izquierda se

muestra la relación entre cada par de variables representado el rojo el conjunto de datos de Candelaria con tratamiento, el azul los no tratados en Candelaria, en violeta los tratados en Cerrito y en verde los no tratados. Los asteriscos (***) indican el nivel de significancia estadística de las correlaciones.

Experimento de depredación

Se registraron 253 eventos de depredación, realizados por siete especies de hormigas. Seis especies registradas para la localidad de Candelaria y cinco para El Cerrito (Tabla A2).

El análisis de devianza indicó que tanto la localidad como el tratamiento tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la depredación. Específicamente, se encontró que la localidad ($\chi^2=8.7405$, $df=1$, $p=0,003112$) y el tratamiento ($\chi^2=6.9875$, $df=1$, $p=0,008208$) influyen significativamente en la probabilidad de depredación. Estos resultados sugieren que tanto la ubicación como el tratamiento aplicado son factores determinantes en la variabilidad de la depredación observada. No se encontraron diferencias significativas para el tiempo ni entre las interacciones entre los factores evaluados.

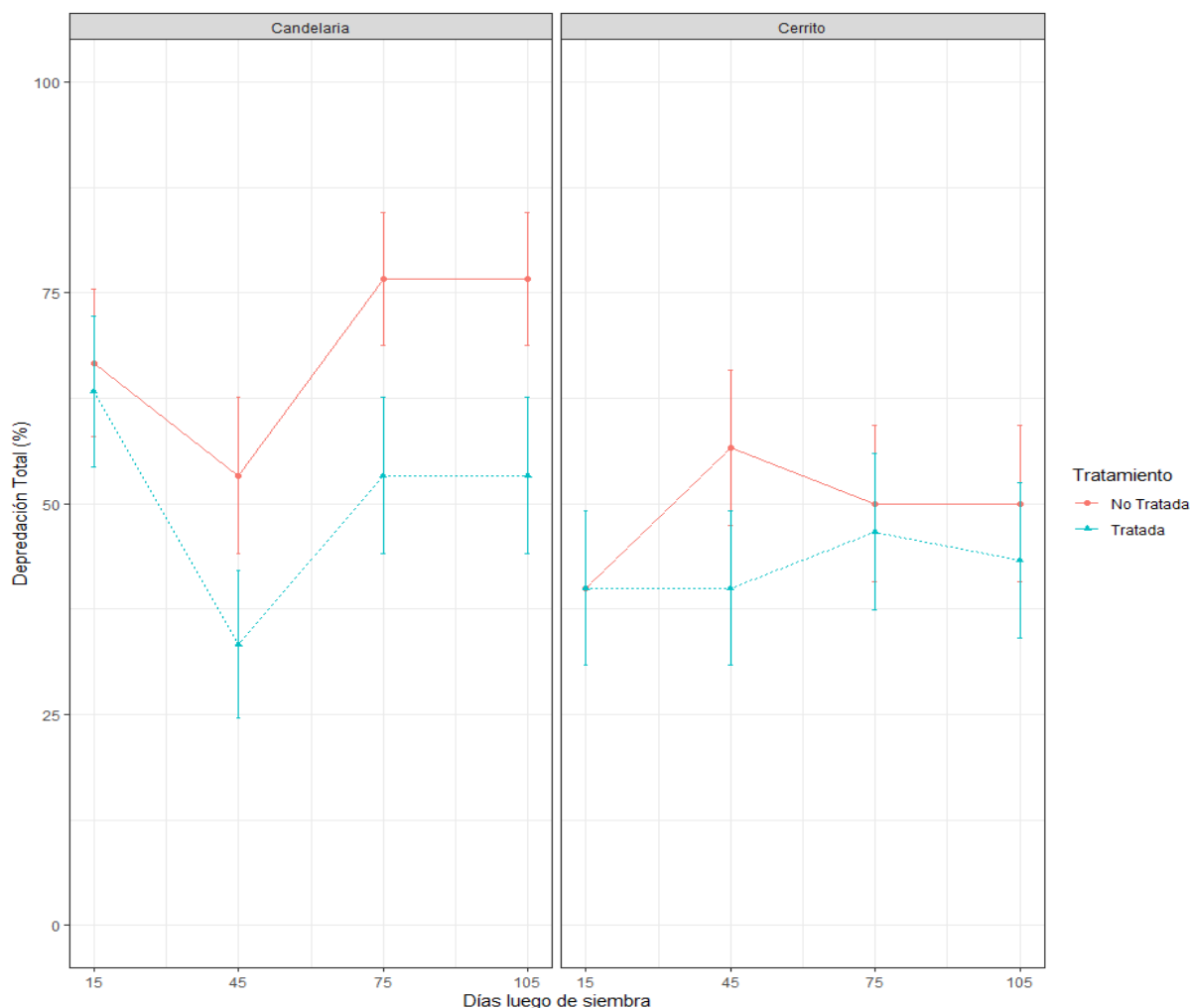


Figura 6. Porcentaje de depredación de larvas de *Spodoptera frugiperda* en parcelas tratadas (líneas azules) y no tratadas (líneas rojas) a lo largo del tiempo (días después de la siembra) en las localidades de Candelaria y El Cerrito.

En el análisis NMDS (Figura 7) de las especies de hormigas depredadoras de *S. frugiperda* según el tratamiento de las parcelas muestra en las áreas sombreadas la distribución y superposición de las comunidades de hormigas en parcelas tratadas (naranja) y no tratadas (azul), sugiriendo diferencias en la composición de las comunidades, pero también similitudes significativas. Las especies más representativas en las parcelas no tratadas incluyen *Pheidole* sp.1 y *Pheidole* sp.2, mientras que en las parcelas tratadas destacan *Solenopsis geminata*, *Solenopsis*

sp.2, y *Odontomachus erythrocephalus*. *Ectatomma ruidum* fue la más común en parcelas no tratadas y *O. bauri* se encuentra también en las parcelas no tratadas, pero con mayor dispersión. La prueba de ANOSIM, obtuvo valor del estadístico R obtenido es 0,3106, lo que indica una separación moderada entre los grupos comparado con un valor asociado de $p=0,0001$ lo que sugiere que las diferencias observadas son altamente significativas.

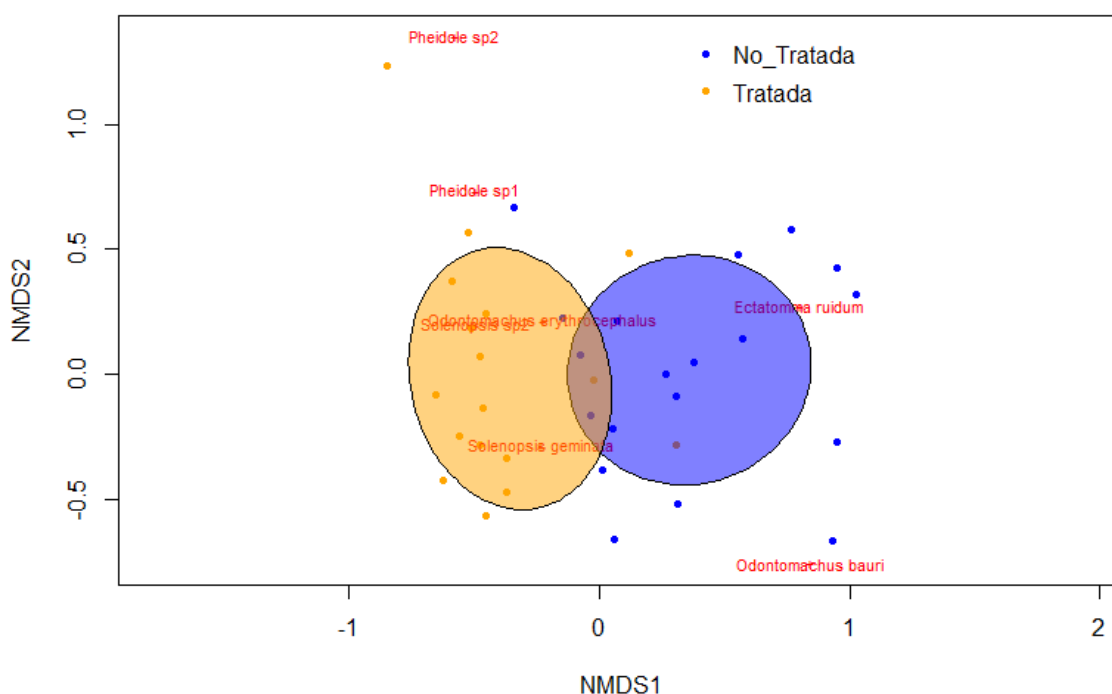


Figura 7. Análisis NMDS de las especies de hormigas depredadoras de *Spodoptera frugiperda* según el tratamiento. Las áreas sombreadas indican la distribución de las comunidades de hormigas en parcelas tratadas (naranja) y no tratadas (azul), mostrando la superposición entre ambos grupos. Los nombres de las especies más representativas se indican en rojo.

La Tabla 1, del análisis SIMPER, muestra que *E. ruidum* y *S. geminata* son las especies de hormigas que más contribuyen a las diferencias entre parcelas

tratadas y no tratadas en términos de depredación de larvas de *S. frugiperda*. La contribución porcentual de *E. ruidum* fue del 36,3% a la disimilitud total, con efecto altamente significativo ($p=0,001$), mientras que la de *S. geminata* fue del 27,9% también significativo ($p=0,050$). *O. bauri* y *Pheidole* sp.2 también mostraron contribuciones significativas, aunque menores. Las otras especies listadas no presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El análisis de patrones multinivel para las especies de hormigas capturadas depredando larvas de *S. frugiperda* reveló que en las parcelas control, *E. ruidum* (stat=0,906, $p=0,001$) y *O. bauri* (stat=0,500, $p=0,003$) están significativamente asociadas con la depredación. En contraste, en las parcelas tratadas con tiametoxam, no se identificaron especies asociadas con la depredación, lo que sugiere un posible impacto negativo del tratamiento en la actividad de las hormigas depredadoras.

Tabla 1. Análisis SIMPER de la contribución de especies de hormigas a las diferencias en depredación de *Spodoptera frugiperda* entre parcelas tratadas y no tratadas

Especie	Promedio	Desviación estándar	Relación	Media Tratamiento	Media Control	% acumulado	p-valor	Significancia
<i>Ectatomma ruidum</i>	0,20905	0,14572	141,340	0,45000	285,000	36,3%	0,001	***
<i>Solenopsis geminata</i>	0,15859	0,11515	136,810	355,000	280,000	64,2%	0,050	*
<i>Pheidole</i> sp1	0,07740	0,08192	0,94660	0,95000	0,35000	77,9%	0,248	
<i>Odontomachus bauri</i>	0,05344	0,08643	0,61830	0,15000	0,50000	87,3%	0,034	*
<i>Odontomachus erythrocephalus</i>	0,03419	0,06605	0,51830	0,25000	0,25000	93,3%	0,962	
<i>Solenopsis</i> sp.2	0,03312	0,05768	0,57420	0,25000	0,20000	99,2%	0,752	
<i>Pheidole</i> sp.2	0,00480	0,02113	0,22720	0,00000	0,05000	100%	0,002	**

Discusión

En el presente estudio, se evaluaron los efectos potenciales del uso como cobertor de semillas de maíz del neonicotinoide (tiametoxam) sobre la mirmecofauna del cultivo y su función como agentes de control. Nuestros resultados no encontraron diferencias en la abundancia y la riqueza total de hormigas entre parcelas tratadas y no tratadas, más si se encontraron diferencias significativas entre las dos localidades (Candelaria y El Cerrito), así como a lo largo del tiempo, lo que sugiere que factores locales y temporales juegan un papel importante en la dinámica de las comunidades de hormigas. El hecho de que no se observe un efecto directo del tratamiento con tiametoxam sobre la abundancia y riqueza de hormigas podría indicar que el insecticida no afecta significativamente a todas las especies de hormigas de manera uniforme.

Al hacer un análisis más detallado de las especies individuales muestra cambios en la composición de las comunidades de hormigas depredadoras entre parcelas tratadas y no tratadas, lo cual es crucial para entender su función ecológica en el control biológico. El análisis de la abundancia de especies específicas reveló tendencias interesantes que merecen una discusión detallada. En Candelaria, *S. geminata* mostró una mayor abundancia en parcelas tratadas, aunque esta diferencia no fue significativa. *Solenopsis geminata* es conocido por su comportamiento oportunista y su capacidad para dominar rápidamente los ambientes perturbados (Risch & Carroll, 1982b; Wetterer, 2011; Tschinkel, 2013). La mayor abundancia en parcelas tratadas podría ser un indicio de que el tiametoxam está reduciendo la competencia de otras especies, al permitir que *S. geminata* se expanda, lo que coincide con estudios que sugieren que los cambios en la comunidad debido a pesticidas pueden favorecer a especies invasoras o generalistas (Holway et al., 2002).

En el mismo sentido, se observa que *Wasmannia auropunctata*, especie generalista, que compite con fuerte impacto negativo en las comunidades, mostró una ligera disminución en su abundancia en parcelas tratadas en ambos sitios.

Esta tendencia, aunque no significativa, es relevante dado que esta especie es conocida por su capacidad de alterar significativamente las comunidades de hormigas y otros artrópodos donde ella se establece (Clark et al., 1982). Si bien la disminución observada podría sugerir una cierta sensibilidad al tiametoxam, la falta de significancia estadística indica que los efectos podrían ser contextuales o requerir un mayor tiempo de exposición para manifestarse plenamente.

El hecho que la herbivoría fue significativamente mayor en parcelas no tratadas en comparación con las tratadas en varias ocasiones durante el experimento podría interpretarse como un efecto positivo del tiametoxam en la reducción de la herbivoría, posiblemente debido a su acción insecticida directa sobre *S. frugiperda*, *Dalbulus maidis* y otros insectos herbívoros. Sin embargo, es importante considerar las interacciones complejas que ocurren en el agroecosistema (Vandermeer et al., 2019). Las correlaciones encontradas entre la herbivoría y la abundancia/riqueza de hormigas sugieren que la presencia y la diversidad de hormigas podrían estar influyendo en la herbivoría de forma indirecta.

Conforme a los resultados, se observa un patrón similar al identificado en otros grupos de artrópodos frente a presas expuestas, como el cambio en sus preferencias de forrajeo al ser alimentados con babosas que consumieron cultivos tratados con tiametoxam (Douglas et al., 2015). Este fenómeno también ha sido documentado en estudios sobre hormigas (Jung et al., 2018; Müller et al., 2019), donde se reporta una modificación en su comportamiento al consumir presas con exposición previa a neonicotinoides. Esto representa una amenaza para depredadores no objetivo, como las hormigas, ya que la interferencia en el control biológico podría facilitar el resurgimiento de plagas (Kilpatrick et al., 2005; Peck & Olmstead, 2010; Straub et al., 2020).

Los resultados sugieren que el tratamiento con tiametoxam puede estar reduciendo la eficacia de algunas hormigas como agentes de control biológico de *S. frugiperda*. Es posible que esta reducción sea el resultado de efectos subletales

del insecticida sobre las hormigas depredadoras, al afectar su comportamiento, forrajeo, o capacidad de caza, lo cual es consistente con investigaciones que han documentado efectos adversos de los neonicotinoides sobre la fauna benéfica no objetivo (Leslie et al., 2010; Douglas et al., 2015; Jung et al., 2018; Müller et al., 2019).

En el análisis SIMPER mientras que *E. ruidum* y *O. bauri* mostraron una reducción significativa en su actividad depredadora en parcelas tratadas, *S. geminata* parece mantener, incluso aumentar, su actividad en presencia de tiametoxam. Estos hallazgos sugieren que el tratamiento impacta de manera diferencial, posiblemente debido a cambios en las dinámicas de competición o comportamiento entre las especies de hormigas, coincidiendo con resultados de otros estudios (Jung et al., 2018; Müller et al., 2019).

Los efectos de los neonicotinoides y las interacciones con otros factores de estrés son complejos y difíciles de discernir, por lo que aún se conoce poco sobre cómo la contaminación ambiental generalizada con estos compuestos afecta a las comunidades de hormigas. Aunque los neonicotinoides pueden ser útiles para manejar plagas e invasoras, no deben ignorarse sus potenciales efectos o consecuencias negativas.

El que se presenten efectos subletales a concentraciones controladas en el campo podría poner en riesgo los servicios ecológicos que las hormigas brindan. Los efectos no deseados de la contaminación ambiental con neonicotinoides sobre hormigas no objetivo son preocupantes y podrían tener implicaciones significativas a largo plazo. Las lagunas de conocimiento actuales exigen investigación desde los efectos a nivel celular y tisular hasta los impactos en individuos, castas, colonias y poblaciones.

Por lo tanto, sin desconocer la relevancia de otras taxa, es fundamental mejorar las evaluaciones futuras del riesgo ecológico de los neonicotinoides, incorporando a las hormigas como indicadores clave de artrópodos del suelo; establecer los efectos de la exposición tanto aguda como crónica; las interacciones entre factores de estrés; y los impactos sobre la "fitness", que es crucial para la

dinámica de las poblaciones. Asimismo, se deben promover prácticas agrícolas más sostenibles para evitar mayores daños a los ecosistemas y, en consecuencia, a la seguridad alimentaria y el bienestar humano.

Conclusiones

En general, los resultados del estudio sugieren que, aunque el uso profiláctico de tiametoxam como tratamiento de semillas reduce la herbivoría por insectos plaga en parcelas de maíz, también puede tener efectos negativos diferenciales sobre la mirmecofauna y su función como agente de control biológico. Esto plantea preguntas importantes sobre la sostenibilidad del uso de neonicotinoides en agroecosistemas donde los servicios de control biológico proporcionados por las hormigas son valiosos. Se recomienda evaluar alternativas de manejo integrado de plagas que minimicen el impacto sobre los enemigos naturales y maximicen la eficacia del control biológico en combinación con otras prácticas agrícolas sostenibles.

Literatura citada

Albajes, R., López, C., & Pons, X. (2003). Predatory fauna in cornfields and response to imidacloprid seed treatment. *Journal of Economic Entomology*, 96(6), 1805-1813.

Aliouane, Y., El Hassani, A. K., Gary, V., Armengaud, C., Lambin, M., & Gauthier, M. (2009). Subchronic exposure of honeybees to sublethal doses of pesticides: effects on behavior. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28(1), 113-122.

Barbieri, R. F., Lester, P. J., Miller, A. S., & Ryan, K. G. (2013). A neurotoxic pesticide changes the outcome of aggressive interactions between native and invasive ants. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 280(1772), 20132157.

Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48.

Bellotti, A. C., Arias, V. B., Herrera Fernández, C. J., & Holguín, M. C. (2007). *Manejo integrado de moscas blancas asociadas al cultivo de la yuca* (Publicación 358, 28p.). CIAT.

Blight, O., Orgeas, J., Renucci, M., & Berville, L. (2011). Imidacloprid gel bait effective in Argentine ant control at nest scale. *Sociobiology*, 58(1), 23–30.

Byrne, F. J., & Toscano, N. C. (2007). Lethal toxicity of systemic residues of imidacloprid against *Homalodisca vitripennis* (Homoptera: Cicadellidae) eggs and

its parasitoid *Gonatocerus ashmeadi* (Hymenoptera: Mymaridae). *Biological Control*, 43(1), 130-135.

Calvo-Agudo, M., González-Cabrera, J., Picó, Y., Calatayud-Vernich, P., Urbaneja, A., Dicke, M., & Tena, A. (2019). Neonicotinoids in excretion product of phloem-feeding insects kill beneficial insects. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(34), 16817-16822. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904298116>

Chagnon, M., Kreutzweiser, D., Mitchell, E. A. D., Morrissey, C. A., Noome, D. A., & Van Der Sluijs, J. P. (2015). Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3277-x>

Clark, D. B., Guayasamin, C., Pazmiño, O., Donoso, C., & de Villacís, Y. P. (1982). The tramp ant *Wasmannia auropunctata*: Autecology and effects on ant diversity and distribution on Santa Cruz Island, Galápagos. *Biotropica*, 14(3), 196–207. <https://doi.org/10.2307/2388026>

Corbara, B., Leroy, C., Orivel, J., Dejean, A., & Delsinne, T. (2019). Relaciones entre las hormigas y las plantas en los trópicos del Nuevo Mundo. (Capítulo 9, p. 203). En: Fernández, F., Flórez, R. J. G., & Delsinne, T. (Eds.) *Hormigas de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.

Cudjoe, A. R., Neuenschwander, P., & Copland, M. J. W. (1993). Interference by ants in biological control of the cassava mealybug *Phenacoccus manihoti* (Hemiptera: Pseudococcidae) in Ghana. *Bulletin of Entomological Research*, 83(1), 15-22. <https://doi.org/10.1017/S0007485300030843>

Daane, K. M., Cooper, M. L., Sime, K. R., Nelson, E. H., Battany, M. C., & Rust, M. K. (2008). Testing baits to control Argentine ants (Hymenoptera: Formicidae) in vineyards. *Journal of Economic Entomology*, 101(3), 699-709.

Decourtye, A., Devillers, J., Cluzeau, S., Charreton, M., & Pham-Delègue, M. H. (2004). Effects of imidacloprid and deltamethrin on associative learning in honeybees under semi-field and laboratory conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 57(3), 410-419.

Desneux, N., Decourtye, A., & Delpuech, J. M. (2007). The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52, 81-106.

Diamé, L., Rey, J. Y., Vayssières, J. F., Grechi, I., Chailleux, A., & Diarra, K. (2017). Ants: Major functional elements in fruit agro-ecosystems and biological control agents. *Sustainability*, 10(1), 23. <https://doi.org/10.3390/su10010023>

Douglas, M. R., Rohr, J. R., & Tooker, J. F. (2015). Neonicotinoid insecticide travels through a soil food chain, disrupting biological control of non-target pests and decreasing soya bean yield. *Journal of Applied Ecology*, 52(1), 250-260.

Fernández, F., Flórez, R. J. G., & Delsinne, T. (Eds.). (2019). *Hormigas de Colombia* (p. 791). Universidad Nacional de Colombia.

Franco, J. C., Zada, A., & Mendel, Z. (2009). Novel approaches for the management of mealybug pests. En *Biorational Control of Arthropod Pests* (pp. 233-278). Springer, Países Bajos.

Frizzi, F., Balzani, P., Masoni, A., Frasconi Wendt, C., Marconi, M., Rossi, A., & Santini, G. (2023). Sub-lethal doses of imidacloprid alter food selection in the invasive garden ant *Lasius neglectus*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 27501-27509.

Galvanho, J. P., Carrera, M. P., Moreira, D. D., Erthal, M., Silva, C. P., & Samuels, R. I. (2013). Imidacloprid inhibits behavioral defences of the leaf-cutting ant *Acromyrmex subterraneus subterraneus* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Insect Behavior*, 26(1), 1-13.

Goulson, D. (2003). Effects of introduced bees on native ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 1-26.

Goulson, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977-987.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>

Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), 1255957.

Gross, M. (2008). Pesticides linked to bee deaths. *Current Biology*, 18(16), R684.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.08.004>

Guez, D., Suchail, S., Gauthier, M., Maleszka, R., & Belzunces, L. P. (2001). Contrasting effects of imidacloprid on habituation in 7-and 8-day-old honeybees (*Apis mellifera*). *Neurobiology of Learning and Memory*, 76(2), 183-191.

Guzmán Prada, D. A., Rodríguez Chalarca, J., & Valencia Cataño, S. J. (2016). *Identificación de estadios larvales de lepidópteros - Plaga de Maíz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)*, Cali, Colombia. 48 p.

Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., ... & De Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE*, 12(10).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

Hahn, D. A., & Wheeler, D. E. (2002). Seasonal foraging activity and bait preferences of ants on Barro Colorado Island, Panama. *Biotropica*, 34(3), 348–356. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2002.tb00548.x>

Harrison, J. G., LaFever, D. H., & Winfree, R. (2015). Species with more volatile population dynamics are differentially impacted by weather. *Biology Letters*, 11(2), 20140792. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0792>

Holway, D. A., Lach, L., Suarez, A. V., Tsutsui, N. D., & Case, T. J. (2002). The causes and consequences of ant invasions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33(1), 181-233.

Khani, A., Ahmadi, F., & Ghadamyari, M. (2012). Side effects of imidacloprid and abamectin on the mealybug destroyer, *Cryptolaemus montrouzieri*. *Trakia Journal of Sciences*, 10(3), 30-35.

Kilpatrick, A. L., Hagerty, A. M., Turnipseed, S. G., Sullivan, M. J., & Bridges Jr, W. C. (2005). Activity of selected neonicotinoids and dicotophos on nontarget arthropods in cotton: implications in insect management. *Journal of Economic Entomology*, 98(3), 814-820.

Krischik, V. A., Landmark, A. L., & Heimpel, G. E. (2007). Soil-applied imidacloprid is translocated to nectar and kills nectar-feeding *Anagyrus pseudococci* (Girault) (Hymenoptera: Encyrtidae). *Environmental Entomology*, 36(5), 1238-1245.

Klein, A. M., Vaissiere, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 274(1608), 303-313.

Kwon, T. S. (2016). Foraging activity of competing ants along altitudinal gradient on a high mountain, South Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(1), 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2015.12.006>

Leslie, T. W., Biddinger, D. J., Rohr, J. R., & Fleischer, S. J. (2010). Conventional and seed-based insect management strategies similarly influence nontarget coleopteran communities in maize. *Environmental Entomology*, 39(6), 2045-2055.

Lexmond, M. B., Bonmatin, J. M., Goulson, D., & Noome, D. A. (2015). Worldwide Integrated Assessment on systemic pesticides: Global collapse of the entomofauna and its impact on ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 1-4. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3220-1>

Liu, F., Bao, S. W., Song, Y., Lu, H. Y., & Xu, J. X. (2010). Effects of imidacloprid on the orientation behavior and parasitizing capacity of *Anagrus nilaparvatae*, an egg parasitoid of *Nilaparvata lugens*. *Biocontrol*, 55(4), 473-483.

Mamy, L., Pesce, S., Sanchez, W., Aviron, S., Bedos, C., Berny, P., ... & Leenhardt, S. (2023). Impacts of neonicotinoids on biodiversity: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-36.

Neumann, P., Frouz, J., Helenius, J., Sarthou, J. P., Klein, A. M., Genersch, E., ... & Norton, M. R. (2015). Ecosystem services, agriculture and neonicotinoids. *European Academies Science Advisory Council Policy Report*, 26, 1-62.

Nice, C. C., Gall, L. F., McAllister, H., Cong, Q., Bai, M., & Zhang, L. (2019). Extreme heterogeneity of population response to climatic variation and the limits of prediction. *Global Change Biology*, 25(6), 2127-2136. <https://doi.org/10.1111/gcb.14600>

Nyamukondiwa, C., & Addison, P. (2014). Food preference and foraging activity of ants: recommendations for field applications of low-toxicity baits. *Journal of Insect Science*, 14, 48. <https://doi.org/10.1093/jis/14.1.48>

Pan, F., Lu, Y., & Wang, L. (2017). Toxicity and sublethal effects of sulfoxaflor on the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 139, 377-383.

Peck, D. C., & Olmstead, D. (2010). Neonicotinoid insecticides disrupt predation on the eggs of turf-infesting scarab beetles. *Bulletin of Entomological Research*, 100(6), 689-700.

Perfecto, I. (1990). Indirect and direct effects in a tropical agroecosystem: The maize-pest-ant system in Nicaragua. *Ecology*, 71(6), 2125-2134.
<https://doi.org/10.2307/1938622>

Perfecto, I. (1991). Ants (Hymenoptera: Formicidae) as natural control agents of pests in irrigated maize in Nicaragua. *Journal of Economic Entomology*, 84(1), 65-70. <https://doi.org/10.1093/jee/84.1.65>

Piano, E., Souffreau, C., Merckx, T., Baardsen, L. F., Backeljau, T., Bonte, D., ... & Hendrickx, F. (2020). Urbanization drives cross-taxon declines in abundance and diversity at multiple spatial scales. *Global Change Biology*, 26(3), 1196-1211.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14934>

Pisa, L. W., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Downs, C. A., Goulson, D., & Morrissey, C. A. (2015). Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 68-102.

Prabhaker, N., Castle, S. J., Naranjo, S. E., Toscano, N. C., & Morse, J. G. (2011). Compatibility of two systemic neonicotinoids, imidacloprid and thiamethoxam, with various natural enemies of agricultural pests. *Journal of Economic Entomology*, 104(3), 773-781.

Řezáč, M., Přibáňová, G., Gloríková, N., et al. (2022). Contact exposure to neonicotinoid insecticides temporarily suppresses the locomotor activity of *Pardosa lugubris* agrobiont wolf spiders. *Scientific Reports*, 12, 14745.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-18842-0>

Risch, S. J., & Carroll, C. R. (1982). The ecological role of ants in two Mexican agroecosystems. *Oecologia*, 55, 114-119. <https://doi.org/10.1007/BF00384479>

Risch, S. J., & Carroll, C. R. (1982b). Effect of a keystone predaceous ant, *Solenopsis geminata*, on arthropods in a tropical agroecosystem. *Ecology*, 1979-1983.

Rogers, M. A., Krischik, V. A., & Martin, L. A. (2007). Effect of soil application of imidacloprid on survival of adult green lacewing, *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae), used for biological control in greenhouse. *Biological Control*, 42(2), 172-177.

Sanchez-Bayo, F., & Goka, K. (2014). Pesticide residues and bees—a risk assessment. *PloS One*, 9(4), e94482.

Sakamoto, H., & Goka, K. (2021). Acute toxicity of typical ant control agents to the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Applied Entomology and Ecology*, 56, 217-224.

Simon-Delso, N., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Chagnon, M., Downs, C., Furlan, L., Gibbons, D. W., Giorio, C., Girolami, V., Goulson, D., Kreutzweiser, D. P., Krupke, C., Liess, M., Long, E., McField, M., Mineau, P., Mitchell, E. A. D., Morrissey, C. A., ... Wiemers, M. (2015). Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): Trends, uses, mode of action and metabolites. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 5-34.
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3470-y>

Stapel, J. O., Cortesero, A. M., & Lewis, W. J. (2000). Disruptive sublethal effects of insecticides on biological control: altered foraging ability and life span of a parasitoid after feeding on extrafloral nectar of cotton treated with systemic insecticides. *Biological Control*, 17(3), 243-249.

Straub, C. S., Faselt, J. A., Keyser, E. S., & Traugott, M. (2020). Host plant resistance promotes a secondary pest population. *Ecosphere*, 11(3), e03073.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.3073>

Szczepaniec, A., Raupp, M. J., Parker, R. D., Kerns, D., & Eubanks, M. D. (2013). Neonicotinoid insecticides alter induced defenses and increase susceptibility to spider mites in distantly related crop plants. *PLoS One*, 8(5), e62620.

Tappert, L., Pokorny, T., Hofferberth, J., & Ruther, J. (2017). Sublethal doses of imidacloprid disrupt sexual communication and host finding in a parasitoid wasp. *Scientific Reports*, 7.

Thiel, S., & Köhler, H. R. (2016). A sublethal imidacloprid concentration alters foraging and competition behaviour of ants. *Ecotoxicology*, 25(4), 814-823.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>

Tschinkel, W. R. (2013). *The fire ants*. Harvard University Press.

Vandermeer H, Armbrrecht I, de la Mora A, Ennis KK, Gonthier DJ, Hajian-Forooshani Z, Hsieh H-Y, Iverson A, Jackson D, Jha S, Jiménez-Soto E, Lopez-Bautista G, Larsen A, Li K, Liere H, MacDonald A, Marín L, Mathis KA, Monagan I, Morris J, Ong T, Pardee GL, Rivera IS, Williams-Guillen K, Yitbarek S, Uno S, Zemenick A, Philpott SM, Perfecto I. (2019). The community ecology of herbivore regulation in an agroecosystem: lessons from complex systems. *BioScience*, 69(12), 974-996.

Wagner, D. L., Grames, E. M., Forister, M. L., Berenbaum, M. R., & Stopak, D. (2021). Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2023989118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023989118>

Wang, L., Zeng, L., & Chen, J. (2015). Impact of imidacloprid on new queens of imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Scientific Reports*, 5, 17938. <https://doi.org/10.1038/srep17938>

Wang, L., Zhao, F., Tao, Q., Li, J., Xu, Y., Li, Z., & Lu, Y. (2020). Toxicity and sublethal effect of triflumezopyrim against red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 113(4), 1753-1760. <https://doi.org/10.1093/jee/toaa100>

Wetterer, J. K. (2011). Worldwide spread of the tropical fire ant, *Solenopsis geminata* (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*, 14(1), 21-35.

Wiltz, B. A., Suiter, D. R., & Gardner, W. A. (2010). Activity of bifenthrin, chlorfenapyr, fipronil, and thiamethoxam against red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 103(3), 754-761.

Anexos Capitulo 1

Tabla A1. Listado de especies capturadas en los dos sitios de muestreo para cada tratamiento para las dos localidades.

Especies Capturadas	Localidad		Tratamiento	
	Candelaria	Cerrito	Tiametoxam	Control
<i>Acropyga goeldii</i>	x		x	x
<i>Anochetus neglectus</i>	x	x	x	x
<i>Apterostigma</i> sp. 1		x	x	x
<i>Atta cephalotes</i>	x	x	x	x
<i>Azteca velox</i>	x		x	x
<i>Brachymyrmex bruchi</i>	x	x	x	x
<i>Brachymyrmex cordemoyi</i>	x		x	x
<i>Camponotus excisus</i>	x	x	x	x
<i>Camponotus</i> JTL-045 Longino	x	x	x	x
<i>Camponotus lindiji</i>	x	x	x	x
<i>Camponotus novogranadensis</i>	x	x	x	x
<i>Camponotus</i> sp. 11	x		x	x
<i>Cardiocondyla emery</i>	x	x	x	x
<i>Cardiocondyla nula</i>	x	x	x	x
<i>Cephalotes foliaceus</i>	x		x	x
<i>Cephalotes minutus</i>	x		x	x
<i>Crematogaster crinosa</i>		x	x	x
<i>Crematogaster limata</i>	x	x	x	x
<i>Cyphomirmex dexus</i>	x	x	x	x
<i>Dorymyrmex brunneus</i>	x	x	x	x
<i>Ectatomma ruidum</i>	x	x	x	x
<i>Linepithema humile</i>	x		x	x
<i>Linepithema neotropicum</i>		x	x	x
<i>Monomorium floricola</i>	x	x	x	x
<i>Nesomyrmex asper</i>	x		x	x
<i>Nesomyrmex pleuriticus</i>	x		x	x
<i>Nylanderia guatemalensis</i>		x	x	x
<i>Nylanderia steinheili</i>		x	x	x
<i>Odontomachus chelifer</i>	x		x	x
<i>Odontomachus bauri</i>		x	x	x
<i>Odontomachus erythrocephalus</i>	x		x	x
<i>Pachycondyla harpax</i>	x	x	x	x
<i>Pheidole</i> sp. 1	x	x	x	x
<i>Pheidole</i> sp. 13	x		x	x

<i>Pheidole</i> sp. 18		X	X	X
<i>Pheidole</i> sp. 20	X		X	X
<i>Pheidole</i> sp. 4	X	X	X	X
<i>Pheidole</i> sp. 5	X		X	X
<i>Pseudomyrmex elongatus</i>	X	X	X	X
<i>Pseudomyrmex gracilis</i>	X		X	X
<i>Pseudomyrmex lisus</i>		X	X	X
<i>Solenopsis altinodis</i>		X	X	X
<i>Solenopsis bicolor</i>	X		X	X
<i>Solenopsis geminata</i>	X	X	X	X
<i>Solenopsis virulens</i>	X		X	X
<i>Tapinoma</i> sp. 1		X	X	X
<i>Temnothorax subditivus</i>	X		X	X
<i>Tetramorium bicarinatum</i>	X	X	X	X
<i>Tetramorium simillimum</i>		X	X	X
<i>Wasmannia auropunctata</i>	X	X	X	X

Tabla A2. Cantidad de eventos de depredación de *Spodoptera frugiperda* para cada especie para las dos localidades.

Sitio	Tratamiento	Parcela	<i>Ectatomma ruidum</i>	<i>Odontomachus bauri</i>	<i>Odontomachus erythrocephalus</i>	<i>Pheidole</i> sp1	<i>Pheidole</i> sp2	<i>Solenopsis geminata</i>	<i>Solenopsis</i> sp2
Candelaria	Tiametoxam	1	0	0	0	2	0	4	0
Candelaria	Tiametoxam	2	2	0	0	1	0	4	0
Candelaria	Tiametoxam	3	0	0	0	0	0	5	0
Candelaria	Tiametoxam	4	0	0	3	0	0	4	0
Candelaria	Tiametoxam	5	0	0	0	4	0	3	0
Candelaria	Tiametoxam	6	0	0	0	0	0	5	0
Candelaria	Tiametoxam	7	0	0	0	0	0	3	2
Candelaria	Tiametoxam	8	0	0	0	1	0	5	0
Candelaria	Tiametoxam	9	0	0	2	1	0	3	0
Candelaria	Tiametoxam	10	0	0	0	0	0	4	0
Candelaria	Control	11	2	0	0	0	0	9	0
Candelaria	Control	12	7	0	0	0	0	1	0
Candelaria	Control	13	2	0	2	1	0	3	0
Candelaria	Control	14	4	0	0	0	0	3	0
Candelaria	Control	15	6	0	2	0	0	1	0
Candelaria	Control	16	0	0	1	1	1	2	0
Candelaria	Control	17	2	0	0	0	0	6	0
Candelaria	Control	18	4	0	0	0	0	4	2
Candelaria	Control	19	1	0	0	0	0	3	2
Candelaria	Control	20	7	0	0	1	0	1	0
Cerrito	Tiametoxam	1	0	0	0	0	0	4	1
Cerrito	Tiametoxam	2	0	2	0	0	0	6	0
Cerrito	Tiametoxam	3	4	0	0	0	0	2	0
Cerrito	Tiametoxam	4	0	0	0	2	0	3	0

Cerrito	Tiametoxam	5	0	0	0	1	0	6	0
Cerrito	Tiametoxam	6	0	1	0	0	0	4	0
Cerrito	Tiametoxam	7	2	0	0	3	0	2	0
Cerrito	Tiametoxam	8	1	0	0	0	0	2	0
Cerrito	Tiametoxam	9	0	0	0	2	0	2	1
Cerrito	Tiametoxam	10	0	0	0	2	0	0	1
Cerrito	Control	11	1	3	0	0	0	3	0
Cerrito	Control	12	1	3	0	0	0	1	0
Cerrito	Control	13	2	2	0	0	0	1	0
Cerrito	Control	14	4	0	0	0	0	2	0
Cerrito	Control	15	3	0	0	1	0	1	0
Cerrito	Control	16	2	1	0	0	0	4	0
Cerrito	Control	17	4	0	0	0	0	2	0
Cerrito	Control	18	3	0	0	0	0	3	0
Cerrito	Control	19	1	1	0	1	0	3	0
Cerrito	Control	20	1	1	0	2	0	3	0
Total, de eventos de depredación		66	14	10	10	26	1	127	9

CAPÍTULO 2:

Efecto “knockdown” del tiametoxam sobre *Ectatomma ruidum* sp.2 (Hymenoptera: Formicidae: Ectatomminae)

Resumen

El uso profiláctico generalizado de insecticidas neonicotinoides tiene un impacto negativo en los artrópodos benéficos no blanco. Sin embargo, se desconocen los posibles efectos de la exposición en los organismos que habitan en el suelo, especialmente, sobre los comportamientos en las hormigas en los sistemas agrícolas tropicales. Dada la importancia que a nivel de ecosistema presentan las hormigas, este estudio evaluó los efectos de una exposición única al neonicotinoide tiametoxam en colonias de la hormiga *Ectatomma ruidum* sp.2, especie cazadora comúnmente presente en los cultivos de maíz. Se empleó una solución preparada con agua azucarada y una concentración de 1,0 µg/mL de tiametoxam simulando una concentración baja encontrada en los productos de gutación de la planta. Este recurso es monopolizado por la hormiga cuando se encuentra presente en el cultivo, siendo entonces un posible mecanismo de exposición. Para evaluar sus potenciales efectos, en laboratorio, se tomaron veinte colonias con sesenta individuos cada una, seleccionándose aleatoriamente diez colonias expuestas al producto y diez como control y, en ambos grupos, se evaluó la mortalidad. Además, diariamente, se grabaron los comportamientos de acicalamiento, agresividad y espasmos. En videos se grabaron los cinco días previos a la única exposición y los 10 días posteriores a ésta. Las colonias no presentaron diferencias en la fase previa a la exposición, diferenciándose sus tasas de mortalidad después de la fecha de la única exposición siendo mayor en las colonias expuestas. De los comportamientos registrados, se encontraron diferencias en la actividad de las obreras en el último día y en los de movimientos involuntarios que se presentaron, en mayor proporción, en individuos de las colonias expuestas. Nuestros datos revelan impactos a corto y mediano plazo de

los neonicotinoides en las hormigas cazadoras. Se presume que efectos similares pueden operar en otros organismos benéficos de los cultivos tropicales.

Palabras claves: *Ectatomma ruidum* sp.2, tiametoxam, neonicotinoides, mortalidad, efectos sub-letales.

Abstract

Widespread prophylactic use of neonicotinoid insecticides has a negative impact on non-target beneficial arthropods. However, the potential effects of exposure on soil-dwelling organisms, especially on ant behaviors in tropical agricultural systems, are unknown. Given the ecosystem-level importance of ants, this study evaluated the effects of a single exposure to the neonicotinoid thiamethoxam on colonies of the ant *Ectatomma ruidum* sp.2, a hunter species commonly found in maize crops. A solution prepared with sugar water and a concentration of 1.0 µg/mL of thiamethoxam was used, simulating a low concentration found in the plant's gestation products. This resource is monopolized by the ant when present in the crop, thus being a possible mechanism of exposure. To evaluate its potential effects, twenty colonies with sixty individuals each were taken in the laboratory, ten colonies exposed to the product and ten as controls were randomly selected and, in both groups, mortality was evaluated. In addition, preening, aggressiveness and spasm behaviors were recorded daily. The five days prior to the single exposure and the 10 days after the single exposure were videotaped. The colonies did not show differences in the pre-exposure phase, but their mortality rates differed after the date of the single exposure, being higher in the exposed colonies. Of the behaviors recorded, differences were found in the activity of the workers on the last day and in involuntary movements, which occurred in a greater proportion in individuals from the exposed colonies. Our data reveal short- and medium-term impacts of neonicotinoids on hunter ants. It is presumed that similar effects may operate on other beneficial organisms of tropical crops.

Keywords: *Ectatomma ruidum* sp.2, thiamethoxam, neonicotinoids, mortality, sub-lethal effects.

Introducción

Desde finales de la década de los 90, dada su versatilidad (son sistémicos) y potencia (actúan sobre masticadores, perforadores y succionadores), el empleo de los neonicotinoides, insecticidas sintetizados a partir de la nicotina, son considerados una alternativa segura para el medio ambiente y la salud humana y animal, en comparación de otros plaguicidas del mercado (Jeschke et al., 2011). En particular, dentro de los neonicotinoides, el tiametoxam ha demostrado ser una herramienta esencial en la protección de cultivos, debido a su capacidad para ser absorbido y translocado por toda la planta, proporcionando una defensa efectiva y duradera contra diversas plagas agrícolas (Elbert et al., 2008; Maienfisch et al., 2001). Este insecticida actúa sobre el sistema nervioso central de los insectos, provoca parálisis y muerte al unirse a los receptores nicotínicos de acetilcolina (Jeschke et al., 2011). Su uso se ha extendido a nivel mundial, siendo aplicado en cultivos de cereales, frutas, hortalizas y, de manera destacada, en el cultivo de maíz (Elbert et al., 2008; Tapparo et al., 2011; Mörtl et al., 2017; Mörtl et al., 2020). La razón principal de su popularidad radica en su acción sistémica, lo que permite su distribución uniforme dentro de la planta, proporcionando una protección prolongada contra plagas masticadoras y succionadoras (Maienfisch et al., 2001; Elbert et al., 2008).

En consecuencia, el tiametoxam es uno de los neonicotinoides más utilizados a nivel mundial en la agricultura, y su aplicación en el cultivo de maíz es particularmente destacada. En 2018, se estimó que más del 50% de las semillas de esta planta sembradas en los Estados Unidos estaban tratadas con este producto (Simon-Delso et al., 2015). En Europa, antes de su prohibición por la EFSA en 2018, su uso fue también significativo para el cultivo de maíz (Bass et al.,

2015) y en Latinoamérica, es un componente esencial en la producción de este cultivo, entre otros (Cabrera Walsh et al., 2020; Casmuz et al., 2022). En esta región se ha adoptado ampliamente el tratamiento de semillas y aplicaciones foliares debido a la alta prevalencia de plagas como *Dalbulus maidis* y *Diabrotica* spp. (Cabrera Walsh et al., 2020; Casmuz et al., 2022).

Un aspecto particularmente relevante es la evidencia de la presencia de tiametoxam en los productos de gutación de las plantas de maíz (Tapparo et al., 2011; Mörtl et al., 2017; Mörtl et al., 2020). La gutación, es un fenómeno natural que se observa en una amplia gama de especies vegetales (Bugbee & Koerner, 2002; Singh & Singh, 2013), representado por las gotas de agua que se exudan de tejidos secretores específicos (hidátodos) situados a lo largo de los márgenes y las puntas de las hojas en respuesta a la presión de las raíces o a condiciones de exceso de agua (Katsuhara et al., 2008; Duby & Boutry, 2009). Esta exudación de gotas de agua en los márgenes y puntas de las hojas arrastra los metabolitos de productos insecticidas y se ha identificado como una vía de exposición, no intencionada, para insectos no objetivo de control (Girolami et al., 2009; Bonmatin et al., 2015).

En recientes estudios se aporta evidencia de que estos compuestos son dañinos para los insectos no blanco, en particular sobre insectos sociales como son las abejas al alterar sus dinámicas de forrajeo, sus capacidades cognitivas o la respuesta inmune, el desarrollo, la fertilidad, el comportamiento y/o la mortalidad de las colonias (Girolami et al., 2009; Tapparo et al., 2011; Pisa et al., 2015; Wood & Goulson, 2017; Mengoni & Farina, 2018). Cabe resaltar que la mayoría de las investigaciones se ha dirigido a este grupo de polinizadores, pero, relativamente, poco se ha estudiado en otros grupos de insectos sociales como son las hormigas (Schläppi et al., 2020; Pohl et al., 2024). Estas se destacan por prestar servicios ecosistémicos esenciales como el control biológico y el reciclaje de nutrientes

(Hölldobler & Wilson, 1990; Del Toro et al., 2012; Offenberg, 2015; Pohl et al., 2024).

Los estudios en el tema de los neonicotinoides realizados en hormigas se han enfocado en evaluaciones de eficacia en el control de aquellas especies plaga (Tollerup et al., 2004; Blight et al., 2011; Buczkowski et al., 2014; Nondillo et al., 2014; Mothapo & Wossler, 2016; Cooper et al., 2019; Li et al., 2019; Wang et al., 2020; Pohl et al., 2024). No obstante, existe poca evidencia de los efectos subletales y sobre el comportamiento para las hormigas como organismo no blanco (Schläppi et al., 2020; Schläppi et al., 2021) y se destacan los estudios de laboratorio en los que se exponen a concentraciones usadas en campo que proporcionan una visión más precisa o ajustada de los potenciales efectos sobre las hormigas (Galvanho et al., 2013; Schläppi et al., 2021).

Aunque se han realizado trabajos sobre los efectos letales y subletales de las concentraciones encontradas en las gotas producto de la gutación en abejas (Girolami et al., 2009; Tapparo et al., 2011), la información de posibles efectos mediante este tipo de exposición en hormigas es casi inexistente. Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar si una dosis única del neonicotinoide tiametoxam con la concentración mínima encontrada en los productos de gutación del maíz afectan la sobrevivencia y el comportamiento de una especie no blanco, la hormiga *Ectatomma ruidum* sp.2, tanto en los estadios adulto como larvales. *E. ruidum* sp.2 es una especie cazadora generalista que también forrajea sobre nectarios extra florales y secreciones azucaradas, ampliamente distribuida en Centro y Sur América.

Hipótesis general

La exposición a una dosis única del neonico tiametoxam, en la concentración encontrada en los productos de gutación del maíz, afectara la sobrevivencia y

comportamiento, tanto en estadio adulto como larval de la hormiga cazadora, *Ectatomma ruidum* sp.2.

Hipótesis específicas

1. El comportamiento de las obreras de *Ectatomma ruidum* sp.2 varía acorde a la exposición o no de las colonias a una dosis única de tiametoxam con la concentración encontrada en los productos de gutación del maíz.
2. La sobrevivencia de las larvas y adultos de la hormiga no blanco *Ectatomma ruidum* sp.2 varía acorde a la exposición o no de las colonias a una dosis única de tiametoxam con la concentración encontrada en los productos de gutación del maíz.

Objetivo general

Analizar la supervivencia y el comportamiento en los estadios larval y adulto de *Ectatomma ruidum* sp.2, a la exposición o no de las colonias a una dosis única de tiametoxam con la concentración encontrada en los productos de gutación del maíz.

Objetivos específicos

1. Analizar el efecto de una exposición única del tiametoxam en el comportamiento (actividad, acicalamiento y movimiento voluntario) de adultos de *Ectatomma ruidum* sp 2.
2. Analizar el efecto de una exposición única del tiametoxam en la sobrevivencia de larvas y adultos de *Ectatomma ruidum* sp 2.

Materiales y métodos

Organismo modelo

Ectatomma ruidum sp.2 (Hymenoptera: Formicidae: Ectatomminae) es una hormiga cazadora que forma parte de un complejo de especies conocido como complejo *E. ruidum* (Roger 1860). Al presente, éste comprende cinco morfoespecies derivadas: *Ectatomma ruidum* sp.1, 2, 3-4, y 5, junto con un posible híbrido entre 2 x 3 (Nettel-Hernanz et al., 2015; Poteaux et al., 2015; Aguilar-Velasco et al., 2016; Meza-Lázaro et al., 2018). Las especies de este complejo están ampliamente distribuidas en una variedad de hábitats que incluyen sistemas agrícolas, sabanas y bosques, desde el nivel del mar hasta altitudes de 1500-1600 m (Weber, 1946) y, eventualmente, hasta los 2200 m (Arias-Penna, 2008). El rango de distribución latitudinal del complejo se extiende desde los estados de Jalisco y Nayarit en México (Villalvazo-Palacios et al., 2013) hasta el sureste de Ecuador y el norte de Brasil en la región del Amazonas (Kugler y Brown, 1982). En Colombia, se han registrado las morfoespecies *E. ruidum* sp.1 y sp.2 (Nettel-Hernanz et al., 2015).

Estas hormigas consumen una amplia variedad de presas, carbohidratos vegetales, cadáveres de invertebrados y otros animales, así como semillas (Lachaud et al., 1984, 1996; Perfecto, 1990; 1991; Passera et al., 1994; Ibarra-Núñez et al., 2001; Zelikova y Breed, 2008; Santamaría et al., 2009). Estas hormigas al aprovechar tanto las presas disponibles en los cultivos, así como las secreciones extra florales y productos de gutación disponibles, es un modelo ideal para los experimentos de fuentes de exposición indirecta al tiametoxam.

Colonias de *E. ruidum*

En la zona rural de La Mancha, Actopan, Veracruz, México (N 19°35'52.1"; O 96°23'17.7") se ubicaron y extrajeron colonias de *E. ruidum* sp. 2. y se llevaron a los laboratorios del INECOL en Xalapa, Veracruz, México. Allí fueron mantenidas para su adaptación por dos semanas bajo las siguientes condiciones: entre 27–28°C; 60–80% de humedad relativa; 12 h: 12 h de ciclo de luz/oscuridad, en recipientes plásticos de 20 x18 cm (Hora et al., 2005). Durante esta etapa fueron alimentadas con un 1ml de una solución de miel/agua en relación ¼ y una larva de *Tenebrio monitor* de aproximadamente 0,09g. Para los bioensayos se seleccionaron veinte colonias con 60 obreras, 40 larvas y su respectiva reina.

Experimento de una única exposición

Se usó Cruiser® 350FS (Syngenta) insecticida cuyo ingrediente activo es tiametoxam, neonicotenoide de amplio espectro aplicado como cobertor de semillas en maíz. Diez colonias, escogidas de forma aleatoria, recibieron un tratamiento o una exposición única de una solución azucarada con una dosis de tiametoxam. Las restantes 10 fueron usadas como grupo control, a las cuales solo se les ofreció de miel miel/agua en relación ¼. En la dosis del tratamiento se mezclaron 5ml de miel con 20ml de una solución acuosa que contenía 1,25 µgml⁻¹ de tiametoxam, con una concentración final del neonicotinoide 1,0 µgml⁻¹. El uso de dosis bajas del insecticida buscaba simular condiciones subletales (Barbieri et al., 2013). Se realizaron video diariamente a cada colonia de tres minutos de duración captando los siguientes aspectos del comportamiento de las hormigas: acicalamiento (comportamiento de limpieza), agresión (mordidas o picaduras a miembros de la colonia), actividad (número de obreras activas realizando tareas del nido al momento de la observación), movimiento involuntario (movimientos repetitivos, de patas o gáster). Para asegurarnos que las diferencias observadas no fuesen atribuibles a diferencias etarias o de salud de las colonias, se revisaron los datos de comportamiento y mortalidad de colonias cinco días previos a la exposición sin que se revelaran diferencias estadísticamente significativas.

se registró la sobrevivencia de obreras por cada día durante 8 días posterior a la exposición. Después de 24 horas de la aplicación a la dosis única del neonicotinoide, se hizo el cambio de la miel de cada colonia expuesta por miel sin concentración del neonicotinoide. Se realizó el análisis de 840 minutos de grabación, registrando el número de veces que se presentaron los comportamientos mencionados anteriormente, resultados listados en el (anexo A3).

Análisis estadístico

Se emplearon modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) con pruebas de comparación múltiple de Bonferroni, usando como variable de respuesta la cantidad de eventos registrados para cada comportamiento. Los análisis se realizaron con el programa estadístico R (R Development Core Team, 2019) usando las librerías nlme, car, multcomp, glmmTMB, emmeans y lme4, determinando las diferencias estadísticas a un nivel significativo del 5%.

Resultados

A continuación, se presentan los análisis para los comportamientos que fueron observados (no se registraron eventos de agresividad intraespecífica).

El GLMM reveló diferencias significativas tanto para interacción día-tratamiento ($\chi^2 = 34,36$; $p = 0,001$) como para los días ($\chi^2 = 107,43$; $p = 2,2e-16$) en la actividad de las obreras de *E. ruidum* sp.2. La prueba de Bonferroni reveló que las diferencias significativas se deben al día 13 ($p = 0,0359$) (Figura 8), es decir, las hormigas expuestas al neonicotinoide tuvieron una tasa de actividad mayor a las hormigas sin tratamiento.

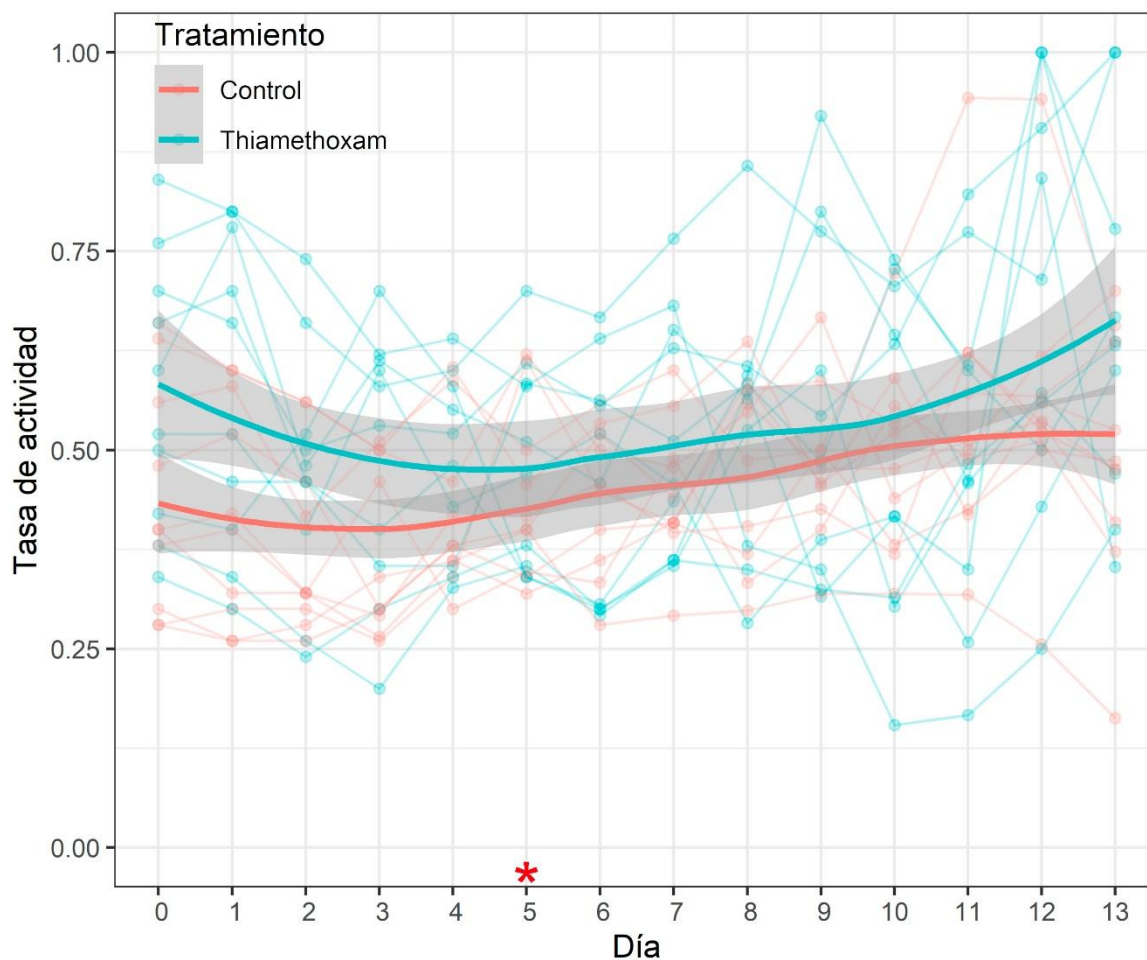


Figura 8. Tasa de actividad de obreras de *Ectatomma ruidum* sp.2 para las colonias control y las expuestas a una dosis única de tiametoxam. Las líneas rojas muestran el comportamiento de las colonias control y las líneas azules las colonias expuestas a una dosis única de tiametoxam. El asterisco denota el día cinco donde se realizó la exposición única del neonicotinoide.

Para el caso de la tasa de acicalamiento, en el GLMM se detectaron diferencias significativas para la variable día ($\chi^2= 66,68$; $p= 3,263e-09$) pero al realizar los análisis de Bonferroni para cada día no se observó ninguna diferencia significativa entre las hormigas tratadas y el control (Figura 8).

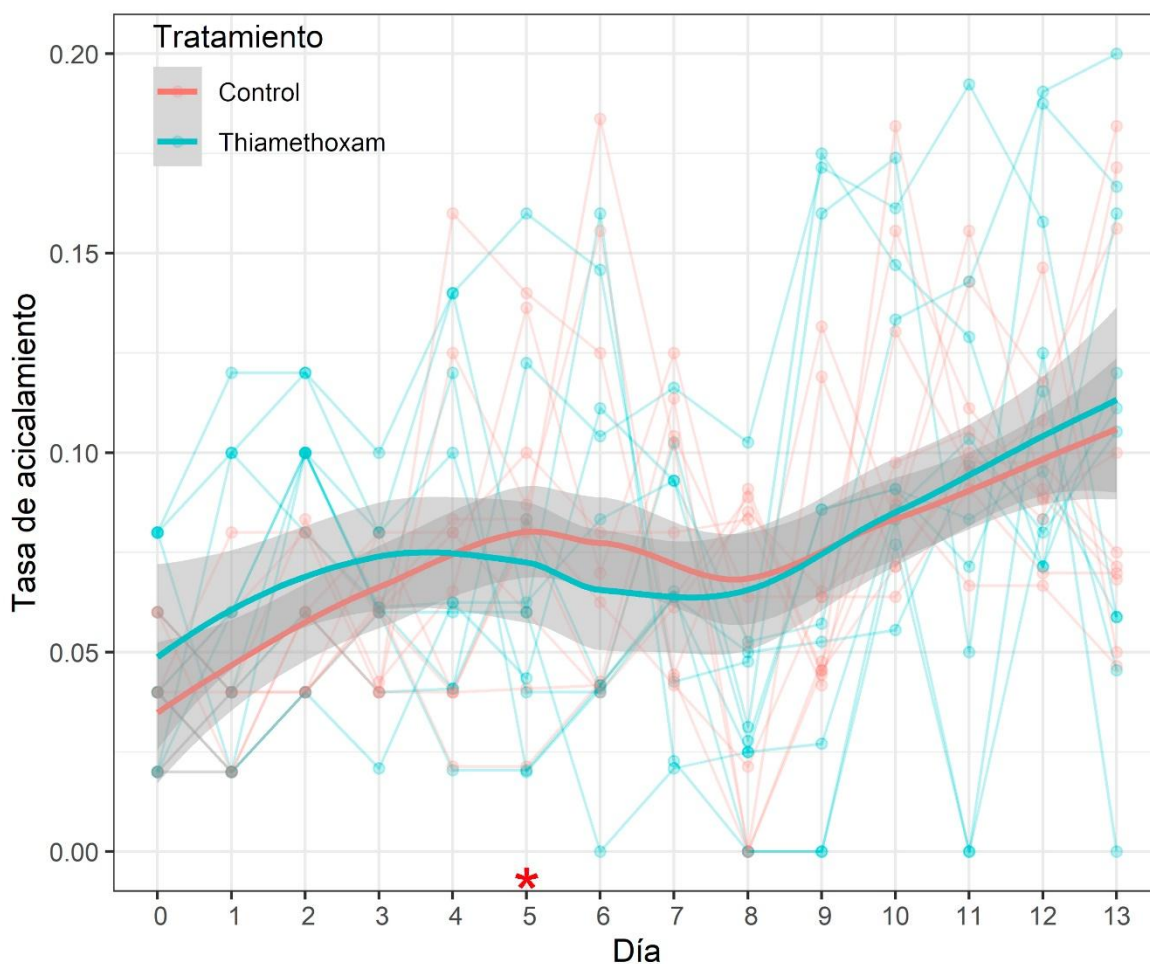


Figura 9. Tasa de acicalamiento de obreras de *Ectatomma ruidum* sp.2 para las colonias control y las expuestas a una dosis única de tiametoxam. Las líneas rojas muestran el comportamiento de las colonias control y las líneas azules las expuestas a una dosis única de tiametoxam. El asterisco denota el día cinco donde se realizó la exposición única del neonicotinoide.

En cuanto a la tasa de movimiento involuntario, si bien se obtuvieron diferencias significativas por la poca cantidad de eventos en el control (un solo evento), este comportamiento se presentó mayoritariamente en las colonias tratadas y puede asociarse al tratamiento con tiametoxam (Figura 9).

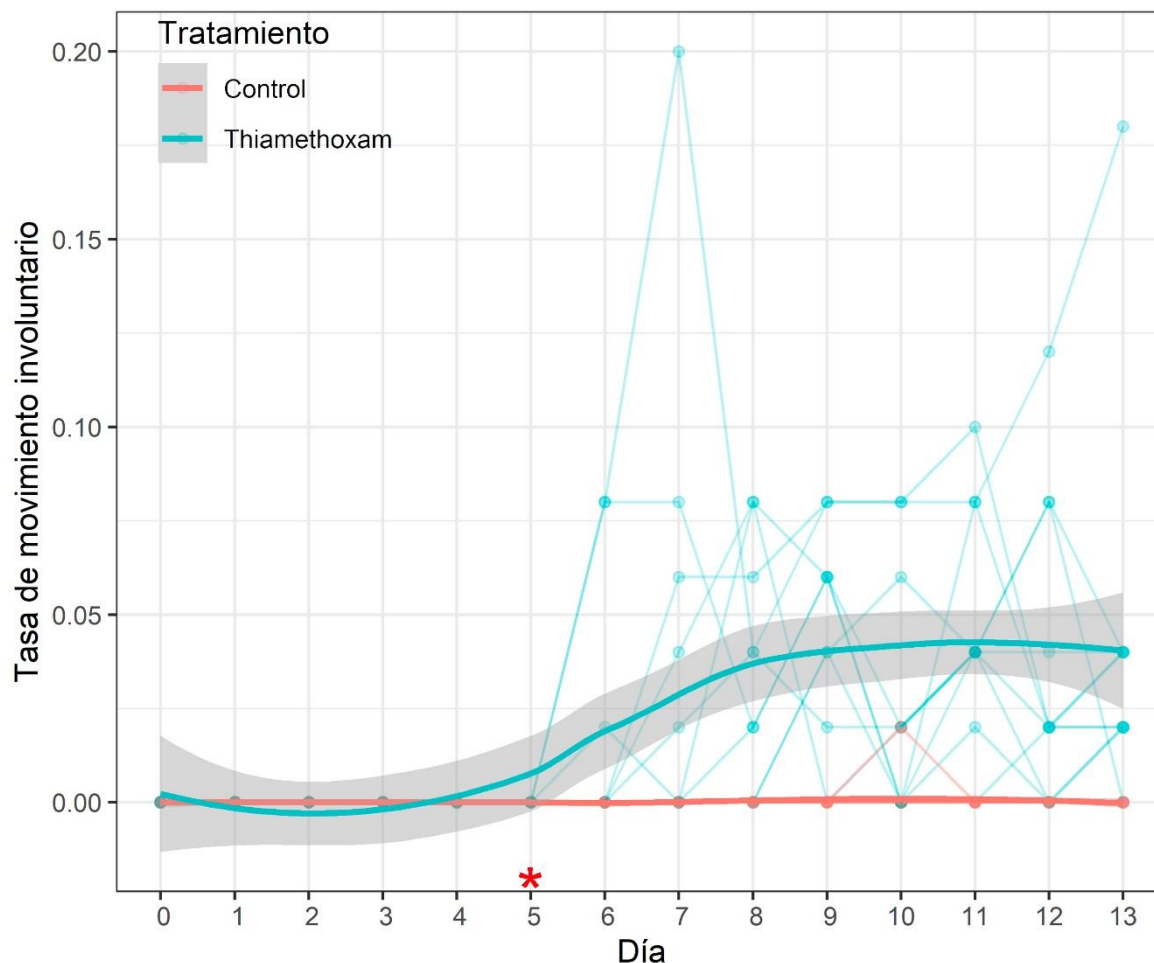


Figura 9. Tasa de movimiento involuntario de obreras de *Ectatomma ruidum* sp.2 para las colonias control y las expuestas a una dosis única de tiametoxam. Las líneas rojas muestran el comportamiento de las colonias control y las líneas azules las expuestas a una dosis única de tiametoxam. El asterisco denota el día cinco donde se realizó la exposición única del neonicotinoide.

La tasa de sobrevivencia para larvas presentó diferencias significativas respecto del tratamiento ($\chi^2= 158,77$; $p=2,2e-16$) como del día ($\chi^2= 1134,56$ $p=2,2e-16$) y la interacción día-tratamiento ($\chi^2= 114,60$; $p=2,2e-16$). El análisis de Bonferroni mostró diferencias entre las colonias tratadas y control desde el día 7 hasta el 13 ($p= 0,001$) (Figura 10).

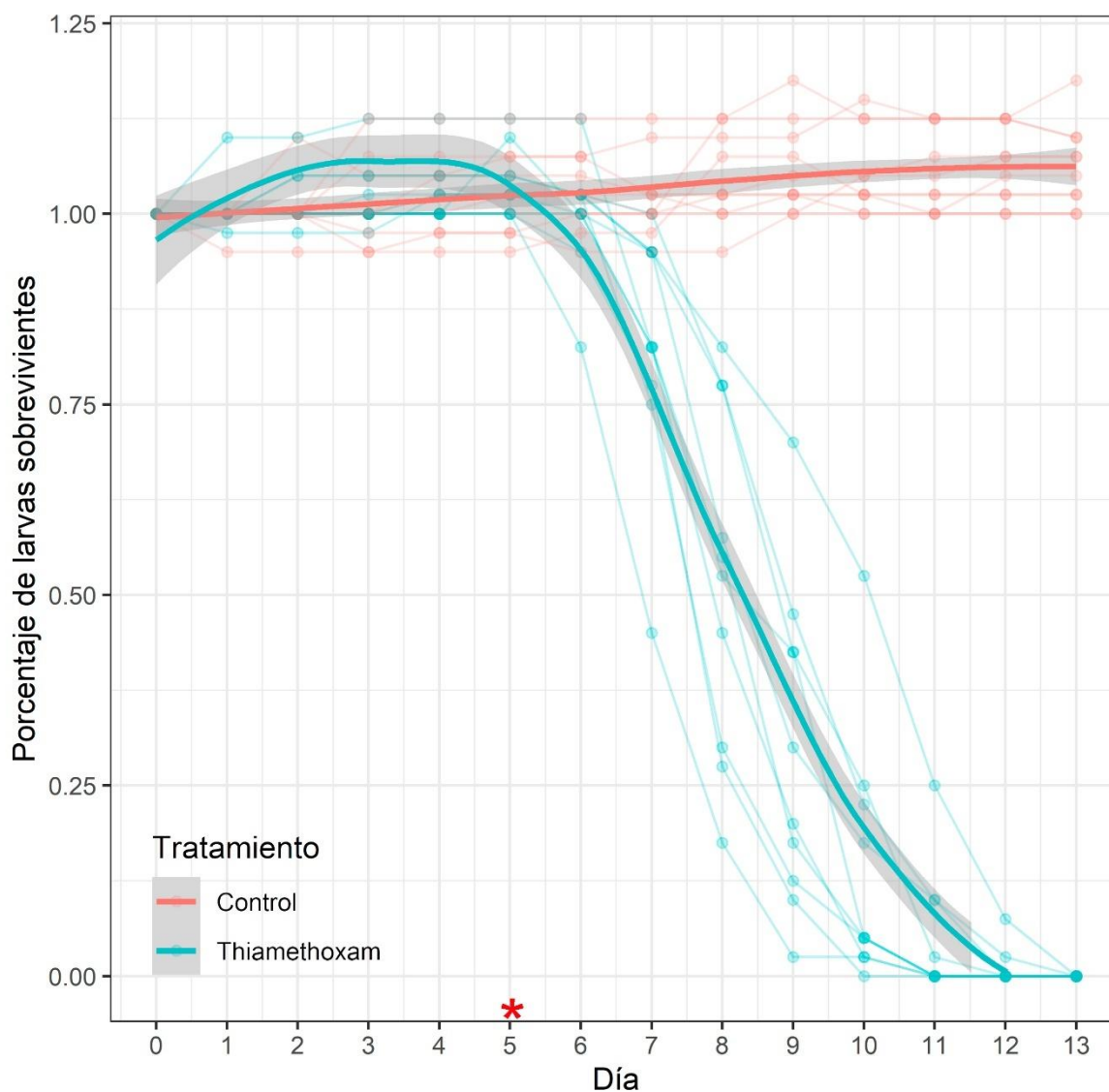


Figura 10. Porcentaje de larvas sobrevivientes *Ectatomma ruidum* sp.2 para las colonias control y las expuestas a una dosis única de tiametoxam. Las líneas rojas muestran el comportamiento de las colonias control y las líneas azules las colonias expuestas a una dosis única de tiametoxam. El asterisco denota el día cinco donde se realizó la exposición única del neonicotinoide.

Por último, se observaron diferencias significativas para la tasa de sobrevivencia de obreras tanto al respecto del tratamiento ($\chi^2= 158,77$; $p=2,2e-16$), como del día ($\chi^2= 1134,56$ $p=2,2e-16$) y la interacción día-tratamiento ($\chi^2= 114,60$; $p=2,2e-16$).

El análisis de Bonferroni mostró diferencias entre las colonias tratadas y control desde el día 8 hasta el 13 ($p= 0,001$) (Figura 11).

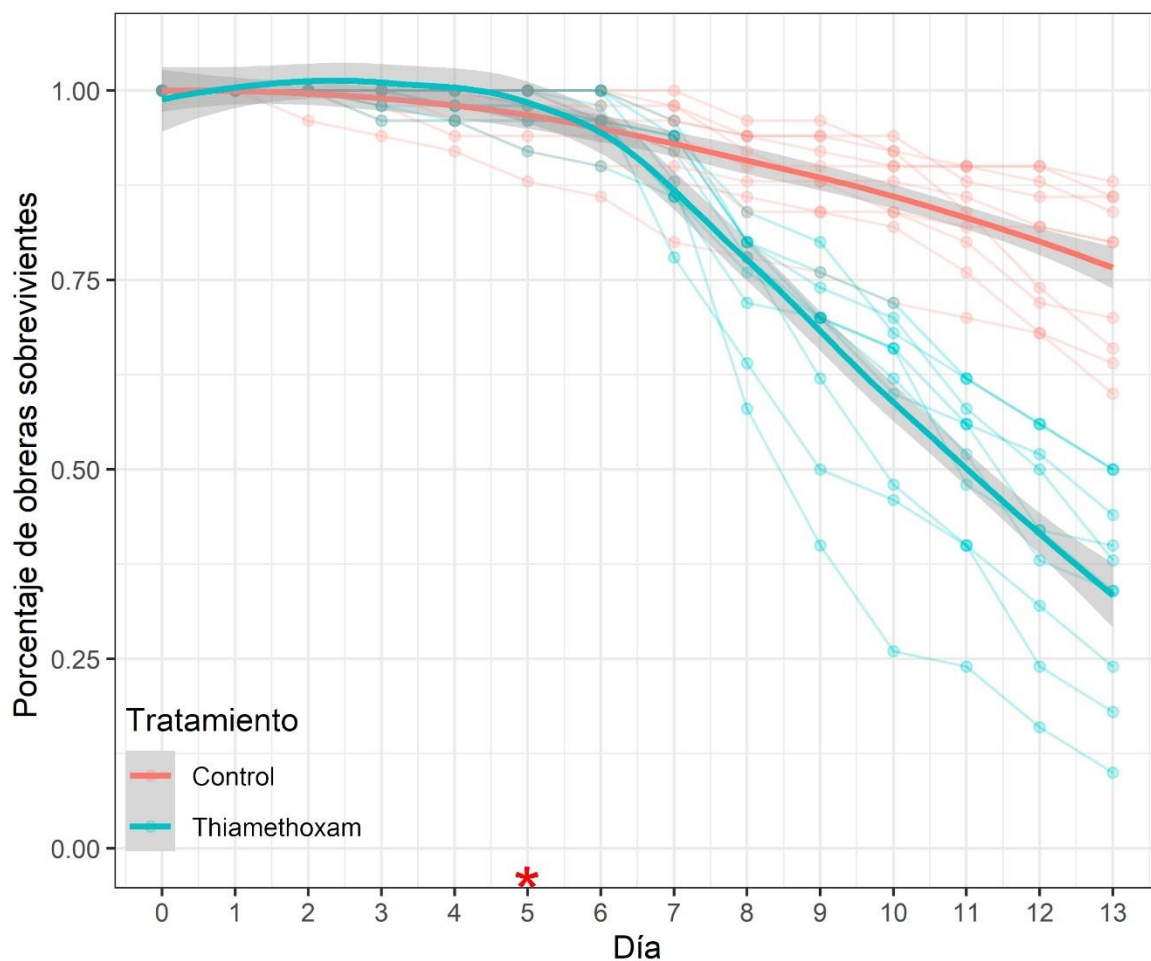


Figura 11. Porcentaje de obreras sobrevivientes *Ectatomma ruidum* sp.2 para las colonias control y las expuestas a una dosis única de tiametoxam. Las líneas rojas muestran el comportamiento de las colonias control y las líneas azules las colonias expuestas a una dosis única de tiametoxam. El asterisco denota el día cinco donde se realizó la exposición única del neonicotinoide.

Discusión

Para evaluar los posibles efectos de una exposición única de tiametoxam sobre los comportamientos y mortalidad de las colonias de *E. ruidum* sp.2. Se registraron mediante video los cambios en los patrones actividad, agresividad, acicalamiento y movimientos involuntarios. Así mismo, se registraron la mortalidad de obreras y larvas día a día durante el experimento.

Respecto a los comportamientos y mortalidad evaluados posterior a la exposición se encontraron diferencias significativas, resultados consistentes con estudios previos donde se han demostrado los efectos letales y subletales del tiametoxam, en las hormigas bajo condiciones de laboratorio (Pan et al., 2017; Penn y Dale, 2016; Wang et al.; Wiltz et al., 2010). En contraste, Schläppi et al. (2021) reportaron que dosis bajas de tiametoxam producían únicamente efectos subletales en obreras adultas y larvas sin efectos letales sobre colonias de *Lasius niger*, aunque con un efecto a largo plazo en el tamaño de estas. De manera similar, Penn et al. (2023) no encontraron diferencias de comportamiento y mortalidad en individuos de *Solenopsis invicta* a corto plazo, aunque si encontraron variaciones en la sensibilidad entre especies y contextos de exposición.

No se observó un aumento en la agresividad dentro de las colonias expuestas en este estudio. Sin embargo, investigaciones previas han demostrado que la exposición a neonicotinoides puede alterar el comportamiento agresivo de las hormigas y, en consecuencia, afectar el resultado de sus enfrentamientos interespecíficos alterando la dinámica competitiva entre ambas especies (Barbieri et al., 2013; Thiel & Köhler, 2016).

Al analizar el aumento significativo en la tasa de actividad de las hormigas expuestas al tiametoxam en comparación con las del control ($\chi^2= 34,36$; $p= 0,001$) destaca la diferencia significativa en especial en el día 13 ($p= 0,0359$). Este incremento en la actividad es consistente con estudios previos que han documentado hiperactividad en insectos sociales debido a la exposición a neonicotinoides (Henry et al., 2012; Tsvetkov et al., 2017). Sin embargo, no se

observaron diferencias significativas en la tasa de acicalamiento entre las colonias tratadas y las del control, lo que indica que esta actividad no es afectada directamente por una única exposición al tiametoxam. En contraste, Galvanho et al. (2013) registran que las obreras de *Acromyrmex subterraneus subterraneus* expuestas al insecticida imidacloprid presentaban mayor número de eventos de acicalamiento que las hormigas no expuestas.

Aunque no se registraron diferencias significativas en la tasa de movimiento involuntario, se detectó una tendencia a ser mayor en las colonias tratadas. Esto puede ser un indicativo de la existencia de efectos neurotóxicos subletales como ha sido observado en otros estudios en abejas y escarabajos (Desneux et al., 2007; Pisa et al., 2015; Douglas et al., 2015). No obstante, es de recalcar la mortalidad de obreras en las colonias tratadas que fue significativamente mayor desde el día 8 hasta el 13 después de la exposición ($\chi^2 = 158,77$; $p = 2,2e-16$) como también la mortalidad larval significativamente mayor en las colonias expuestas ($\chi^2 = 158,77$; $p = 2,2e-16$). Ambos hechos subrayan el impacto negativo de los neonicotinoides en los diferentes estadios de desarrollo de las hormigas, lo cual está en concordancia con lo reportado por Sanchez-Bayo & Goka (2014).

Nuestros resultados se alinean con diversos trabajos que reportan cambios en el consumo de alimentos, actividad, agresividad, comportamiento de excavación y búsqueda de alimento, alteraciones en la locomoción, efectos adversos en el cuidado de las crías y el crecimiento de la colonia, y una reducción en el comportamiento de acicalamiento, lo que puede llevar a una elevada mortalidad tras la exposición conjunta con hongos entomopatógenos (Santos et al., 2007; Barbieri et al., 2013; Galvanho et al., 2013; Wang et al., 2015; Pan et al., 2017; Penn & Dale, 2017; Li et al., 2019; Müller et al., 2019; Cramer, 2020). No obstante, es indispensable ser cautelosos en el alcance y generalización de nuestros resultados, aplicables a la subespecie usada, en la tasa de aplicación, el ingrediente activo y la formulación del producto. Es importante tener presente que los efectos directos e indirectos de los neonicos, así como las interacciones entre factores estresantes, son notoriamente difíciles de desentrañar. En consecuencia,

los impactos de la contaminación ambiental generalizada con neonicos sobre las comunidades de hormigas siguen siendo poco conocidos. Si se usan adecuadamente, los neonicos representan una herramienta invaluable en el combate de plagas y hormigas invasoras, sin desdeñar las consecuencias negativas sobre el entorno. A nivel global, la escala del problema y el número de especies potencialmente amenazadas son preocupantes. Incluso a concentraciones mínimas en el campo, se pueden detectar efectos subletales que ponen en peligro los servicios ecológicos que las hormigas proporcionan (Goulson, 2013; Pisa et al., 2015; Wood & Goulson, 2017).

En síntesis, la afectación del tiametoxam sobre los adultos y larvas de la hormiga cazadora *Ectatomma ruidum* sp.2 es motivo de preocupación. Estos hallazgos subrayan la importancia de evaluar cuidadosamente los impactos ambientales de este insecticida como de otros neonicos. Es necesario implementar estrategias de manejo integrado de plagas que minimicen los riesgos para la fauna no objetivo en los agroecosistemas. Las alteraciones observadas en la tasa de actividad, el movimiento involuntario y la sobrevivencia resaltan la necesidad de adoptar prácticas de manejo más sostenibles y reevaluar las regulaciones sobre el uso de estos insecticidas para mitigar sus impactos negativos en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Godfray et al., 2014; Tsvetkov et al., 2017).

Conclusiones

El presente estudio demuestra que incluso a bajas concentraciones, tiametoxam puede generar efectos letales en *E. ruidum* sp.2, tanto en adultos como en larvas, al afectar el comportamiento, la actividad y la supervivencia de las colonias. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que reportan efectos adversos de los neonicotinoides en diversos aspectos de su comportamiento. Aunque no se observó un aumento significativo en la agresividad intraespecífica ni en el acicalamiento, el incremento en la mortalidad y los cambios en la tasa de actividad y el movimiento involuntario subrayan la necesidad de considerar las

implicaciones ecológicas de estos efectos subletales. Es fundamental revisar el uso de estos pesticidas en prácticas agrícolas, debido a sus posibles impactos negativos en los servicios ecosistémicos proporcionados por especies no objetivo como la hormiga cazadora *E. ruidum* sp.2.

Literatura citada

Aguilar-Velasco, R. G., Poteaux, C., De Biseau, J. C., & Lachaud, J. P. (2016). Phylogeography and population genetic structure of the Neotropical ant *Ectatomma ruidum* (Hymenoptera, Formicidae). *Insect Science*, 23(1), 1-14.

Arias-Penna, T. M. (2008). Subfamilia Ectatomminae (pp. 53-107). En E. Jiménez, F. Fernández, T. M. Arias, & F. H. Lozano-Zambrano (Eds.), *Sistemática, biogeografía y conservación de las hormigas cazadoras de Colombia* (p. 609). Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.

Barbieri, R. F., Lester, P. J., Miller, A. S., & Ryan, K. G. (2013). A neurotoxic pesticide changes the outcome of aggressive interactions between native and invasive ants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1772), 20132157. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2157>

Bass, C., Denholm, I., Williamson, M. S., & Nauen, R. (2015). The global status of insect resistance to neonicotinoid insecticides. *Pest Biochemistry and Physiology*, 121, 78-87.

Blight, O., Orgeas, J., Renucci, M., & Provost, E. (2011). Imidacloprid gel bait effective in Argentine ant control at nest scale. *Sociobiology*, 58(1), 23-30.

Bonmatin, J. M., Giorio, C., Girolami, V., Goulson, D., Kreutzweiser, D. P., Krupke, C., ... & Tapparo, A. (2015). Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 35-67.

Buczowski, G., Roper, E., & Chin, D. (2014). Polyacrylamide hydrogels: An effective tool for delivering liquid baits to pest ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(2), 748-757.

Bugbee, B., & Koerner, G. (2002). Yield comparisons and unique characteristics of the dwarf wheat cultivar 'USU-Apogee': Super dwarf cultivar studies: 'APOGEE' wheat. *New Phytologist*, 156(1), 69-79.

Cabrera Walsh, G., Ávila, C. J., Cabrera, N., Nava, D. E., de Sene Pinto, A., & Weber, D. C. (2020). Biology and management of pest *Diabrotica* species in South America. *Insects*, 11(7), 421. <https://doi.org/10.3390/insects11070421>

Casmuz, A. S., Vera, M. A., Medrano, C. M., Cejas Marchi, E., Suárez, L. L., Romero, I., Campero, N., Álvarez Paz, P., Giménez Sardi, J. A., Gastaminza, G. A., Scalora, F. S., Gamboa, D. E., & Devani, M. R. (2022). Alternativas para el control de la chicharrita del maíz *Dalbulus maidis* (De Long & Wolcott). *El cultivo del maíz en el noroeste argentino Campaña 2022/2023. Publicación especial*.

Cooper, M. L., Hobbs, M. B., Boser, C. L., & Varela, L. G. (2019). Argentine ant management: Using toxin-laced polyacrylamide crystals to target ant colonies in vineyards. *Catalyst: Discovery into Practice*, 3(1), 23-30. <https://doi.org/10.5344/catalyst.2019.19004>

Cramer, L. (2020). The synergistic effect of pesticides on the fitness of the ant species *Cardiocondyla obscurior*. Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz, 72 pp.

Del Toro, I., Ribbons, R. R., & Pelini, S. L. (2012). The little things that run the world revisited: A review of ant-mediated ecosystem services and disservices (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*, 17, 133-146.

Douglas, M. R., Rohr, J. R., & Tooker, J. F. (2015). Neonicotinoid insecticide travels through a soil food chain, disrupting biological control of non-target pests and decreasing soya bean yield. *Journal of Applied Ecology*, 52(1), 250-260.

Duby, G., & Boutry, M. (2009). The plant plasma membrane proton pump ATPase: A highly regulated P-type ATPase with multiple physiological roles. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 457(3), 645-655.

Elbert, A., Haas, M., Springer, B., Thielert, W., & Nauen, R. (2008). Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. *Pest Management Science*, 64(11), 1099-1105.

Galvanho, J. P., Carrera, M. P., Moreira, D. D., Erthal, M., Silva, C. P., & Samuels, R. I. (2013). Imidacloprid inhibits behavioral defenses of the leaf-cutting ant *Acromyrmex subterraneus subterraneus* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Insect Behavior*, 26, 1-13.

Girolami, V., Mazzon, L., Squartini, A., Mori, N., Marzaro, M., Di Bernardo, A., Greatti, M., Giorio, C., & Tapparo, A. (2009). Translocation of neonicotinoid insecticides from coated seeds to seedling guttation drops: A novel way of intoxication for bees. *Journal of Economic Entomology*, 102(5), 1808-1815.

Godfray, H. C. J., Blacquiere, T., Field, L. M., Hails, R. S., Petrokofsky, G., Potts, S. G., ... & McLean, A. R. (2014). A restatement of the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1786), 20140558.

<https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0558>

Goulson, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>

Henry, M., Beguin, M., Requier, F., Rollin, O., Odoux, J. F., Aupinel, P., ... & Decourtye, A. (2012). A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees. *Science*, 336(6079), 348-350.

Hölldobler, B., & Wilson, E. O. (1990). *The Ants*. Harvard University Press.

Ibarra-Núñez, G., García, J. A., López, J. A., & Lachaud, J.-P. (2001). Prey analysis in the diet of some ponerine ants (Hymenoptera: Formicidae) and web-building spiders (Araneae) in coffee plantations in Chiapas, Mexico. *Sociobiology*, 37(3B), 723-755.

Jeschke, P., Nauen, R., Schindler, M., & Elbert, A. (2011). Overview of the status and global strategy for neonicotinoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(7), 2897-2908.

Katsuhara, M., Hanba, Y. T., Shiratake, K., & Maeshima, M. (2008). Expanding roles of plant aquaporins in plasma membranes and cell organelles. *Functional Plant Biology*, 35(1), 1-14.

Kugler, C., & Brown, W. L. Jr. (1982). Revisionary & other studies on the ant genus *Ectatomma*, including the descriptions of two new species. *Agriculture*, 24, 1-7.

Lachaud, J.-P., Fresneau, D., & García-Pérez, J. (1984). Étude des stratégies d'approvisionnement chez 3 espèces de fourmis ponérines (Hymenoptera, Formicidae). *Folia Entomologica Mexicana*, 61, 159–177.

Lachaud, J.-P., López-Méndez, J. A., Schatz, B., De Carli, P., & Beugnon, G. (1996). Comparaison de l'impact de prédation de deux ponérines du genre *Ectatomma* dans un agroécosystème néotropical. *Actes Colloques Insectes Sociaux*, 10, 67–74.

Li, Q., Zhao, F., Li, J., Tao, Q., Gao, J., Lu, Y.-Y., & Wang, L. (2019). Effects of maximum residue limit of triflumezopyrim exposure on fitness of the red imported fire ant *Solenopsis invicta*. *PeerJ*, 7, e8241. <https://doi.org/10.7717/peerj.8241>

Maienfisch, P., Huerlimann, H., Rindlisbacher, A., Gsell, L., Dettwiler, H., Haettenschwiler, J., Sieger, E., & Walti, M. (2001). The discovery of thiamethoxam: A second-generation neonicotinoid. *Pest Management Science*, 57(2), 165-176.

Mengoni Goñalons, C., & Farina, W. M. (2018). Impaired associative learning after chronic exposure to pesticides in young adult honey bees. *Journal of Experimental Biology*, 221(7), jeb176644.

Meza-Lázaro, R. N., Poteaux, C., Bayona-Vásquez, N. J., Branstetter, M. G., & Zaldívar-Riverón, A. (2018). Extensive mitochondrial heteroplasmy in the neotropical ants of the *Ectatomma ruidum* complex (Formicidae: Ectatomminae). *Mitochondrial DNA Part A*, 29(8), 1203-1214. <https://doi.org/10.1080/24701394.2018.1431228>.

Mothapo, N. P., & Wossler, T. C. (2016). The attractiveness of toxic bait is not always accompanied by increased mortality in laboratory colonies of Argentine ants, *Linepithema humile* (Hymenoptera: Formicidae). *African Entomology*, 24(2), 352-364. <https://doi.org/10.4001/003.024.0352>

Mörtl, M., Darvas, B., Vehovszky, Á., Győri, J., & Székács, A. (2017). Occurrence of neonicotinoids in guttation liquid of maize—Soil mobility and cross-contamination. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 97(9), 868-884.

Mörtl, M., Takács, E., Klátyik, S., & Székács, A. (2020). Appearance of thiacloprid in the guttation liquid of coated maize seeds. *Agro-Environmental Research Institute, National Agricultural Research and Innovation Centre*, Budapest, Hungary.

Müller, T., Gesing, M. A., Segeler, M., & Müller, C. (2019). Sublethal insecticide exposure of an herbivore alters the response of its predator. *Environmental Pollution*, 247, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.043>

Nettel-Hernanz, A., Lachaud, J.-P., Fresneau, D., López-Muñoz, R. A., & Poteaux, C. (2015). Biogeography, cryptic diversity, and queen dimorphism evolution of the Neotropical ant genus *Ectatomma* Smith, 1858 (Formicidae, Ectatomminae).

Organisms Diversity & Evolution, 15, 543–553. <https://doi.org/10.1007/s13127-015-0215-9>.

Nondillo, A., Chaves, C. C., Fialho, F. B., Bueno, O. C., & Botton, M. (2014). Evaluation of insecticides for the control of *Linepithema micans* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(1), 215-222.

Offenberg, J. (2015). Ants as tools in sustainable agriculture. *Journal of Applied Ecology*, 52(5), 1197-1205.

Pan, F., Lu, Y., & Wang, L. (2017). Toxicity and sublethal effects of sulfoxaflor on the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 139, 377-383. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.02.029>

Passera, L., Lachaud, J.-P., & Gomel, L. (1994). Individual food source fidelity in the neotropical ponerine ant *Ectatomma ruidum* Roger (Hymenoptera, Formicidae). *Ethology Ecology & Evolution*, 6, 13–21.

Penn, H. J., & Dale, A. M. (2017). Imidacloprid seed treatments affect individual ant behavior and community structure but not egg predation, pest abundance or soybean yield. *Pest Management Science*, 73(9), 1625-1632. <https://doi.org/10.1002/ps.4531>

Penn, H. J., White, P. M., Wilson, B. E., & Richard, R. T. (2023). Non-target potential of neonicotinoid and fungicide seed cane treatments on *Solenopsis invicta*. *Crop Protection*, 170, 106278. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106278>

Perfecto, I. (1990). Indirect and direct effects in a tropical agroecosystem: The maize-pest-ant system in Nicaragua. *Ecology*, 71(6), 2125-2134.
<https://doi.org/10.2307/1938622>

Perfecto, I. (1991). Ants (Hymenoptera: Formicidae) as natural control agents of pests in irrigated maize in Nicaragua. *Journal of Economic Entomology*, 84(1), 65-70. <https://doi.org/10.1093/jee/84.1.65>

Pisa, L. W., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Downs, C. A., Goulson, D., Kreutzweiser, D. P., Krupke, C., Liess, M., McField, M., Morrissey, C. A., Noome, D. A., Settele, J., Simon-Delso, N., Stark, J. D., Van der Sluijs, J. P., Van Dyck, H., & Wiemers, M. (2015). Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 68-102.

Pohl, M., Hommen, U., Eilebrecht, S., Schäfers, C., Gadau, J., & Otto, M. (2024). Ants are no bees – Gaps in the assessment of relevant exposure routes to pesticides and plant incorporated protectants. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 71-80.

Poteaux, C., Prada-Achiardi, F. C., Fernández, F., & Lachaud, J.-P. (2015). Diversidade genética e fenotípica no gênero *Ectatomma*. En J. H. C. Delabie (Ed.), *As formigas poneromorfas do Brasil* (pp. 285-294). Ilhéus: Editus.

Sanchez-Bayo, F., & Goka, K. (2014). Pesticide residues and bees—A risk assessment. *PloS ONE*, 9(4), e94482.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094482>

Santamaría, C., Armbrrecht, I., & Lachaud, J. P. (2009). Nest distribution and food preferences of *Ectatomma ruidum* (Hymenoptera: Formicidae) in shaded and open cattle pastures of Colombia. *Sociobiology*, 53(2B), 517-541.

Santos, A. V., de Oliveira, B. L., & Samuels, R. I. (2007). Selection of entomopathogenic fungi for use in combination with sub-lethal doses of imidacloprid: Perspectives for the control of the leaf-cutting ant *Atta sexdens rubropilosa* Forel (Hymenoptera: Formicidae). *Mycopathologia*, 163(4), 233-240.
<https://doi.org/10.1007/s11046-007-9014-9>

Schläppi, D., Kettler, N., Straub, L., Glauser, G., & Neumann, P. (2020). Long-term effects of neonicotinoid insecticides on ants. *Communications Biology*, 3(1), 335.
<https://doi.org/10.1038/s42003-020-1066-2>

Schläppi, D., Kettler, N., Glauser, G., & Neumann, P. (2021). Varying impact of neonicotinoid insecticide and acute bee paralysis virus across castes and colonies of black garden ants, *Lasius niger* (Hymenoptera: Formicidae). *Scientific Reports*, 11, 20500. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98406->

Simon-Delso, N., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Chagnon, M., Downs, C., ... & Wiemers, M. (2015). Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): Trends, uses, mode of action and metabolites. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 5-34.

Singh, S., & Singh, T. N. (2013). Guttation 1: chemistry, crop husbandry and molecular farming. *Phytochemistry Reviews*, 12, 147-172.

Tapparo, A., Giorio, C., Marzaro, M., Marton, D., Soldà, L., & Girolami, V. (2011). Rapid analysis of neonicotinoid insecticides in guttation drops of corn seedlings by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7811-7819.

Tollerup, K. E., Rust, M. K., Dorschner, K. W., Phillips, P. A., & Klotz, J. H. (2004). Low-toxicity baits control ants in citrus orchards and grape vineyards. *California Agriculture*, 58(4), 213-218.

Tsvetkov, N., Samson-Robert, O., Sood, K., Patel, H. S., Malena, D. A., Gajiwala, P. H., ... & Zayed, A. (2017). Chronic exposure to neonicotinoids reduces honey bee health near corn crops. *Science*, 356(6345), 1395-1397.
<https://doi.org/10.1126/science.aam7470>

Villalvazo-Palacios, M., Vasquez-Bolaños, M., & Pérez-Domínguez, J. F. (2013). Poneromorfos (Hymenoptera: Formicidae: Ectatomminae, Ponerinae) de Sierra de Quila, Jalisco, México. En M. Vasquez-Bolaños, G. Castaños Meneses, A. Cisneros-Caballero, G. A. Quiroz, & J. L. Navarrete-Heredia (Eds.), *Formicidae de México* (pp. 33-40). México.

Wang, L., Zeng, L., & Chen, J. (2015). Impact of imidacloprid on new queens of imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Scientific Reports*, 5, 17938. <https://doi.org/10.1038/srep17938>

Wang, L., Zhao, F., Tao, Q., Li, J., Xu, Y., Li, Z., & Lu, Y. (2020). Toxicity and sublethal effect of triflumezopyrim against red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 113(4), 1753-176

Weber, N. A. (1946). Two common ponerine ants of possible economic significance, *Ectatomma tuberculatum* (Olivier) and *E. ruidum* Roger. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 48(1), 1-16.

Wood, T. J., & Goulson, D. (2017). The environmental risks of neonicotinoid pesticides: a review of the evidence post 2013. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 17285-17325.

Zelikova, T. J., & Breed, M. D. (2008). Effects of habitat disturbance on ant community composition and seed dispersal by ants in a tropical dry forest in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 24, 309-316.

Anexos Capítulo 2

Tabla A3. Efecto del Tiametoxam en la Mortalidad, Actividad y Comportamiento de Obreras de *Ectatomma ruidum* sp.2

Colonia	Tratamiento	Día	Obreras muertas por día	Número de obreras vivas	Número de obreras activas	Número de obreras inactivas	Número de registros de agresión	Número de registros de acicalamiento	Número de registros de movimientos involuntarios
1	Control	0	0	50	20	30	0	3	0
1	Control	1	0	50	16	34	0	2	0
1	Control	2	0	50	16	34	0	3	0
1	Control	3	0	50	23	27	0	4	0
1	Control	4	1	50	15	35	0	2	0
1	Control	5	1	49	17	32	0	2	0
1	Control	6	1	48	16	32	0	2	0
1	Control	7	2	47	23	24	0	3	0
1	Control	8	0	45	15	30	0	4	0
1	Control	9	0	45	18	27	0	2	0
4	Control	0	0	50	28	22	0	2	0
4	Control	1	0	50	29	21	0	2	0
4	Control	2	2	50	20	30	0	4	0
4	Control	3	1	50	24	26	0	2	0
4	Control	4	1	50	27	23	0	3	0
4	Control	5	2	50	22	28	0	6	0
4	Control	6	1	50	24	26	0	3	0
4	Control	7	3	50	24	26	0	5	0
4	Control	8	1	50	19	31	0	2	0
4	Control	9	1	50	19	31	0	5	0
6	Control	0	0	50	14	36	0	2	0
6	Control	1	0	50	15	35	0	1	0
6	Control	2	0	50	15	35	0	3	0
6	Control	3	0	50	13	37	0	2	0
6	Control	4	1	50	17	33	0	2	0
6	Control	5	0	50	30	20	0	4	0
6	Control	6	0	50	22	28	0	9	0
6	Control	7	3	50	20	30	0	5	0
6	Control	8	2	50	17	33	0	0	0
6	Control	9	6	50	22	28	0	2	3
8	Control	0	0	50	20	30	0	2	0
8	Control	1	0	50	21	29	0	1	0
8	Control	2	1	50	16	34	0	2	0
8	Control	3	2	50	13	37	0	3	0
8	Control	4	0	50	17	33	0	1	0
8	Control	5	0	50	15	35	0	1	0
8	Control	6	3	50	17	33	0	2	0
8	Control	7	1	50	18	32	0	5	0
8	Control	8	1	50	24	26	0	0	0
8	Control	9	0	50	20	30	0	5	0
9	Control	0	0	50	14	36	0	3	0
9	Control	1	0	50	13	37	0	1	0
9	Control	2	0	50	13	37	0	2	0
9	Control	3	0	50	15	35	0	4	0
9	Control	4	0	50	19	31	0	4	0

9	Control	5	0	50	20	30	0	3	0
9	Control	6	2	50	14	36	0	2	0
9	Control	7	1	50	14	36	0	5	0
9	Control	8	0	50	14	36	0	3	0
9	Control	9	0	50	15	35	0	3	0
12	Control	0	0	50	19	31	0	1	0
12	Control	1	0	50	20	30	0	2	0
12	Control	2	2	50	16	34	0	2	0
12	Control	3	0	50	14	36	0	3	0
12	Control	4	0	50	20	30	0	4	0
12	Control	5	0	50	20	30	0	4	0
12	Control	6	0	50	22	28	0	3	0
12	Control	7	1	50	19	31	0	2	0
12	Control	8	0	50	19	31	0	1	0
12	Control	9	1	50	20	30	0	3	0
14	Control	0	0	50	24	26	0	2	0
14	Control	1	0	50	26	24	0	3	0
14	Control	2	0	50	23	27	0	4	0
14	Control	3	0	50	15	35	0	3	0
14	Control	4	0	50	19	31	0	2	0
14	Control	5	0	50	17	33	0	4	0
14	Control	6	1	50	20	30	0	2	0
14	Control	7	2	50	20	30	0	3	0
14	Control	8	1	50	27	23	0	4	0
14	Control	9	1	50	27	23	0	3	0
15	Control	0	0	50	33	17	0	2	0
15	Control	1	0	50	30	20	0	4	0
15	Control	2	0	50	28	22	0	4	0
15	Control	3	2	50	25	25	0	2	0
15	Control	4	2	50	29	21	0	6	0
15	Control	5	1	50	21	29	0	4	0
15	Control	6	0	50	24	26	0	7	0
15	Control	7	1	50	25	25	0	2	0
15	Control	8	0	50	28	22	0	4	0
15	Control	9	0	50	20	30	0	2	0
18	Control	0	0	50	15	35	0	3	0
18	Control	1	0	50	13	37	0	2	0
18	Control	2	0	50	14	36	0	2	0
18	Control	3	0	50	17	33	0	3	0
18	Control	4	0	50	18	32	0	4	0
18	Control	5	0	50	20	30	0	5	0
18	Control	6	0	50	26	24	0	4	0
18	Control	7	2	50	22	28	0	4	0
18	Control	8	0	50	28	22	0	4	0
18	Control	9	2	50	22	28	0	2	0
19	Control	0	0	50	32	18	0	1	0
19	Control	1	0	50	30	20	0	1	0
19	Control	2	0	50	28	22	0	3	0
19	Control	3	0	50	25	25	0	2	0
19	Control	4	0	50	23	27	0	8	0
19	Control	5	2	50	31	19	0	7	0
19	Control	6	2	50	24	26	0	6	0
19	Control	7	4	50	22	28	0	2	0
19	Control	8	0	50	23	27	0	0	0

19	Control	9	1	50	28	22	0	2	0
2	Tiametoxam	0	0	50	26	24	0	1	0
2	Tiametoxam	1	0	50	26	24	0	3	0
2	Tiametoxam	2	0	50	20	30	0	5	0
2	Tiametoxam	3	1	50	30	20	0	3	0
2	Tiametoxam	4	0	49	21	28	0	1	0
2	Tiametoxam	5	1	49	23	26	0	1	0
2	Tiametoxam	6	2	48	25	23	0	2	4
2	Tiametoxam	7	7	46	21	25	0	3	10
2	Tiametoxam	8	8	39	11	28	0	0	2
2	Tiametoxam	9	7	31	12	19	0	0	4
3	Tiametoxam	0	0	50	30	20	0	1	0
3	Tiametoxam	1	0	50	39	11	0	5	0
3	Tiametoxam	2	1	50	24	26	0	4	0
3	Tiametoxam	3	0	49	30	19	0	3	0
3	Tiametoxam	4	0	49	27	22	0	2	0
3	Tiametoxam	5	1	49	25	24	0	6	0
3	Tiametoxam	6	5	48	22	26	0	5	0
3	Tiametoxam	7	4	43	28	15	0	5	1
3	Tiametoxam	8	4	39	22	17	0	4	2
3	Tiametoxam	9	4	35	28	7	0	6	1
5	Tiametoxam	0	0	50	21	29	0	4	0
5	Tiametoxam	1	0	50	20	30	0	1	0
5	Tiametoxam	2	0	50	26	24	0	5	0
5	Tiametoxam	3	0	50	35	15	0	3	0
5	Tiametoxam	4	0	50	29	21	0	6	0
5	Tiametoxam	5	1	50	17	33	0	1	0
5	Tiametoxam	6	10	50	15	35	0	2	0
5	Tiametoxam	7	7	50	17	33	0	4	0
5	Tiametoxam	8	7	50	19	31	0	1	1
5	Tiametoxam	9	2	50	23	27	0	4	1
7	Tiametoxam	0	0	50	19	31	0	1	0
7	Tiametoxam	1	0	50	17	33	0	2	0
7	Tiametoxam	2	0	50	13	37	0	3	0
7	Tiametoxam	3	1	50	10	40	0	2	0
7	Tiametoxam	4	1	50	16	34	0	2	0
7	Tiametoxam	5	0	50	17	33	0	4	0
7	Tiametoxam	6	1	50	14	36	0	2	0
7	Tiametoxam	7	7	50	17	33	0	3	2
7	Tiametoxam	8	2	50	23	27	0	2	4
7	Tiametoxam	9	2	50	12	38	0	2	0
10	Tiametoxam	0	0	50	38	12	0	4	0
10	Tiametoxam	1	0	50	40	10	0	6	0
10	Tiametoxam	2	0	50	33	17	0	6	0
10	Tiametoxam	3	0	50	29	21	0	5	0
10	Tiametoxam	4	0	50	30	20	0	7	0
10	Tiametoxam	5	2	50	35	15	0	8	0
10	Tiametoxam	6	1	50	32	18	0	7	0
10	Tiametoxam	7	7	50	36	14	0	2	0
10	Tiametoxam	8	2	50	36	14	0	2	0
10	Tiametoxam	9	6	50	31	19	0	7	0
11	Tiametoxam	0	0	50	17	33	0	2	0
11	Tiametoxam	1	0	50	15	35	0	1	0
11	Tiametoxam	2	0	50	12	38	0	2	0

11	Tiametoxam	3	0	50	15	35	0	3	0
11	Tiametoxam	4	0	50	17	33	0	3	0
11	Tiametoxam	5	0	50	19	31	0	3	0
11	Tiametoxam	6	2	50	15	35	0	0	0
11	Tiametoxam	7	8	50	17	33	0	1	3
11	Tiametoxam	8	5	50	21	29	0	1	3
11	Tiametoxam	9	2	50	21	29	0	3	4
13	Tiametoxam	0	0	50	25	25	0	1	0
13	Tiametoxam	1	0	50	23	27	0	1	0
13	Tiametoxam	2	2	50	23	27	0	2	0
13	Tiametoxam	3	0	50	17	33	0	1	0
13	Tiametoxam	4	0	50	17	33	0	3	0
13	Tiametoxam	5	0	50	28	22	0	3	0
13	Tiametoxam	6	5	50	27	23	0	4	0
13	Tiametoxam	7	7	50	22	28	0	4	0
13	Tiametoxam	8	1	50	21	29	0	1	0
13	Tiametoxam	9	2	50	17	33	0	3	2
16	Tiametoxam	0	0	50	35	15	0	3	0
16	Tiametoxam	1	0	50	33	17	0	2	0
16	Tiametoxam	2	1	50	25	25	0	5	0
16	Tiametoxam	3	1	50	26	24	0	3	0
16	Tiametoxam	4	2	50	25	25	0	3	0
16	Tiametoxam	5	1	50	28	22	0	2	0
16	Tiametoxam	6	2	50	25	25	0	5	0
16	Tiametoxam	7	5	50	27	23	0	4	0
16	Tiametoxam	8	3	50	23	27	0	2	0
16	Tiametoxam	9	5	50	19	31	0	2	2
17	Tiametoxam	0	0	50	33	17	0	2	0
17	Tiametoxam	1	0	50	35	15	0	3	0
17	Tiametoxam	2	0	50	23	27	0	5	0
17	Tiametoxam	3	0	50	20	30	0	4	0
17	Tiametoxam	4	0	50	24	26	0	5	0
17	Tiametoxam	5	0	50	17	33	0	2	0
17	Tiametoxam	6	3	50	15	35	0	2	1
17	Tiametoxam	7	7	50	17	33	0	3	0
17	Tiametoxam	8	3	50	14	36	0	1	4
17	Tiametoxam	9	2	50	12	38	0	1	3
20	Tiametoxam	0	0	50	42	8	0	4	0
20	Tiametoxam	1	0	50	40	10	0	5	0
20	Tiametoxam	2	0	50	37	13	0	6	0
20	Tiametoxam	3	0	50	31	19	0	4	0
20	Tiametoxam	4	0	50	32	18	0	7	0
20	Tiametoxam	5	0	50	29	21	0	3	0
20	Tiametoxam	6	6	50	32	18	0	8	4
20	Tiametoxam	7	15	50	30	20	0	1	4
20	Tiametoxam	8	11	50	11	39	0	0	1
20	Tiametoxam	9	16	50	7	43	0	0	3

El Capítulo 2 fue presentado en el XIII Coloquio IUSSI Sección Andina y del Caribe.



Y fue sometido a la revista Acta Biológica Colombiana



DISCUSIÓN GENERAL

Las hormigas son importantes agentes de servicios en los agroecosistemas, donde pueden influir significativamente en la producción agrícola y el rendimiento a través de interacciones con otros organismos. Al regular a los insectos que dañan los cultivos y polinizar ocasionalmente las flores, las hormigas prestan funciones ecológicas (Sankovitz et al., 2024). La presente investigación proporciona una evaluación de los efectos del uso profiláctico de tiametoxam en semillas de maíz sobre la mirmecofauna local y su función como agentes de control biológico en un agroecosistema tropical de maíz. Los resultados son consistentes con estudios previos que destacan los efectos negativos de los neonicotinoides sobre insectos no objetivo, incluyendo los impactos subletales y letales en diversas especies de artrópodos benéficos (Leslie et al., 2010; Whitehorn et al., 2012; Douglas & Tooker, 2015; Douglas et al., 2015; Penn et al., 2023).

En el experimento de campo nuestros resultados indican que no existen diferencias significativas en la composición y abundancia de las comunidades de hormigas entre parcelas tratadas y no tratadas con tiametoxam. Estos resultados se alienan con los encontrados por Leslie et al. (2010), en cultivo de maíz donde la riqueza y abundancia de coleópteros, no se ve afectada por el tratamiento de semillas con tiametoxam. Además, nuestro hallazgo es consistente con el estudio de Zelikova & Breed (2008) en el que sugieren que la composición de las comunidades de hormigas puede ser resiliente a perturbaciones químicas en el corto plazo. Esta ausencia de efecto podría estar relacionada con la variabilidad temporal y espacial observada, así como con la capacidad de algunas especies para tolerar o evitar la exposición al insecticida (Köhler y Triebkorn, 2013).

Sin embargo, es importante destacar que, aunque la abundancia general de hormigas no fue afectada, se observaron diferencias significativas en la depredación de larvas de *Spodoptera frugiperda* entre parcelas tratadas y control (no tratadas), lo que sugiere que el tiametoxam podría estar afectando selectivamente a ciertas especies o alterando sus patrones de actividad (Heil, 2015). Esto es particularmente relevante considerando el papel crucial que juegan las hormigas en el control biológico de plagas en estos sistemas (Perfecto, 1991; Way & Khoo, 1992).

El análisis de depredación de larvas de *S. frugiperda* revela que las parcelas no tratadas con tiametoxam experimentaron niveles significativamente más altos de depredación ($p = 0,003$). La mayor contribución a esta diferencia se debe a las especies de hormigas *Ectatomma ruidum* y *Solenopsis geminata*. Estos resultados coinciden con investigaciones anteriores que identifican a *E. ruidum* como una especie clave en la regulación de poblaciones de insectos plaga en cultivos tropicales (Perfecto, 1990; 1991; Santamaría et al., 2009)). La menor depredación observada en parcelas tratadas podría atribuirse a efectos subletales del tiametoxam que alteran el comportamiento depredador, al reducir la eficacia del control biológico natural (Frizzi et al., 2022). Además, la asociación predominante de *E. ruidum* y *Odontomachus bauri* con parcelas no tratadas refuerza la idea de que el uso de neonicotinoides puede tener efectos diferenciados entre especies, afectando tanto su presencia como su función ecológica (Mineau y Whiteside, 2013). Estos hallazgos subrayan la necesidad de reconsiderar el uso profiláctico de insecticidas en cultivos, ya que podrían estar comprometiendo los servicios ecosistémicos que ofrecen las hormigas como depredadoras naturales (Risch y Carroll, 1982; Kremen et al., 2002).

Nuestros resultados a la exposición de colonias de *Ectatomma ruidum* sp.2 a una solución azucarada con tiametoxam resultó en alteraciones significativas del comportamiento, como un aumento de actividad de las obreras, así como la

aparición de movimientos involuntarios. Estos cambios son indicativos de efectos neurotóxicos mediados por la exposición a neonicotinoides, como se ha documentado en los estudios de Douglas et al. (2015), donde carábidos alimentados por presas contaminadas con tiametoxam mostraron movilidad alterada. Así mismo, efectos similares han sido reportados en hormigas. Por ejemplo, en *Tetramorium caespitum*, se observó el aumento de la mortalidad y una alteración de la locomoción sin pérdida del comportamiento de caza tras la exposición a imidacloprid (Penn y Dale, 2017). En otras especies de hormigas (*Pogonomyrmex occidentalis*, *Lasius niger*, *Lasius flavus*), también se observó que el imidacloprid altera los rasgos comportamentales (forrajeo, construcción de nidos, comportamiento competitivo) en concentraciones ambientalmente relevantes bajo exposición experimental (Thiel y Kohler, 2016; Sappington, 2018). Es de resaltar el efecto letal sobre las colonias de *E. ruidum* sp.2, particularmente, preocupante dado que esta especie desempeña un papel clave como depredadora de insectos plaga en cultivos de maíz (Perfecto, 1991; Wyckhuys, & O'Neil, 2007).

Los resultados del presente estudio sugieren que el uso profiláctico de tiametoxam en semillas de maíz puede tener consecuencias negativas significativas para la mirmecofauna y su función ecológica. Al reducir la eficacia del control biológico de plagas proporcionado por especies como *E. ruidum* y *O. bauri*, se pueden comprometer tanto la estabilidad de los agroecosistemas como la sostenibilidad de las prácticas agrícolas (Losey y Vaughan, 2006; Naranjo et al., 2015). Además, la alteración del comportamiento y la mortalidad en otras especies de hormigas podría tener efectos en cascada sobre la estructura y la función de las comunidades de insectos benéficos en general (Whitehorn et al., 2012; Lundgren et al., 2013), promoviendo un círculo vicioso de dependencia creciente en el uso de plaguicidas (Douglas et al., 2015; Tooker et al., 2017).

Los efectos observados en la mirmecofauna, tanto en su labor como agentes de control, como en su comportamiento y supervivencia ejemplificado en las pruebas

de laboratorio con colonias de *E. ruidum* sp.2 resaltan la necesidad de desarrollar estrategias de manejo integrado de plagas (MIP) que minimicen el uso de neonicotinoides y fomenten la conservación de los insectos benéficos (Roubos et al., 2014; Moscardini et al., 2015).

Aunque este estudio proporciona evidencia valiosa sobre los efectos del tiametoxam en hormigas tropicales, es importante reconocer ciertas limitaciones. La escala temporal de los experimentos de campo puede no haber capturado plenamente los efectos acumulativos o crónicos del insecticida. Asimismo, se recomienda realizar estudios de laboratorio adicionales que evalúen una gama más amplia de concentraciones de tiametoxam y que incluyan otras especies de hormigas para obtener una visión más completa de los efectos ecológicos de estos insecticidas (Frank & Tooker, 2020).

CONCLUSIONES GENERALES

Este estudio evaluó el impacto del uso profiláctico del neonicotinoide tiametoxam como tratamiento de semillas sobre la mirmecofauna y su función ecológica en el control biológico de plagas en cultivos de maíz. Los resultados indicaron que, aunque la abundancia y riqueza de hormigas no son afectadas directamente, sí se compromete su papel como agentes biológicos de control de plagas que se evidencia en las parcelas tratadas con tiametoxam que presentaron una menor depredación de larvas de *Spodoptera frugiperda*, ejercido por *Ectatomma ruidum* y *Odontomachus bauri*, especies clave en el agroecosistema

Se destaca el potencial impacto negativo del tiametoxam sobre la mirmecofauna. La exposición al tiametoxam a través de una solución azucarada causó alteraciones significativas en el comportamiento de las colonias de *Ectatomma*

ruidum sp.2, así como mortalidad total de las obreras y larvas expuestas, lo que compromete su rol ecológico y agronómico en los sistemas de cultivo de maíz.

En resumen, se recomienda reconsiderar, en lo posible evitar, el uso de tiametoxam en prácticas de manejo integrado de plagas y explorar alternativas que promuevan la conservación de la mirmecofauna y maximicen sus beneficios ecológicos. Esto podría incluir la implementación de estrategias que refuercen el control biológico natural, ayudando a mantener un equilibrio en los agroecosistemas tropicales.

LITERATURA CITADA GENERAL

Awika, J. M. (2011). Major cereal grains production and use around the world. In J. M. Awika, V. Piironen, & S. Bean (Eds.), *Advances in Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion* (pp. 1-13). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch001>

Barbieri, R. F., Lester, P. J., Miller, A. S., & Ryan, K. G. (2013). A neurotoxic pesticide changes the outcome of aggressive interactions between native and invasive ants. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 280(1772), 20132157.

Chavas, J. P., & Mitchell, P. D. (2018). Corn productivity: The role of management and biotechnology. In *Plant Biotechnology* (Chapter 2). InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77054>

Coronado, J. J. T., Solano, L. M. A., Duran, J. R., Guerrero, K. V. O., Sierra, J. C., & Kerguelén, S. M. (2022). Situación actual y avances tecnológicos para mejorar la productividad del cultivo de maíz en Colombia. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1).

Douglas, M. R., Rohr, J. R., & Tooker, J. F. (2015). Neonicotinoid insecticide travels through a soil food chain, disrupting biological control of non-target pests and decreasing soya bean yield. *Journal of Applied Ecology*, 52(1), 250-260. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12372>

Douglas, M. R., & Tooker, J. F. (2015). Large-scale deployment of seed treatments has driven rapid increase in use of neonicotinoid insecticides and preemptive pest management in US field crops. *Environmental Science & Technology*, 49(8), 5088-5097. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00023>

Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14(5), 1295-1319.

FAOStat. (2021). *Crop production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

FENALCE. (2023). *Informe Anual del Sector Cerealero: Perspectivas y Tendencias 2023*. Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas, Colombia.

Frank, S. D., & Tooker, J. F. (2020). Neonicotinoids pose undocumented threats to food webs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(37), 22609-22613.

Frizzi, F., Balzani, P., Masoni, A., Frasconi Wendt, C., Marconi, M., Rossi, A., & Santini, G. (2023). Sub-lethal doses of imidacloprid alter food selection in the invasive garden ant *Lasius neglectus*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 27501-27509.

Galeano, C., Nutti, M., Ramírez Villegas, J., Vanegas, H., Pasculli, L., Peña, Y., ... & Tapasco, J. (2019). *Maize for Colombia 2030 Vision*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

Gómez Maldonado, L. D. (2021). Abejas y otros insectos polinizadores frente al uso indiscriminado de neonicotinoides y fipronil en Colombia: Comentarios a la sentencia del 12 de diciembre de 2019 del Tribunal Administrativo de Cundinamarca. . *Derecho Animal (Forum of Animal Law Studies)*, 12(2).
<https://doi.org/10.5565/rev/da.575>

Gómez Valderrama, J. A., Guevara Agudelo, E. J., Barrera Cubillos, G. P., Cotes Prado, A. M., & Villamizar Rivero, L. F. (2010). Aislamiento, identificación y caracterización de nucleopoliedrovirus nativos de *Spodoptera frugiperda* en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(2), 180-188.

Gontijo, P. C., Moscardini, V. F., Michaud, J. P., & Carvalho, G. A. (2015). Non-target effects of two sunflower seed treatments on *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae). *Pest Management Science*, 71(4), 515-522.

Goulson, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977-987.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>

Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, 347(6229), 1255957. <https://doi.org/10.1126/science.1255957>

Gu, Y. H., Li, Y., Huang, X. F., Zheng, J. F., Yang, J., Diao, H., & Xu, W. P. (2013). Reproductive effects of two neonicotinoid insecticides on mouse sperm function and early embryonic development in vitro. *PloS One*, 8(7), e70112. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070112>

Guez, D., Suchail, S., Gauthier, M., Maleszka, R., & Belzunces, L. P. (2001). Contrasting effects of imidacloprid on habituation in 7-and 8-day-old honeybees (*Apis mellifera*). *Neurobiology of Learning and Memory*, 76(2), 183-191.

Guillade, A. C., & Folgarait, P. J. (2014). Natural enemies of *Atta vollenweideri* (Hymenoptera: Formicidae) leaf-cutter ants negatively affected by synthetic pesticides, chlorpyrifos and fipronil. *Journal of Economic Entomology*, 107(1), 105-114. <https://doi.org/10.1603/EC13277>

Heil, M. (2008). Indirect defence via tritrophic interactions. *New Phytologist*, 178(1), 41-61. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02322.x>

Heil, M. (2015). Extrafloral nectar at the plant-insect interface: A spotlight on chemical ecology, phenotypic plasticity, and food webs. *Annual Review of Entomology*, 60, 213-232. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010814-020753>

Jaramillo-Barrios, C. I., Varón-Devia, E. H., & Monje-Andrade, B. (2020). Economic injury level and action thresholds for *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize crops. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(1), 9065-9076.

Jenkins, S., Hoffmann, A. A., Mccoll, S., Tsitsilas, A., & Umina, P. A. (2013). Synthetic pesticides in agro-ecosystems: Are they as detrimental to nontarget invertebrate fauna as we suspect? *Journal of Economic Entomology*, 106(2), 756-775. <https://doi.org/10.1603/EC12324>

Kennett, D. J., Prufer, K. M., Culleton, B. J., George, R. J., Robinson, M., Trask, W. R., ... & Gutierrez, S. M. (2020). Early isotopic evidence for maize as a staple grain in the Americas. *Science Advances*, 6(23), eaba3245. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba3245>

Köhler, H. R., & Triebkorn, R. (2013). Wildlife ecotoxicology of pesticides: Can we track effects to the population level and beyond? *Science*, 341(6147), 759-765. <https://doi.org/10.1126/science.1237591>

Kremen, C., Williams, N. M., & Thorp, R. W. (2002). Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(26), 16812-16816. <https://doi.org/10.1073/pnas.262413599>

Lexmond, M. B., Bonmatin, J. M., Goulson, D., & Noome, D. A. (2015). Worldwide Integrated Assessment on systemic pesticides: Global collapse of the entomofauna and its impact on ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 1-4. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3220-1>

Losey, J. E., & Vaughan, M. (2006). The economic value of ecological services provided by insects. *Bioscience*, 56(4), 311-323. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[311:TEVOES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[311:TEVOES]2.0.CO;2)

Lundgren, J. G., Hesler, L. S., Clay, S. A., & Fausti, S. F. (2013). Insect communities in soybeans of eastern South Dakota: The effects of vegetation management and pesticides on soybean aphids, bean leaf beetles, and their natural enemies. *Crop Protection*, 43, 104-118.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.09.002>

Maňák, V., Nordenhem, H., Björklund, N., Lenoir, L., & Nordlander, G. (2013). Ants protect conifer seedlings from feeding damage by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Agricultural and Forest Entomology*, 15(1), 98-105. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02322.x>

Metcalf, R. L., & Luckmann, W. H. (Eds.). (1994). *Introduction to insect pest management* (Vol. 101). John Wiley & Sons.

Mineau, P. (2005). A review and analysis of study endpoints relevant to the assessment of “long term” pesticide toxicity in avian and mammalian wildlife. *Ecotoxicology*, 14(8), 775-799. <https://doi.org/10.1007/s10646-005-0036-9>

Mineau, P., & Whiteside, M. (2013). Pesticide acute toxicity is a better correlate of US grassland bird declines than agricultural intensification. *PloS One*, 8(2), e57457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057457>

Moscardini, V. F., Gontijo, P. C., Michaud, J. P., & Carvalho, G. A. (2015). Sublethal effects of insecticide seed treatments on two nearctic lady beetles (Coleoptera: Coccinellidae). *Ecotoxicology*, 24(5), 1152-1161.
<https://doi.org/10.1007/s10646-015-1467-6>

Naranjo, S. E., Ellsworth, P. C., & Frisvold, G. B. (2015). Economic value of biological control in integrated pest management of managed plant systems. *Annual Review of Entomology*, 60(1), 621-645. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010814-020910>

Offenberg, J. (2015). Ants as tools in sustainable agriculture. *Journal of Applied Ecology*, 52(5), 1197-1205. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12496>

Paredes, D., Campos, M., & Cayuela, L. (2013). El control biológico de plagas de artrópodos por conservación: técnicas y estado del arte. *Ecosistemas*, 22(1), 56-61. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-1.09>

Penn, H. J., & Dale, A. M. (2017). Imidacloprid seed treatments affect individual ant behavior and community structure but not egg predation, pest abundance or soybean yield. *Pest Management Science*, 73(8), 1625-1632.

Penn, H. J., White, P. M., Wilson, B. E., & Richard, R. T. (2023). Non-target potential of neonicotinoid and fungicide seed cane treatments on *Solenopsis invicta*. *Crop Protection*, 170, 106278.

Perfecto, I. (1990). Indirect and direct effects in a tropical agroecosystem: The maize-pest-ant system in Nicaragua. *Ecology*, 71(6), 2125-2134. <https://doi.org/10.2307/1938622>

Perfecto, I. (1991). Ants (Hymenoptera: Formicidae) as natural control agents of pests in irrigated maize in Nicaragua. *Journal of Economic Entomology*, 84(1), 65-70. <https://doi.org/10.1093/jee/84.1.65>

Risch, S. J., & Carroll, C. R. (1982). The ecological role of ants in two Mexican agroecosystems. *Oecologia*, 55, 114-119. <https://doi.org/10.1007/BF00384479>

Rodríguez Chalarca, J., Parody, J. A., & Vargas, C. A. (2020). *Managing Dalbulus maidis (Hemiptera: Cicadellidae) (De Long & Wolcott 1923) in the Valle del Cauca Department, Colombia*. Memorias 47avo congreso colombiano de Entomología (SOCOLEN) 2020.

Roubos, C. R., Rodriguez-Saona, C., Holdcraft, R., Mason, K. S., & Isaacs, R. (2014a). Relative toxicity and residual activity of insecticides used in blueberry pest management: Mortality of natural enemies. *Journal of Economic Entomology*, 107(1), 277-285. <https://doi.org/10.1603/EC13373>

Roubos, C. R., Rodriguez-Saona, C., & Isaacs, R. (2014b). Mitigating the effects of insecticides on arthropod biological control at field and landscape scales. *Biological Control*, 75, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.01.006>

Rueppell, O., & Kirkman, R. W. (2005). Extraordinary starvation resistance in *Temnothorax rugatulus* (Hymenoptera, Formicidae) colonies: Demography and adaptive behavior. *Insectes Sociaux*, 52(3), 282-290. <https://doi.org/10.1007/s00040-005-0804-5>

Sankovitz, M., Rivera, M. J., Manjarress, T., & Mathis, K. A. (2024). The role of ant-mediated biological interactions in agroecosystems. *Annals of the Entomological Society of America*, 117(2), 79–91. <https://doi.org/10.1093/aesa/saae002>

Santamaría, C., Armbrrecht, I., & Lachaud, J. P. (2009). Nest distribution and food preferences of *Ectatomma ruidum* (Hymenoptera: Formicidae) in shaded and open cattle pastures of Colombia. *Sociobiology*, 53(2B), 517-541.

Sappington, J. D. (2018). Imidacloprid alters ant sociobehavioral traits at environmentally relevant concentrations. *Ecotoxicology*, 27(9), 1179-1187.

Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 430-439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>

Simon-Delso, N., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Chagnon, M., Downs, C., Furlan, L., Gibbons, D. W., Giorio, C., Girolami, V., Goulson, D., Kreutzweiser, D. P., Krupke, C., Liess, M., Long, E., McField, M., Mineau, P., Mitchell, E. A. D., Morrissey, C. A., ... Wiemers, M. (2015). Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): Trends, uses, mode of action and metabolites. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 5-34. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3470-y>

Symondson, W. O. C., Glen, D. M., Ives, A. R., Langdon, C. J., & Wiltshire, C. W. (2002). Dynamics of the relationship between a generalist predator and slugs over five years. *Ecology*, 83(1), 137-147. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[0137:DOTRBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[0137:DOTRBA]2.0.CO;2)

Thiel, S., & Köhler, H. R. (2016). A sublethal imidacloprid concentration alters foraging and competition behaviour of ants. *Ecotoxicology*, 25, 814-823.

Tooker, J. F., Douglas, M. R., & Krupke, C. H. (2017). Neonicotinoid seed treatments: Limitations and compatibility with integrated pest management. *Agricultural & Environmental Letters*, 2(1), ael2017-08.
<https://doi.org/10.2134/ael2017.08.0026>

Way, M. J., & Khoo, K. C. (1992). Role of ants in pest management. *Annual Review of Entomology*, 37(1), 479-503.
<https://doi.org/10.1146/annurev.en.37.010192.002403>

Whitehorn, P. R., O'Connor, S., Wackers, F. L., & Goulson, D. (2012). Neonicotinoid pesticide reduces bumble bee colony growth and queen production. *Science*, 336(6079), 351-352. <https://doi.org/10.1126/science.1215025>

Wyckhuys, K. A., & O'Neil, R. J. (2007). Influence of extra-field characteristics to abundance of key natural enemies of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) in subsistence maize production. *International Journal of Pest Management*, 53(2), 89-99. <https://doi.org/10.1080/09670870601101477>

Zelikova, T. J., & Breed, M. D. (2008). Effects of habitat disturbance on ant community composition and seed dispersal by ants in a tropical dry forest in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 24(3), 309-316.