



Abanico Veterinario. Janeiro-Dezembro 2023; 13:1-24. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2023.11>

Revisão de Literatura. Recebido:08/07/2022. Aceito:08/05/2023. Publicado:26/05/2023. Chave: e2022-58.

<https://www.youtube.com/watch?v=zaCqnEk8dZU>

Semioquímicos associados ao rastreamento de formigas (Hymenoptera: Formicidae): uma revisão sistemática

Semiochemicals associated with the monitoring of ant traces
(Hymenoptera: Formicidae): a systematic review



Cruz-Labana José*¹ <https://orcid.org/0000-0002-4217-5592>

Vallejo-Pérez Moisés¹ <https://orcid.org/0000-0002-9167-2632>

Flores-Ramírez Rogelio¹ <https://orcid.org/0000-0003-2263-6280>

Tarango-Arámbula Luis² <https://orcid.org/0000-0002-7662-1319>

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología, Laboratorio Nacional, San Luis Potosí, México. ²Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Posgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales, San Luis Potosí, México. *Autor responsável e para correspondência: Cruz-Labana José. Av. Sierra Leona 550, Lomas 2ª Sección. CP. 78210. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. E-mail: domingo.cruz@uaslp.mx, moises.vallejo@uaslp.mx, rfloresra@conacyt.mx, ltarango@colpos.mx.

RESUMO

As formigas são himenópteros muito diversificados e geograficamente difundidos. Elas são insetos sociais e sua comunicação é baseada em sinais químicos. Dentro do grupo de semioquímicos que regulam o forrageamento estão os feromônios de rastreamento de trilhas. O objetivo desta revisão é documentar os principais feromônios de rastreamento que guiam as formigas até as fontes de alimento. Foi realizada uma revisão sistemática com base nas diretrizes PRISMA de pesquisas encontradas no PubMed, Web of Science e Google Scholar sobre feromônios de trilha. Vinte e seis compostos químicos foram relatados em 14 espécies de formigas, sendo as principais fontes extratos de corpo inteiro, abdômen e glândulas. A detecção de semioquímicos foi feita por meio de respostas eletrofisiológicas de himenópteros e métodos cromatográficos, registrando compostos orgânicos de cadeia curta e longa (C05-C18). O estudo de compostos químicos vestigiais foi realizado em um pequeno número de espécies. Esse tipo de pesquisa tem grande potencial para o controle de formigas invasoras, uma vez que sua distribuição tem tido repercussões negativas nos ecossistemas e prejuízos econômicos para os seres humanos.

Palavras-chave: Cromatografia gasosa-espectrometria de massa, eletroantenografia, glândulas, bioensaio, trilha.

ABSTRACT

Ants are very diverse hymenopterans with a wide geographical distribution. They are social insects and their communication is based on chemical signals. Within the group of semiochemicals that regulate the search for foods are the trail pheromones on the roads. The purpose of this review is to document the main tracking pheromones on the trails that guide ants to feeding sources. A systematic review was carried out based on the guidelines of the PRISMA statement of research found in PubMed, Web of Science and Google Scholar of the pheromones trails. Reported 26 chemical compounds were reported in 14 species of ants, the main sources of obtaining were extracts of the whole body, abdomen and glands. The detection of the semiochemicals were electrophysiological responses of Hymenoptera and chromatographic methods, recording short and long-chain organic compounds (C05-C18). The study of trail chemical compounds has



been carried out on a small number of species, this type of research has great potential for the control of invasive ants, since their distribution has had negative repercussions on ecosystems and economic damage to man.

Keywords: Chromatography-mass spectrometry, electroantennography, glands, bioassay, trail.

INTRODUÇÃO

Os insetos são os invertebrados terrestres mais diversos do planeta, com cerca de 30 milhões de espécies (Stork, 2018). Na ordem Hymenoptera, os mais representativos são as abelhas, as vespas e as formigas. As formigas pertencem à família Formicidae, a maior da ordem Hymenoptera. São insetos de grande diversidade, pois foram identificadas cerca de 11.000 a 16.000 espécies (26 subfamílias e 428 gêneros). Estima-se que, para cada 10 kg de insetos, 3 a 4 kg sejam formigas (Azhagu *et al.*, 2017; Huber, 2017; Diamé *et al.*, 2018; Vander Meer & Alonso, 2019; Csősz *et al.*, 2021). Esses invertebrados são de grande relevância pelos serviços ecossistêmicos que prestam na maioria dos ambientes terrestres onde estabelecem suas colônias, pois modificam ou criam habitats para outras espécies, por isso são considerados engenheiros do ecossistema (Leite *et al.*, 2018; Wills & Landis, 2018; De Almeida *et al.*, 2020). As formigas são capazes de decompor e reciclar nutrientes, alterando a estrutura do solo e o fluxo de energia, coletar e transportar sementes, favorecendo a distribuição das plantas (Bologna *et al.*, 2017; Eubanks *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019; Swanson *et al.*, 2019; Jílková *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2021; Ouattara *et al.*, 2021).

Os formídeos são usados como bioindicadores para estimar a diversidade de outros táxons, refletir o status de conservação ou poluição dos ecossistemas e a restauração ecológica (Forbes & Northfield, 2017; Tibcherani *et al.*, 2018; Casimiro *et al.*, 2019; Thurman *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2020; Oberprieler & Andersen, 2020; Okrutniak & Grześ, 2021). Além disso, são um importante controle de pragas (Stüber *et al.*, 2021; Trigos-Peral *et al.*, 2021) e algumas espécies são até mesmo usadas para consumo humano em diferentes estágios de desenvolvimento (estágios imaturos e adultos) (Pino Moreno & Blasquez, 2021).

As formigas são um grupo globalmente dominante e amplamente disperso. Com exceção da Antártica e de regiões com neve perpétua, as formigas estão presentes em uma ampla variedade de habitats; elas são capazes de colonizar novas áreas para sobreviver a mudanças ambientais e encontrar novos recursos para garantir a reprodução e a sobrevivência de suas colônias (Escárraga & Guerrero, 2014; Guénard *et al.*, 2017; Hakala *et al.*, 2019; Lessard, 2019). A sobrevivência, o desenvolvimento, a reprodução e o forrageamento bem-sucedidos das formigas se devem ao fato de que elas são organismos sociais, onde a divisão do trabalho é colaborativa, baseada em castas e com



a plasticidade de mudar de função de acordo com o tamanho do corpo e a idade (Cristín *et al.*, 2020; De Gasperin *et al.*, 2020; Ortiz-Alvarado *et al.*, 2021; O'Shea-Wheller *et al.*, 2021).

A comunicação das formigas é baseada em traços químicos, que podem diferenciar o odor da colônia e a identificação de congêneres (hidrocarbonetos cuticulares); esses compostos estão envolvidos em respostas específicas e são secretados por glândulas exócrinas (Kleeberg *et al.*, 2017; Pask *et al.*, 2017; Gordon, 2021). As formigas são quase cegas, mas têm um sistema olfativo muito agudo nas antenas, que são equipadas com quimiorreceptores especializados para captar moléculas de odor transportadas pelo ar, de modo que a percepção e a interpretação dos odores no cérebro das formigas são de importância vital para sua sobrevivência (D'Etorre *et al.*, 2017; Kleeberg *et al.*, 2017). Os feromônios coordenam a defesa do ninho (sistema de alarme), o cuidado da rainha e da ninhada, a imigração da colônia, a reprodução, o forrageamento e o recrutamento (Wyatt, 2017; Du *et al.*, 2019; Vander Meer & Alonso, 2019; Ge *et al.*, 2020). Os feromônios de trilha são um dos principais mecanismos de orientação para as fontes de alimento; quando um forrageador encontra alimento, ele deposita uma trilha de feromônios ao retornar ao ninho, incitando o recrutamento de seus companheiros para o mesmo recurso. As forrageiras recrutadas depositam feromônios de trilha adicionais, reforçando o original; quanto mais abundante e de melhor qualidade for o alimento, maior será a concentração de feromônio na trilha (Hu *et al.*, 2018; Du *et al.*, 2019; Renyard, 2019; Kolay *et al.*, 2020).

Há dois tipos de feromônios que permitem a comunicação entre as formigas: primers e liberadores. Os primeiros estão associados ao desenvolvimento de comportamentos fisiológicos complexos e de longo prazo, enquanto os últimos têm uma resposta comportamental simples e imediata (Vander Meer & Alonso, 2019). A marcação de traços químicos (odor) em trilhas gera uma resposta quase imediata no recrutamento de outras formigas forrageiras. Os feromônios excretados são produzidos por uma glândula (ou duas em algumas espécies) e, dependendo da família ou subfamília em que são classificados, podem ser tibiais, pigidiais, procoxais, Dufour, Pavan etc (Hölldobler, 2019; Billen *et al.*, 2020). Os feromônios secretados são uma mistura particular de hidrocarbonetos cuticulares (HC) ou glandulares, metabólitos que regulam um comportamento específico. Uma das ferramentas mais amplamente usadas para a identificação de metabólitos é a metabolômica com abordagens direcionadas e não direcionadas. A primeira envolve a análise de compostos químicos conhecidos (uso de padrões) e a segunda visa encontrar todos os compostos possíveis (Ribbenstedt *et al.*, 2018). Por meio de diferentes técnicas metabolômicas, foram identificados feromônios que regulam vários comportamentos de insetos sociais, incluindo produtos químicos associados ao seguimento de trilhas de diferentes famílias e subfamílias de formigas



(Hefetz, 2019), que são usados para a criação de versões sintéticas como métodos de controle de espécies invasoras que afetam negativamente as relações tróficas de ecossistemas, culturas agrícolas e estruturas arquitetônicas com diferentes usos para humanos (Angulo *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020; Tay *et al.*, 2020). Atualmente, vários artigos de revisão relatam os compostos químicos usados pelas formigas como um sistema de orientação para fontes de alimentos (Morgan, 2009; Cerdá *et al.*, 2014; Fox & Adams, 2022), no entanto, essas contribuições não especificam a metodologia usada na busca de fontes e os critérios de qualidade para selecioná-las e incluí-las em suas pesquisas, por isso é necessário realizar uma revisão dos semioquímicos relatados em formigas, pois são informações essenciais para o desenvolvimento de estudos com formigas no México. Para garantir que uma revisão seja reproduzível, precisa e transparente, existe a declaração PRISMA, que tem sido aplicada em uma ampla variedade de disciplinas para realizar revisões temáticas (Page *et al.*, 2021), mas não há precedentes de seu uso para relatar informações sobre semioquímicos relatados em formigas. A declaração PRISMA é um conjunto de diretrizes para a realização de uma revisão sistemática, que é uma síntese rigorosa do conhecimento para identificar, peneirar, selecionar e analisar criticamente as pesquisas mais relevantes sobre um tópico específico e incluí-las na revisão (Rethlefsen *et al.*, 2021; Sarkis-Onofre *et al.*, 2021). Nesse sentido, o objetivo da presente revisão é documentar os principais feromônios seguidores de trilhas, como um sistema de orientação para fontes de alimentos, relatados nos últimos sete anos, e identificar as diferentes técnicas para sua síntese química e os métodos para avaliar sua eficácia.

MATERIAL E MÉTODOS

Nesta pesquisa, foi realizada uma revisão sistemática da literatura científica, utilizando as diretrizes da declaração PRISMA (Page *et al.*, 2021), que permite sintetizar, por meio de uma análise bibliométrica, o estado do conhecimento dos feromônios associados ao rastreamento e forrageamento de diferentes espécies de formigas, especificamente aqueles secretados por glândulas ou outras partes do corpo. A revisão sistemática foi estruturada em cinco etapas: a) perguntas da revisão sistemática, b) busca inicial, c) busca sistemática, d) seleção de publicações (critérios de inclusão e exclusão), e) análise de qualidade e avaliação crítica, que são explicadas a seguir:

a) Perguntas da revisão sistemática. A revisão sistemática teve como objetivo abordar as seguintes questões de pesquisa:

Em quais espécies de formigas foram relatados feromônios vestigiais nos últimos sete anos?

Quais são os métodos de extração de feromônios e quais partes do corpo foram analisadas?



Quais técnicas foram usadas para a detecção de compostos químicos como uma resposta física das formigas?

Quais são os métodos de preparação de compostos químicos e/ou feromonais a partir de traços?

Quais são os compostos que foram identificados nas trilhas de forrageamento das formigas?

Que projetos experimentais (bioensaios) foram realizados para obter os resultados?

b) Pesquisa inicial. Consistiu em pesquisas iniciais na Web of Science, Scopus, PubMed e Google Scholar em dezembro de 2021, os termos usados foram a combinação de "Ants" (formigas) e "pheromones trails" (trilhas de feromônios). Os resultados identificaram um grande número de publicações, muitas das quais eram duplicatas, ou outras que não eram úteis, pois incluíam estudos etológicos sobre reprodutores (rainhas), ou mesmo pertenciam a outras famílias de insetos (por exemplo, cupins, besouros e aracnídeos). Os operadores booleanos OU e E foram usados conforme apropriado para delimitar as buscas.

c) Pesquisa sistemática. Foi realizada em janeiro de 2022 e incluiu pesquisas de 2017 até o presente. Os termos e o idioma usados, por tipo de mecanismo de busca, foram: i) Web of Science; (TI=(Ants) OU TI=(Hymenoptera: Formicidae)) E TI=(pheromones trails) E TI=(trails following). ii) Scopus; TITLE (ants OU "Hymenoptera: Formicidae" E pheromones E "trails following"). iii) PubMed e Google Scholar; Ants OU (Hymenoptera: Formicidae) E (pheromones trails) E (Trail-Following). Os termos de pesquisa estavam em inglês, pois a produção científica mais atual sobre feromônios de trilha de formigas está em inglês. Esse critério aumentou a visibilidade dos artigos indexados em bancos de dados internacionais e identificou os resultados com o maior número de subfamílias de Formicidae.

d) Seleção de publicações

Critérios de inclusão

Pesquisas que relataram compostos químicos traçadores em rastros de formigas obtidos de extratos glandulares e outras partes do corpo (por exemplo, cabeça, tórax, abdômen etc.). Além disso, foram identificadas contribuições que realizaram bioensaios com a aplicação de extratos e/ou feromônios sintéticos. Esses experimentos tinham que usar atrativos alimentares ou evidenciar o seguimento de trilhas, bem como relatar os efeitos de viés e/ou design de cada experimento, submetendo-os a um teste probabilístico.



A busca incluiu apenas feromônios de trilha; pesquisas que relataram feromônios de alarme (presença de predadores ou colônias rivais) ou feromônios que regulam a reprodução da colônia não foram consideradas.

Critérios de exclusão

Não foram incluídas publicações em que os bioensaios foram baseados em extratos de óleo essencial. Foi dada prioridade à triagem de pesquisas que sintetizaram feromônios de partes do corpo de formigas ou misturas comerciais. Outro critério de exclusão foram os experimentos desenvolvidos para testar relações biológicas (por exemplo, mimetismo) com famílias de insetos que não fossem presas de formigas. Por fim, o path não deve se basear em modelos matemáticos.

e) Análise de qualidade e avaliação crítica

A qualidade individual dos artigos selecionados foi avaliada considerando-se a seleção de casos (número de colônias de formigas), os métodos de extração de feromônio, os projetos e as repetições nos bioensaios. Após atender a esses critérios, cada artigo foi lido na íntegra. Todos eles foram caracterizados pelo uso de desenhos experimentais que permitiram testes estatísticos e/ou diferentes ajustes de modelos probabilísticos; em geral, os métodos analíticos (obtenção de traços de semioquímicos e/ou feromônios) podem ser adaptados ou repetidos em outras pesquisas com formigas.

Análise do grupo funcional

Depois de aplicar a declaração PRISMA e identificar os semioquímicos residuais das formigas, as informações foram classificadas da seguinte forma: a) grupos funcionais químicos, b) comprimento da cadeia (número de carbonos) e c) compostos químicos. Com essas informações e as frequências totais da classificação, foi realizada uma

RESULTADOS

Um total de 212 fontes contendo as palavras-chave de interesse foram identificadas em dois bancos de dados e em um mecanismo de busca na Internet. Com essas informações, foram selecionadas 206 publicações, que eram artigos científicos dos últimos 7 anos. Após a exclusão de duplicatas e a análise de títulos e resumos, 178 registros foram excluídos. Os 25 artigos restantes foram examinados usando os critérios de inclusão/exclusão, dos quais sete foram escolhidos para a revisão sistemática por atenderem aos critérios de qualidade e avaliação crítica (Tabela 1).



A pesquisa de Chalisserly *et al.* (2021), Chalisserly *et al.* (2019) e Renyard *et al.* (2019) foi realizada no Canadá, pela Simon Fraser University, Burnaby, BC (Departamento de Ciências Biológicas). No estudo de Hamilton *et al.* (2018), eles obtiveram as amostras (formigueiros) no Parque Nacional Soberania, Panamá, sob a direção da Universidade Estadual de Ohio, Columbus, OH, EUA (Departamento de Evolução, Ecologia e Biologia Organismal). A pesquisa de Nakamura *et al.* (2019) foi realizada no Instituto de Tecnologia de Kyoto, Japão (Laboratório de Entomologia Aplicada). Stringer *et al.* (2017) realizaram seu estudo na Nova Zelândia, Instituto da Nova Zelândia (Instituto de Plantas e Alimentos). Por fim, Xu *et al.* (2021) obtiveram material biológico nas províncias de Guangdong (formigas) e Hebei (pulgões do algodão) na China; o desenvolvimento da pesquisa foi uma colaboração entre a Universidade de Hebei e a Universidade Agrícola do Sul da China (entre outras instituições).

Tabela 1. Análise da qualidade dos artigos incluídos nos resultados

Referência	Tamanho da amostra 1=Não está claro 2=Presente	Extratos glandulares ou outras partes do corpo 1=Não está claro 2=Presente	Bioensaios 0=Não está presente 1=Não está claro 2=Está claro	Tratamentos 1=Tratamentos diferentes e um controle 2=Tratamentos diferentes com replicação e um controle	Variável de resposta 0=Qualitativa (ordinal) 1=Numérica (discreta e/ou contínua)	Análise estatística 0=Não está presente 1=Não está claro 2=Presente	Resultados 0=Incompleto 2=Completo	Total
Chalisserly <i>et al.</i> (2021)	1	2	2	2	1	2	2	12
Chalisserly <i>et al.</i> (2019)	2	2	2	2	1	2	2	13
Hamilton <i>et al.</i> (2018)	2	2	0	1	1	0	2	8
Nakamura <i>et al.</i> (2019)	2	2	2	2	1	2	2	13
Renyard <i>et al.</i> (2019)	2	2	2	2	1	2	2	13
Stringer <i>et al.</i> (2017)	2	2	2	2	1	2	2	13
Xu <i>et al.</i> (2021)	2	2	2	2	1	2	2	13

O resultado da revisão identificou um total de 26 semioquímicos vestigiais de 14 espécies de formigas, pertencentes às subfamílias Myrmicinae (dez espécies), Formicinae (três espécies) e Dolichoderinae (uma espécie) (Tabela 2). As formigas mais estudadas para a realização dos experimentos foram *Camponotus modoc* e *Linepithema humile* (Stringer *et al.*, 2017; Chalisserly *et al.*, 2019).



Tabela 2. Semioquímicos de traços e metodologias analíticas na pesquisa sistemática

Referência	Espécies (s)	Fonte(s) para obtenção de feromônios	Solvente usado nos extratos	Configuração das vias e/ou estruturas usadas nos bioensaios	Análise de detecção de feromônio	Feromônios de traços identificados*.	Resultados
Chalisser et al. (2021)	<i>Tetramorium immigrans</i>	Glândula de veneno e corpo inteiro (abdômen, tórax e cabeça)	Diclorometano (DCM)	(i) Estrutura circular (ii) Labirinto em forma de V (iii) Caminho de campo com duas tirinhas de papel (0° e 180°) O DCM foi usado como controle em todos os experimentos.	(i) Cromatografia gasosa-eletroantenográfica (GC-EAD) para identificar os compostos mais responsivos nas antenas. (ii) Cromatografia gasosa-espectrometria de massa (GC-MS) para análise do(s) feromônio(s) candidato(s).	Methyl 2-methoxy-6-methylbenzoate (MMMB) como um feromônio candidato	As formigas seguiram os rastros dos extratos (HSRE)
Chalisser et al. (2019)	Distribuição simpátrica: i) <i>Camponotus modoc</i> ii) <i>Lasius niger</i> iii) <i>Myrmica rubra</i> Distribuição alopatrica iv) <i>Tetramorium caespitum</i> v) <i>Novomessor albisetosus</i> vi) <i>Linepithema humile</i>	Mistura sintética de seis feromônios vestigiais (6-TPB)	Pentano	Estruturas circulares de diferentes diâmetros Em todos os experimentos, o pentano foi usado como controle	GC-EAD	i) (2S,4R,5S)-2,4-dimethyl-5-hexanolide ("hexanolide", 6-TPB) e 2,4, dimethyl-5-hexanolide (EAD) ii) 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,7-trimethylisocoumarin ("isocoumarin", 6-TPB) e 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,5,7-trimethylisocoumarin (EAD). iii) 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine (6-TPB e EAD). iv) 2,5-dimethylpyrazine (6-TPB e EAD) v) 4-methyl-3-heptanone (6-TPB e EAD) vi) (Z)-9-hexadecenal (6-TPB e EAD)	As formigas seguiram os rastros da mistura sintética (HSRMS).
HAMILTON, et al. (2018)	<i>Cyphomyrmex rimosus</i> <i>C. salvini</i> <i>C. costatus</i> <i>C. muelleri</i> <i>C. longiscapus</i>	Cabeça, mesosoma (tórax) e gáster (abdômen)	Metanol	Compostos químicos comparados a uma amostra filogenética	CG-MS	i) 2,5-dimethyl-3-isoamylpyrazine ii) Seis feromônios vestigiais putativos: (3Z, 6E)- α -farnesene, (3Z, 6E)- α -7-ethylhomofarnesene, α -6-ethyl-bishomofarnesene	Os compostos mais abundantes foram (3Z, 6E)- α -7-ethylhomofarnesene e α -6-bishomofarnesene em três espécies



						Bishomofarnesene -2, Bishomofarnesene -1, Trishomofarnesen e	do grupo <i>C. wheeleri</i> . A região do mesossomo não produziu nenhum composto volátil.
Nakamura et al. (2019)	<i>Tetramorium tsushimae</i> Emery	Extrato do corpo inteiro, mesossoma da cabeça, gáster, glândula de veneno, glândula de Dufour, intestino superior e resíduos do abdômen	Mistura de n-hexano e éter dietílico	Linhas retas de vários comprimentos (10 e 5 cm). Em todos os experimentos, o n-hexano e o éter dietílico foram usados como controle	GC, GC preparatório acoplado a um detector de condutividade térmica e GC-MS	Methyl 6-methylsalicylate	HSRE As formigas escolheram com mais frequência o extrato marcado com glândula de veneno do que qualquer um dos outros (glândula de Dufour, intestino superior e detritos abdominais).
Renyard et al. (2019)	<i>Camponotus modoc</i>	Intestino e glândula de veneno	DCM	i) Andaime de metal em uma estrutura circular (ii) Labirinto em "V" (iii) Labirinto em "Y" Em todos os experimentos, o DCM foi usado como controle.	(i) GC-EAD para identificar os compostos mais responsivos nas antenas e GC-MS para análise do(s) feromônio(s) candidato(s) (ii) GC-MS para quantificar a quantidade de componentes do feromônio candidato do intestino superior	i) 2, 2,4-dimethylhexanoic acid ii) 2,4-dimethyl-5-hexanolide iii) Pentadecane iv) Dodecanoic acid v) 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,5,7-trimethylisocoumarin	HSRE Os componentes da glândula de veneno não causaram nenhum rastreamento.
Stringer et al. (2017)	<i>Linepithema humile</i>	Gáster	Hexano contendo 50 ng de acetato de dodecila	i) fio de algodão (20 cm x 0,33 mm) (ii) Linha reta desenhada em uma folha de papel (iii) Caminhos paralelos (1 cm) Em todos os experimentos, o etanol 70% foi usado como controle	GC-MS	(Z)-9-hexadecenal	HSRE O seguimento da trilha foi mais eficaz com sinais físicos (corda). O seguimento da trilha foi ligeiramente melhorado em altas concentrações a favor do vento.



Xu <i>et al.</i> (2021)	<i>Solenopsis invicta</i>	Trecho de corpo inteiro	Hexano	(i) Tiras de papel de filtro (1 cm) colocadas em uma placa de Petri (9 cm). ii) Crescimento das populações de pulgões na área foliar das mudas de algodão com a aplicação de extratos de formigas. Nos experimentos, o hexano foi usado como controle.	i) Eletroantennograma (EAG) nas antenas de <i>Aphis gossypii</i> Glover. ii) GC-MS para a análise do extrato bruto de formigas operárias em seis frações.	Z,E-a-farnesene E,E-a-farnesene	i) Os pulgões apresentaram respostas aos extratos de todas as frações. ii) Os semioquímicos residuais de <i>S. invicta</i> suprimem a dispersão de <i>A. gossypii</i> . iii) A aplicação dos extratos de traços levou a um crescimento mais rápido da população de pulgões nas mudas de algodão.
-------------------------	---------------------------	-------------------------	--------	---	--	------------------------------------	--

*Para evitar sinonímia de compostos químicos residuais, discrepâncias e confusão com os acrônimos usados pelos autores, eles foram relatados no idioma inglês

O método de obtenção de semioquímicos traço foi por extratos, usando solventes orgânicos de três grupos químicos: alcano (C_5H_{12} e C_6H_{14}), éster ($C_4H_{10}O$), álcool (CH_3OH) e um alifático clorado (CH_2Cl_2). Com relação às partes do corpo para a obtenção dos semioquímicos, Nakamura *et al.* (2019), Chalisserly *et al.* (2021) e Xu *et al.* (2021) usaram formigas de corpo inteiro. Chalisserly *et al.* (2021) também usaram a glândula de veneno, enquanto Nakamura *et al.* (2019) obtiveram extratos do mesossoma da cabeça, do abdômen, da glândula de veneno e do intestino superior. Da mesma forma, Stringer *et al.* (2017) e Hamilton *et al.* (2018) dissecaram gastrópodes (Tabela 2).

O método de detecção e resposta eletrofisiológica usado em formigas foi o GC-EAD em duas publicações (Chalisserly *et al.*, 2021; Chalisserly *et al.*, 2019) e o eletroantennograma (EAG) em *Aphis gossypii* em uma relação mutualística com *Solenopsis invicta* (Xu *et al.*, 2021) (Tabela 2). A preparação, a produção e a purificação dos traços de semioquímicos (26 no total), em geral, foram feitas por GC-MS. Nos artigos recuperados, as intensidades de cromatografia gasosa foram analisadas e as moléculas obtidas de extratos de diferentes partes do corpo das formigas foram identificadas, com exceção de Chalisserly *et al.* (2019), que usaram EAD para espécies de distribuição simpátrica e alopatrica (Tabela 2).

Identificou-se que todos os autores usaram termos diferentes para nomear os semioquímicos vestigiais, incluindo feromônios candidatos nas contribuições de Stringer *et al.* (2017), Renyard *et al.* (2019) e Chalisserly *et al.* (2021); diferentemente de Hamilton *et al.* (2018), que usaram feromônios putativos derivados de extratos do gênero *Cyphomyrmex* (Tabela 2).



A direção dos bioensaios foi com estruturas físicas de várias formas e dimensões, às quais foram aplicados compostos químicos de concentrações únicas ou diferentes (extratos e até mesmo feromônios sintéticos) para simular o seguimento de trilhas em trilhas com e sem recompensa. Por exemplo, Chalissery *et al.* (2019) usaram estruturas circulares, Chalissery *et al.* (2021) labirintos em forma de V, Renyard *et al.* (2019) estrutura circular e labirintos em forma de V e Y. Os outros projetos foram em andaimes ou passarelas em linha reta, como Nakamura *et al.* (2019), e até mesmo alguns projetos híbridos, como Stringer *et al.* (2017) com fio de algodão em linha reta e Xu *et al.* (2021) que usaram caminhos retos colocados em placas de Petri (Tabela 2). A revisão identificou que as formigas responderam aos compostos químicos residuais de seus próprios feromônios, mas também aos de outras espécies (Chalissery *et al.*, 2019). Nas metodologias de identificação de traços de voláteis, Chalissery *et al.* (2019), Nakamura *et al.* (2019) e Stringer *et al.* (2017) usaram padrões comerciais, representando 19 % do total de compostos químicos caracterizados (Tabela 3). As pesquisas de Renyard *et al.* (2019), Chalissery *et al.* (2021) e Xu *et al.* (2021) sintetizaram seus próprios padrões. Enquanto outros autores os obtiveram externamente de outros pesquisadores ou usaram padrões comerciais, mas não forneceram especificações de marcas registradas ou patentes (Tabela 3).

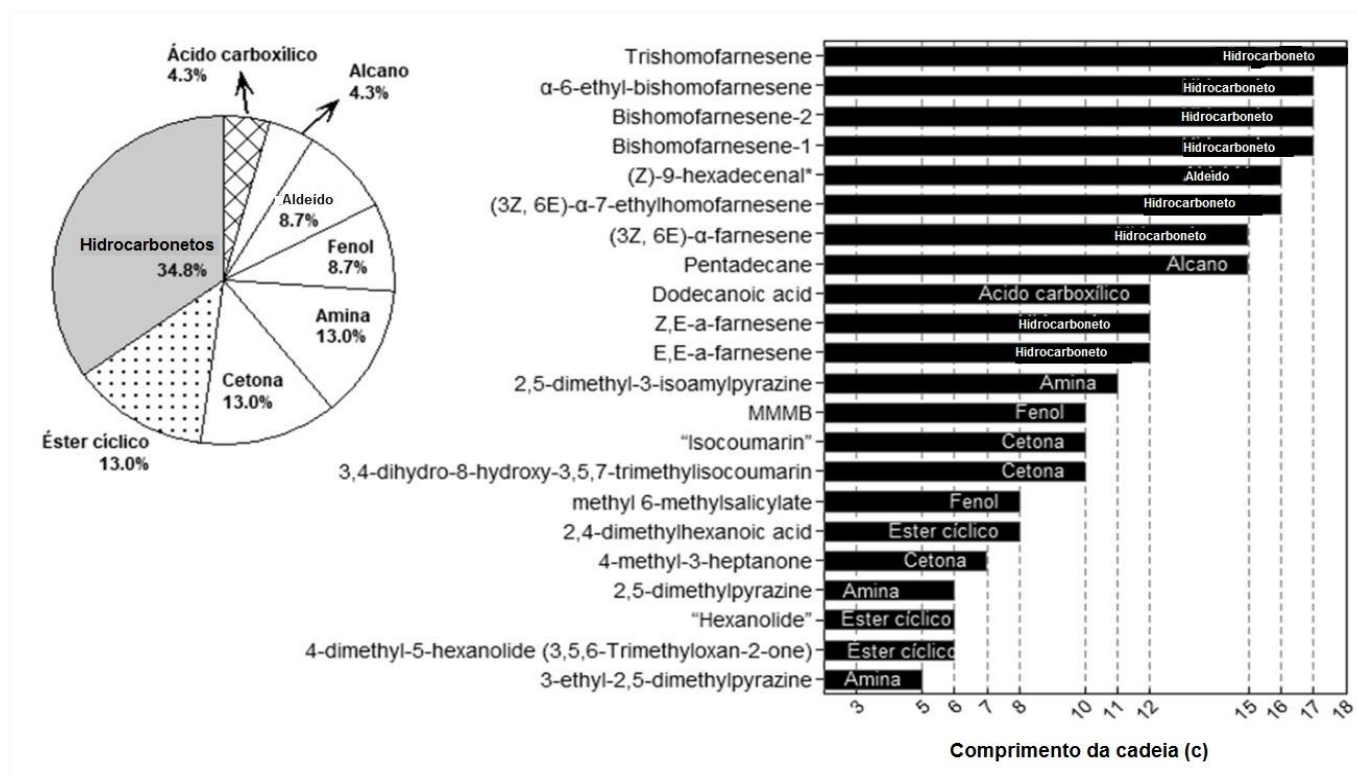
Tabela 3. Padrões usados para a síntese de compostos químicos residuais

Referência	Semioquímicos identificados	Padrão
Chalissery <i>et al.</i> (2021)	MMMB	Padrão interno sintetizado pelos autores
Chalissery <i>et al.</i> (2019)	i) "Hexanolide" ii) "Isocoumarin" iii) 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine iv) 2,5-dimethylpyrazine v) 4-methyl-3-heptanone vi) (Z)-9-hexadecenal	i,ii) Síntese de extratos do intestino grosso de <i>Camponotus modoc</i> (Renyard <i>et al.</i> , 2019) iii) Acros Organics, New Jersey, USA iv) Aldrich Chem Co. Milwau, USA v) Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA vi) Sigma-Aldrich
Hamilton <i>et al.</i> (2018)	i) 2,5-dimethyl-3-isoamylpyrazine Feromonas punitivas de rastros: ii) (3Z, 6E)- α -farnesene iii) (3Z, 6E)- α -7-ethylhomofarnesene iv) α -6-ethyl-bishomofarnesene v) Bishomofarnesene-2 vi) Bishomofarnesene-1 vii) Trishomofarnesene	Comparação direta com produtos comerciais*.
Nakamura <i>et al.</i> (2019)	Methyl 6-methylsalicylate	Padrão externo fornecido por Shigeru Matsuyama. Universidade de Tsukuba, Tsukuba, Japão
Renyard <i>et al.</i> (2019)	i) 2,4-dimethylhexanoic acid ii) 2,4-dimethyl-5-hexanolide (3,5,6-Trimethyloxan-2-one) iii) Pentadecane iv) Dodecanoic acid v) 3,4-dihydro-8-hydroxy-3,5,7-trimethylisocoumarin	Padrões internos conforme sintetizados pelos autores
Stringer <i>et al.</i> (2017)	(Z)-9-hexadecenal	Bedoukian Research, Danbury, CT, USA.
Xu <i>et al.</i> (2021)	Z,E-a-farnesene E,E-a-farnesene	Padrões internos sintetizados pelos autores.

* Eles não especificam, mas mencionam que as comparações iniciais foram feitas com a base de dados de espectros de massa do NIST, V.2 e espectros publicados na literatura



O feromônio do grupo funcional amina 3-etil-2,5-dimetilpirazina foi a cadeia mais curta (C05), usada em experimentos com *Myrmica rubra* (Chalissery *et al.*, 2019). Em contrapartida, o hidrocarboneto de cadeia mais longa foi o Trishomofarneseno nos bioensaios com *Cyphomyrmex rimosus* e *Cyphomyrmex salvini* (C18) (Hamilton *et al.*, 2018) (Figura 1). Os compostos orgânicos mais usados foram hidrocarbonetos com cadeias de C12, C15, C16, C17 e C18, representando 34,8 %, seguidos por ésteres cíclicos e cetonas (C06, C08 e C07, C10) com 13 % (Figura 1).



Fonte: Elaboração própria com dados obtidos de artigos analisados com a declaração PRISMA

Figura 1. Identificação de grupos funcionais de compostos químicos residuais

Hexanolide" foi relatado para *Camponotus modoc* (Chalissery *et al.*, 2019; Renyard *et al.*, 2019), um composto que possivelmente nunca foi relatado para a espécie antes. No entanto, esse semioquímico foi identificado em outras espécies de formigas do mesmo gênero (*Camponotus socius*, *C. pennsylvanicus* e *C. vagus*) na configuração quiral (2S,4R,5S)-2,4-Dimetil-5-hexanolida em experimentos de biossíntese de feromônio de traços usando testes eletrofisiológicos e comportamentais (Bestmann *et al.*, 1999).



DISCUSSÃO

No momento, é possível que não haja revisões sistemáticas que tenham usado a declaração PRISMA para relatar semioquímicos de rastros de formigas como o desenvolvido neste estudo, portanto, essa síntese de conhecimento sobre diferentes características dos semioquímicos relatados em várias publicações é importante. As 14 espécies de Formicida estudadas têm diversas categorias de distribuição geográfica (nativas, exóticas, introduzidas etc.) (Janicki *et al.*, 2016), com destaque para: *Linepithema humile* e *Solenopsis invicta* como formigas introduzidas e/ou exóticas; que invadiram quase todos os continentes, causaram danos aos ecossistemas e perdas econômicas aos seres humanos (Angulo *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020; Seko *et al.*, 2021).

Uma alternativa no controle de formigas-praga é o uso de feromônios, que foi mencionado em cinco estudos. Três deles por meio do uso de iscas letais (Chalissery *et al.*, 2019; Renyard *et al.*, 2019; Chalissery *et al.*, 2021) e dois com a interrupção da comunicação de trilhas pelo aumento da concentração de feromônio (Stringer *et al.*, 2017; Nakamura *et al.*, 2019). O controle de espécies invasoras com iscas e feromônios é uma prática recente, por exemplo, Welzel & Choe (2016) usam hidrogel adicionando (Z)-9-hexadecenal e inseticidas para o controle de formigas argentinas, uma estratégia que parece ser mais eficaz com iscas assistidas por feromônios em comparação com iscas de contato residual, como sprays, grânulos e outros líquidos (Suiter *et al.*, 2021). Essa tática também foi usada com a formiga-de-fogo invasora *Myrmica rubra*, causando mortalidade significativa ao transportar e compartilhar alimentos adicionados de inseticidas dentro da colônia (Hoefele *et al.*, 2021).

Nem todas as pesquisas mencionaram o controle de formigas por meio de semioquímicos como um método direto. Por exemplo, Xu *et al.* (2021) analisaram uma relação ecológica, por meio de um bioensaio, para verificar se o rastro de feromônio de *Solenopsis invicta* pode impactar a dinâmica populacional de *Aphis gossypii*. Eles mostram uma relação mutualística positiva entre esses dois insetos com uma ampla distribuição geográfica e como a formiga-de-fogo vermelha exerce controle sobre a reprodução e a dispersão do hemíptero áptero. Esse tipo de relação ecológica foi investigado entre a cochonilha *Planococcus citri* e a formiga *Lasius grandis*, que, ao introduzir uma alimentação alternada de açúcar, diminuiu o cuidado com o inseto presa e, conseqüentemente, aumentou a infestação da cochonilha num pomar de cítricos (laranjeiras da cultivar Navel Powell) (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2021).

As formigas são amplamente utilizadas para o controle biológico de outros insetos-praga em culturas agrícolas e florestais. É o caso da *Wasmannia auropunctata* em um sistema agroflorestal de café, que reduziu a sobrevivência de *Hypothenemus hampei* dentro dos frutos e, com efeito pouco significativo, a *Solenopsis invicta* depredou brocas adultas de



H. hampei fora dos frutos (Newson *et al.*, 2021). A etologia e a comunicação química dos formicídeos permitiram o desenvolvimento do controle biológico da mosca-das-frutas *Bacterocera zonata* que ataca as mangas *Chaunsa*, expondo as frutas a sinais químicos de uma colônia de formigas e impedindo a oviposição da *B. zonata* (Rimsha *et al.*, 2019). Em outra contribuição, com sete espécies de formigas (cinco gêneros; *Camponotus*, *Pheidole*, *Oecophylla*, *Brachyponera* e *Megaponer*), eles investigaram a predação de larvas de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) em plantações de milho em campos sem tratamento com inseticida, provando ser um método de controle potencialmente útil para *S. frugiperda* (Dassou *et al.*, 2021). Atualmente, relativamente poucos feromônios são relatados para serem rastreados em trilhas de formigas (Czaczkas, 2018). Nesta pesquisa, (Z)-9-hexadecenal foi identificado em duas contribuições (Chalissery *et al.*, 2019; Stringer *et al.*, 2017), esse composto e seus análogos feromonais são de particular interesse no manejo integrado de insetos de diferentes ordens, particularmente na interrupção do acasalamento (Rizvi *et al.*, 2021).

Na revisão realizada neste trabalho, observou-se uma grande semelhança na escolha de metodologias para a detecção, identificação e produção de traços de semioquímicos, porém, houve uma grande variabilidade de resultados. Essa tendência pode ser devida à biologia e à ecologia das espécies de formigas estudadas, às fontes de extração do feromônio (partes do corpo) e aos diferentes métodos nos bioensaios. O uso de GC-MS utilizado na síntese de compostos químicos, apesar de ser a metodologia mais recorrente, apresentou diferenças nos solventes utilizados para a preparação dos extratos, nas características das colunas (afinidade polar) e no uso de metabolômica direcionada e não direcionada. A identificação de grupos funcionais úteis nos artigos analisados e sua derivatização (síntese) para íons moleculares significativos (Attygalle *et al.*, 1998), aparentemente, dependeu do diagnóstico do pico cromatográfico (m/z), mas também das fontes de emissão dos semioquímicos, que foram por meio de extratos de diferentes partes do corpo dos artrópodes.

Quatro espécies de formigas invasoras de alto risco (*Linepithema humile*, *Nylanderia fulva*, *Solenopsis invicta* e *Pheidole megacephala*) foram identificadas no México (Rosas-Mejía & Milan, 2017). Os resultados dessa revisão podem ser usados para a criação de compostos feromonais sintéticos e marcar caminhos artificiais que guiem as formigas para iscas letais ou funcionem como um perturbador desse comportamento. Esses voláteis podem ser extraídos de várias partes do corpo da formiga (glândulas, gáster, cabeça, tórax etc.), caracterizados por meio de técnicas cromatográficas ou eletroantenográficas (até mesmo combinando as duas tecnologias) e testados quanto à sua eficácia por meio de bioensaios. O mencionado acima fortalece o conhecimento dos semioquímicos de traços de formigas e apoia a tomada de decisões para o controle e/ou erradicação de espécies consideradas pragas.



CONCLUSÕES

Em todos os artigos analisados, a síntese de feromônio por meio de extratos mostrou-se eficaz nas famílias Myrmicinae, Formicinae e Dolichoderinae, sendo o grupo funcional mais proeminente os hidrocarbonetos de cadeia longa (C12: C18); em todos os bioensaios, as formigas responderam aos compostos químicos marcados nas trilhas. A identificação e a síntese de traços de semioquímicos permanecem por meio de respostas eletrofisiológicas dos himenópteros e cromatografia gasosa combinada com espectrometria de massa. O uso de labirintos tradicionais foi destacado para a realização de experimentos de acompanhamento de trilhas; no entanto, cada vez mais projetos inovadores e o uso de tecnologia, como câmeras e software de contagem de formigas, estão sendo usados para evitar que a decisão de seguir ou não um caminho através dos Formídeos influencie os resultados.

A visão geral do uso de semioquímicos de traços tem grande potencial para o controle de espécies de formigas invasoras, pois elas não só conseguem seguir suas próprias trilhas, mas também as de outras espécies de Formídeos. As formigas são um grupo muito diversificado, e muitos dos produtos químicos que regulam seu comportamento e como eles podem ser usados em outros grupos taxonômicos ainda não foram descobertos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia (CONACYT) pela bolsa concedida para a estadia de pós-doutorado na Coordenação de Inovação e Aplicação de Ciência e Tecnologia (CIACyT), Universidade Autônoma de San Luis Potosí.

LITERATURA CITADA

ANGULO E, Hoffmann BD, Ballesteros-Mejia L, Taheri A, Balzani P, Bang A, Renault D, Cordonnier M, Bellard C, Diagne C, Ahmed DA, Watari Y, Courchamp F. 2022. Economic costs of invasive alien ants worldwide. *Biological Invasions*. ISSN: 1387-3547. <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02791-w>

ATTYGALLE AB, Mutti A, Rohe W, Maschwitz U, Garbe W, Bestmann HJ. 1998. Trail Pheromone from the Pavan Gland of the Ant *Dolichoderus thoracicus* (Smith) Pheromones. *Naturwissenschaften*. 85: 275-277. ISSN: 1432-1904. <https://doi.org/10.1007/s001140050498>



AZHAGU RR, Sathish R, Prakasam A, Krishnamoorthy D, Balachandar M. 2017. Diversity and distribution of Ant species (Hymenoptera: Formicidae), in Pachaiyappa's College, Kanchipuram, Tamil Nadu, India. *J Entomol Zool Stud.* 5(1): 459-464. ISSN: 2320-7078. <https://www.entomoljournal.com/archives/?year=2017&vol=5&issue=1&ArticleId=1501>

BESTMANN HJ, Liepold B, Kress A, Hofmann A. 1999, (2S,4R,5S)-2,4-Dimethyl-5-hexanolide: Ants of Different Species *Camponotus* Can Distinguish the Absolute Configuration of Their Trail Pheromone. *Chemistry A European Journal.* 5: 2984-2989. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3765\(19991001\)5:10<2984::AID-CHEM2984>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3765(19991001)5:10<2984::AID-CHEM2984>3.0.CO;2-8)

BILLEN J, Chung-Chi L, Esteves FA. 2020. Novel exocrine glands in the foreleg coxae of *Discothyrea* ants. *Arthropod Structure & Development.* 59: 165-174. ISSN 1467-8039. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2020.100981>

BOLOGNA A, Toffin E, Detrain C, Campo A. 2017. An automated method for large-scale monitoring of seed dispersal by ants. *Scientific Reports.* 7(1):1-12. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/srep40143>

CARVALHO RL, Andersen AN, Anjos DV, Pacheco R, Chagas L, Vasconcelos HL. 2020. Understanding what bioindicators are actually indicating: Linking disturbance responses to ecological traits of dung beetles and ants. *Ecological Indicators.* 108: 105764. ISSN: 1470-160X. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105764>

CASIMIRO MS, Sansevero JBB, Queiroz JM. 2019. What can ants tell us about ecological restoration? A global meta-analysis. *Ecological Indicators.* 102: 593-598. ISSN: 1470160X. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.018>

CERDÁ X, Oudenhove VL, Bernstein C, Boulay RR. 2014. A list of and some comments about the trail pheromones of ants. *Natural Product Communications.* 9(8): 1115-1122. ISSN: 1555-9475. <https://doi.org/10.1177/1934578X1400900813>

CHALISSERY JM, Gries R, Alamsetti SK, Ardiel MJ, Gries G. 2021. Identification of the Trail Pheromone of the Pavement Ant *Tetramorium immigrans* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Chemical Ecology.* 48(3): 302-311. ISSN: 0098-0331. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01317-3>

CHALISSERY JM, Renyard A, Gries R, Hoefele D, Alamsetti SK, Gries G. 2019. Ants Sense, and Follow, Trail Pheromones of Ant Community Members. *Insects.* 10(11): 1-11. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects10110383>



CHEN S, Ding F, Hao M, Jiang D. 2020. Mapping the Potential Global Distribution of Red Imported Fire Ant (*Solenopsis invicta* Buren) Based on a Machine Learning Method. *Sustainability*. 12(23): 1-13. ISSN: 2071-1050. <https://doi.org/10.3390/su122310182>

CRISTÍN J, Bartumeus F, Méndez V, Campos D. 2020. Occupancy patterns in superorganisms: a spin-glass approach to ant exploration. *Royal Society Open Science*. 7(12): 1-16. ISSN: 2054-5703. <https://doi.org/10.1098/rsos.201250>

CSŐSZ S, Báthori F, Gallé L, Lőrinczi G, Maák I, Tartally A, Kovács É, Somogyi AA, Markó B. 2021. The Myrmecofauna (Hymenoptera: Formicidae) of Hungary: Survey of Ant Species with an Annotated Synonymic Inventory. *Insects*. 12(1): 1-14. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects12010078>

CZACZKES TJ. 2018. Using T- and Y-mazes in myrmecology and elsewhere: a practical guide. *Insectes Sociaux*. 65(2):213-224. ISSN: 0020-1812. <https://doi.org/10.1007/s00040-018-0621-z>

D'ETTORRE P, Deisig N, Sandoz JC. 2017. Decoding ants' olfactory system sheds light on the evolution of social communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114(34):8911-8913. ISSN: 0027-8424. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711075114>

DASSOU AG, Idohou R, Azandémè-Hounmalon GY, Sabi-Sabi A, Houndété J, Silvie P, Dansi A. 2021. Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) in maize cropping systems in Benin: abundance, damage, predatory ants and potential control. *International Journal of Tropical Insect Science*. 41(4): 2627-2636. ISSN: 1742-7592. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00443-5>

DE ALMEIDA T, Mesléard F, Santonja M, Gros R, Dutoit T, Blight, O. 2020. Above- and below-ground effects of an ecosystem engineer ant in Mediterranean dry grasslands. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 287(1935): 1-10. ISSN: 0962-8452. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.1840>

DE GASPERIN O, Blacher P, Grasso G, Chapuisat M. 2020. Winter is coming: harsh environments limit independent reproduction of cooperative-breeding queens in a socially polymorphic ant. *Biology Letters*. 16(1): 1-5. ISSN: 1744-9561. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0730>



DIAMÉ L, Rey JY, Vayssières, JF, Grechi I, Chailleux A, Diarra K. 2018. Ants: Major Functional Elements in Fruit Agro-Ecosystems and Biological Control Agents. *Sustainability*. 10(2): 1-18. ISSN: 2071-1050. <https://doi.org/10.3390/su10010023>

DU Y, Grodowitz MJ, Chen J. 2019. Electrophysiological Responses of Eighteen Species of Insects to Fire Ant Alarm Pheromone. *Insects*. 10(11): 1-15. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects10110403>

ESCÁRRAGA M, Guerrero R. (2014). Hormigas. Un mundo de Meñiques gigantes. *INFOZOA. Boletín de Zoología*. 4: 1–16. ISSN: 2346-1837. <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/infozoa/issue/view/205>

EUBANKS MD, Lin C, Tarone AM. 2019. The role of ants in vertebrate carrion decomposition. *Food Webs*. 18: e00109 ISSN: 2352-2496. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2018.e00109>

FORBES SJ, Northfield TD. 2017. *Oecophylla smaragdina* ants provide pest control in Australian cacao. *Biotropica*. 49(3): 328–336. ISSN: 00063606. <https://doi.org/10.1111/btp.12405>

FOX EGP, Adams RMM. 2022. On the Biological Diversity of Ant Alkaloids. *Annual Review of Entomology*. 67(1):367-385. ISSN: 1545-4487. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-072821-063525>

GE J, Ge Z, Zhu D, Wang X. 2020. Pheromonal Regulation of the Reproductive Division of Labor in Social Insects. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 8: 1-9. ISSN: 2296-634X. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00837>

GORDON DM. 2021. Movement, Encounter Rate, and Collective Behavior in Ant Colonies. *Annals of the Entomological Society of America*. 114(5): 541-546. ISSN: 0013-8746. <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa036>

GUÉNARD B, Weiser MD, Gómez K, Narula N, Economo EP. 2017. The Global Ant Biodiversity Informatics (GABI) database: synthesizing data on the geographic distribution of ant species (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*. 24: 83-89. ISSN: 1994-4136. https://doi.org/10.25849/myrmecol.news_024:083



HAKALA SM, Seppä P, Helanterä H. 2019. Evolution of dispersal in ants (Hymenoptera: Formicidae): a review on the dispersal strategies of sessile superorganisms. *Myrmecological News*. 29: 35-55. ISSN: 1997-3500.

https://doi.org/10.25849/myrmecol.news_029:035

HAMILTON N, Jones TH, Shik JZ, Wall B, Schultz TR, Blair H.A, Adams RMM. 2018. Context is everything: mapping Cyphomyrmex-derived compounds to the fungus-growing ant phylogeny. *Chemoecology*. 28(4-5): 137-144. ISSN: 0937-7409.

<https://doi.org/10.1007/s00049-018-0265-5>

HEFETZ A. 2019. The critical role of primer pheromones in maintaining insect sociality. *Zeitschrift Für Naturforschung C*. 74(9-10): 221-231. ISSN: 1865-7125.

<https://doi.org/10.1515/znc-2018-0224>

HOEFELE D, Chalissery JM, Renyard A, Gries G. 2021. Experimentally guided development of a food bait for European fire ants. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 169(9): 780-791. ISSN: 0013-8703. <https://doi.org/10.1111/eea.13053>

HÖLLDOBLER B. 2019. "Chemical Communication in Ants: New Exocrine Glands and Their Behavioral Function". In: M. D. Breed, C. D. Michener, E. Evans, *The Biology of Social Insects*. New York, United States of America: Taylor & Francis Group. ISBN: 9780429309113. <https://doi.org/10.1201/9780429309113>

HU L, Balusu RR, Zhang WQ, Ajayi OS, Lu YY, Zeng RS, ... Chen L. 2018. Intra- and inter-specific variation in alarm pheromone produced by *Solenopsis* fire ants. *Bulletin of Entomological Research*. 108(5): 667-673. ISSN: 0007-4853.

<https://doi.org/10.1017/S0007485317001201>

HUBER JT. 2017. Biodiversity of Hymenoptera. In: Footitt RG, Adler PH, *Insect Biodiversity*. Pp. 419-461. John Wiley & Sons. ISBN:9781118945568.

<https://doi.org/10.1002/9781118945568.ch12>

JANICKI J, Narula N, Ziegler M, Guénard B, Economo E.P. 2016. Visualizing and interacting with large-volume biodiversity data using client-server web-mapping applications: The design and implementation of antmaps.org. *Ecological Informatics*. 32: 185-193. ISSN: 15749541. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.02.006>

JÍLKOVÁ V, Jandová K, Vacířová A, Kukla J. 2020. Gradients of labile carbon inputs into the soil surrounding wood ant nests in a temperate forest. *Biology and Fertility of Soils*. 56(1): 69-79. ISSN: 0178-2762. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01402-6>



KLEEBERG I, Menzel F, Foitzik S. 2017. The influence of slavemaking lifestyle, caste and sex on chemical profiles in *Temnothorax* ants: insights into the evolution of cuticular hydrocarbons. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 284(1850), 20162249. ISSN: 0962-8452. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2249>

KOLAY S, Boulay R, D'Ettorre P. 2020. Regulation of Ant Foraging: A Review of the Role of Information Use and Personality. *Frontiers in Psychology*. 11: 1-7. ISSN: 1664-1078. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00734>

LEITE PAM, Carvalho MC, Wilcox BP. 2018. Good ant, bad ant? Soil engineering by ants in the Brazilian Caatinga differs by species. *Geoderma*. 323: 65-73. ISSN: 00167061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.040>

LESSARD JP. 2019. Ant community response to disturbance: A global synthesis. *Journal of Animal Ecology*. 88(3): 346-349. ISSN: 00218790. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12958>

LI TC, Shao MA, Jia YH, Jia XX, Huang LM, Gan M. 2019. Small-scale observation on the effects of burrowing activities of ants on soil hydraulic processes. *European Journal of Soil Science*. 70(2): 236-244. ISSN: 1351-0754: <https://doi.org/10.1111/ejss.12748>

MORGAN ED. 2009. Trail pheromones of ants. *Physiological Entomology*. 34(1):1-17. ISSN: 1365-3032. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2008.00658.x>

NAKAMURA T, Harada K, Akino T. 2019. Identification of methyl 6-methylsalicylate as the trail pheromone of the Japanese pavement ant *Tetramorium tsushimae* (Hymenoptera: Formicidae). *Applied Entomology and Zoology*. 54(3): 297-305. ISSN: 0003-6862. <https://doi.org/10.1007/s13355-019-00626-0>

NEWSON J, Vandermeer J, Perfecto I. 2021. Differential effects of ants as biological control of the coffee berry borer in Puerto Rico. *Biological Control*. 160: 104666. ISSN: 10499644. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104666>

OBERPRIELER SK, Andersen AN. 2020. The importance of sampling intensity when assessing ecosystem restoration: ants as bioindicators in northern Australia. *Restoration Ecology*. 28(4): 737-741. ISSN: 1061-2971. <https://doi.org/10.1111/rec.13172>

OKRUTNIAK M, Grześ IM. 2021. Accumulation of metals in *Lasius niger*. Implications for using ants as bioindicators. *Environmental Pollution*. 268, e115824. ISSN: 02697491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115824>



ORTIZ DP, Elizalde L, Pirk GI. 2021. Role of ants as dispersers of native and exotic seeds in an understudied dryland. *Ecological Entomology*. 46(3): 626-636. ISSN: 0307-6946. <https://doi.org/10.1111/een.13010>

ORTIZ-ALVARADO Y, Fernández-Casas R, Ortiz-Alvarado CA, Diaz-Iglesias E, Rivera-Marchand B. 2021. Behavioral flexibility in *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Insect Science*. 21(4): 1-8 ISSN: 1536-2442. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab059>

O'SHEA-WHELLER TA, Hunt ER, Sasaki T. 2021. Functional Heterogeneity in Superorganisms: Emerging Trends and Concepts. *Annals of the Entomological Society of America*. 114(5): 562-574. ISSN: 0013-8746. <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa039>

OUATTARA K, Yeo K, Kouakou LMM, Kone M, Dekoninck W, Konate, S. 2021. Influence of ant-grass association on soil microbial activity through organic matter decomposition dynamics in Lamto savannah (Côte d'Ivoire). *African Journal of Ecology*. 59(4): 1023-1032. ISSN: 0141-6707. <https://doi.org/10.1111/aje.12894>

PAGE MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald E, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, Moher D. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 71: 1-9. ISSN: 1756-1833. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

PASK GM, Slone JD, Millar JG, Das P, Moreira JA, Zhou X, Bello J, Berger SL, Bonasio R, Desplan C, Reinberg D, Liebig J, Zwiebel LJ, Ray A. 2017. Specialized odorant receptors in social insects that detect cuticular hydrocarbon cues and candidate pheromones. *Nature Communications*. 8(1):297. ISSN: 2041-1723. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00099-1>

PÉREZ-RODRÍGUEZ J, Pekas A, Tena A, Wäckers FL. 2021. Sugar provisioning for ants enhances biological control of mealybugs in citrus. *Biological Control*. 157: 1-8. ISSN: 10499644. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104573>

PINO MORENO JM, Blasquez JR-E. 2021. Taxonomic Analysis of Some Edible Insects From the State of Michoacán, Mexico. *Frontiers in Veterinary Science*. 8: 1-10. ISSN: 2297-1769. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.629194>



RENYARD A, Alamsetti SK, Gries R, Munoz A, Gries G. 2019. Identification of the Trail Pheromone of the Carpenter Ant *Camponotus modoc*. *Journal of Chemical Ecology*. 45(11-12): 901-913. ISSN: 0098-0331. <https://doi.org/10.1007/s10886-019-01114-z>

RETHLEFSEN ML, Kirtley S, Waffenschmidt S, Ayala AP, Moher D, Page MJ, Koffel JB. 2021. PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews. *Systematic Reviews*. 10(1): 1-19. ISSN: 2046-4053. <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z>

RIBBENSTEDT A, Ziarrusta H, Benskin JP. 2018. Development, characterization and comparisons of targeted and non-targeted metabolomics methods. *PLOS ONE*. 13(11): 1-18. ISSN: 1932-6203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207082>

RIMSHA T, Zarnab F, Mirza AQ, Shafqat S, Muqarrab A. 2019. Oviposition Deterrence of Fruit fly in Treated Mangoes with Ant cues and Fungus *B. bassiana*. *Agric. Sci. J.* 1(1):48-57. ISSN: 2707-9724. <https://asj.mnsuam.edu.pk/index.php/asj/article/view/27>

RIZVI SAH, George J, Reddy GVP, Zeng X, Guerrero A. 2021. Latest Developments in Insect Sex Pheromone Research and Its Application in Agricultural Pest Management. *Insects*. 12(6): 1-26. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects12060484>

ROSAS-MEJÍA M, Janda M. 2017. Informe y análisis de riesgo para las hormigas: argentina (*Linepithema humile*), loca (*Paratrechina fulva*), roja de fuego (*Solenopsis invicta*) y cabezona (*Pheidole megacephala*) y protocolo de Análisis de riesgo para hormigas exóticas para México. Informe entregado a la CONABIO y al PNUD en el marco del proyecto GEF 083999. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/proyecto/resultados-componente-I>

SARKIS-ONOFRE R, Catalá-López F, Aromataris E, Lockwood C. 2021. How to properly use the PRISMA Statement. *Systematic Reviews*. 10(1): 1-3. ISSN: 2046-4053. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>

SEKO Y, Hashimoto K, Koba K, Hayasaka D, Sawahata T. 2021. Intraspecific differences in the invasion success of the Argentine ant *Linepithema humile* Mayr are associated with diet breadth. *Scientific Reports*. 11(1): 1-10. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82464-1>

STORK NE. 2018. How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth? *Annual Review of Entomology*. 63(1): 31-45. ISSN: 0066-4170. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043348>



STRINGER LD, Corn JE, Sik RH, Jiménez-Pérez A, Manning LA M, Harper AR, Suckling DM. 2017. Thigmotaxis Mediates Trail Odour Disruption. *Scientific Reports*. 7(1): 1-8. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01958-z>

STÜBER M, Tack AJM, Zewdie B, Mendesil E, Shimaes T, Ayalew B, ... Hylander K. 2021. Multi-scale mosaics in top-down pest control by ants from natural coffee forests to plantations. *Ecology*. 102(7): 1-8. ISSN: 0012-9658. <https://doi.org/10.1002/ecy.3376>

SUITER DR, Gochnour BM, Holloway JB, Vail KM. 2021. Alternative Methods of Ant (Hymenoptera: Formicidae) Control with Emphasis on the Argentine Ant, *Linepithema humile*. *Insects*. 12(6): 1-13. ISSN: 2075-4450. <https://doi.org/10.3390/insects12060487>

SWANSON AC, Schwendenmann L, Allen MF, Aronson EL, Artavia-León A, Dierick D, Fernández-Bo AS, Harmon TS, Murillo-Cruz C, Oberbauer SF, Pinto-Tomás AA, Rundel PW, Zelikova TJ. 2019. Welcome to the Atta world: A framework for understanding the effects of leaf-cutter ants on ecosystem functions. *Functional Ecology*. 33(8): 1386-1399. ISSN: 0269-8463. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13319>

TAY JW, Choe DH, Mulchandani A, Rust MK. 2020. Hydrogels: From Controlled Release to a New Bait Delivery for Insect Pest Management. *Journal of Economic Entomology*. 113(5): 2061-2068. ISSN: 0022-0493. <https://doi.org/10.1093/jee/toaa183>

THURMAN JH, Northfield T D, Snyder WE. 2019. Weaver Ants Provide Ecosystem Services to Tropical Tree Crops. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 7: 1-9. ISSN: 2296-701X. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00120>

TIBCHERANI M, Nacagava VAF, Aranda R, Mello RL. 2018. Review of Ants (Hymenoptera: Formicidae) as bioindicators in the Brazilian Savanna. *Sociobiology*. 65(2): 112-129. ISSN: 2447-8067. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v65i2.2048>

TRIGOS-PERAL G, Juhász O, Kiss PJ, Módra G, Tenyér A, Maák I 2021. Wood ants as biological control of the forest pest beetles *Ips* spp. *Scientific Reports*. 11(1): 1-10. ISSN: 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96990-5>

VANDER MEER RK, Alonso LE. 2019. "Pheromone Directed Behavior in Ants". In: Vander Meer RK, Breed MD, Espelie KE, Winston ML, *Pheromone Communication in Social Insects*. New York, United States of America: Taylor & Francis Group. Pp. 158-192. ISBN: 9780429301575. <https://doi.org/10.1201/9780429301575>



WELZEL KF, Choe DH. 2016. Development of a Pheromone-Assisted Baiting Technique for Argentine Ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*. 109(3): 1303-1309. ISSN: 0022-0493. <https://doi.org/10.1093/jee/tow015>

WILLS BD, Landis DA. 2018. The role of ants in north temperate grasslands: a review. *Oecologia*. 186(2): 323-338. ISSN: 0029-8549. <https://doi.org/10.1007/s00442-017-4007-0>

WYATT TD. 2017. Pheromones. *Current Biology*. 27(15): 739-743. ISSN: 09609822. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.06.039>

XU T, Xu M, Lu Y, Zhang W, Sun J, Zeng R, Ted CJ, Chen L. 2021. A trail pheromone mediates the mutualism between ants and aphids. *Current Biology*. 31(21): 4738-4747. ISSN: 09609822. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.08.032>

ZHONG Z, Li X, Sanders D, Liu Y, Wang L, Ortega YK, ... Wang D. 2021. Soil engineering by ants facilitates plant compensation for large herbivore removal of aboveground biomass. *Ecology*. 102(5): 1-11. ISSN: 0012-9658. <https://doi.org/10.1002/ecy.3312>

[Errata Erratum](#)

<https://abanicoacademico.mx/revistasabanico-version-nueva/index.php/abanico-veterinario/errata>