



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**DETECCIÓN Y MONITOREO ACÚSTICO EN INSECTOS DE
IMPORTANCIA ECONÓMICA PARA AGRICULTURA Y
ENTOMOLOGÍA URBANA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA
CUALITATIVA**

Tesis/AFE para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado
de Magíster en Ciencias Agropecuarias

BRYAN EVERT

Director de Tesis/AFE
Tomislav Curkovic

Profesores consejeros
Amanda Huerta
Luis Sazo

SANTIAGO – CHILE
2022

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**DETECCIÓN Y MONITOREO ACÚSTICO EN INSECTOS DE IMPORTANCIA
ECONÓMICA PARA AGRICULTURA Y ENTOMOLOGÍA URBANA: UNA
REVISIÓN SISTEMÁTICA CUALITATIVA**

Tesis/AFE presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias.

BRYAN EVERT

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
DIRECTOR DE TESIS/AFE		
Tomislav Curkovic	6,7	6,7
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.		
PROFESORES CONSEJEROS		
Amanda Huerta	7,0	7,0
Ingeniera Forestal, Dr.		
Luis Sazo	6,9	6,9
Ingeniero Agrónomo.		

Santiago, Chile
2022

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a mi profesor guía por depositar su confianza en mí y permitirme aventurar en un campo del conocimiento aún inexplorado.

Agradezco también el inconmensurable e incondicional apoyo brindado por mis padres, hermanos y mascotas, como también el proveniente de familiares y amigos durante todo este proceso.

Quisiera resaltar el poder de las decisiones y elecciones: pese a que existen ciencias y filosofías que ahondan con rigurosidad y parsimonia en la influencia que pueden llegar a tener factores tales como el entorno, idioma, cultura, contexto y determinismo sobre la configuración de nuestros pensamientos, no puedo más que enaltecer el esfuerzo y sacrificio de aquellas personas que han dedicado, dedican y dedicarán sus vidas a hacer de esta realidad, un lugar mejor.

Doy gracias al caos, al azar y la incertidumbre: si bien las sociedades avanzan, y las ciencias se complejizan en pro del bienestar de la humanidad y el progreso, es mucho aquello que aún yace ignorado, y que, sin embargo, de manera inexorable sirve de motor y llama imperecedera para la motivación de los habitantes de este conspicuo pequeño planeta inmerso en el impredecible infinito.

Finalmente, agradezco a la Universidad de Chile como “ecosistema” promotor y catalizador de bienestar común, lógica y racionalidad, que no tan solo me ha brindado un abanico de oportunidades y herramientas para mi auto construcción y la de incontables generaciones, sino que también ha sido mi hogar por más de un lustro.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
III. MÉTODOS	4
3.1. Criterios de inclusión	4
3.2. Criterios de exclusión	4
3.3. Metodología de análisis	5
IV. RESULTADOS	6
V. DISCUSIÓN	15
5.1. Orden Coleoptera	15
5.1.1. Familia Curculionidae	15
5.1.2. Familia Scarabaeidae	18
5.1.3. Familia Bostrichidae	20
5.1.4. Familia Cerambycidae	21
5.1.5. Familia Ptinidae (Anobiidae)	23
5.1.6. Familia Buprestidae	24
5.1.7. Familia Chrysomelidae	24
5.2. Orden Blattodea	25
5.3. Orden Hemiptera	25
5.4. Orden Hymenoptera	26
5.5. Orden Lepidoptera	26
5.6. Orden Diptera	26
5.7. Antecedentes generales en la detección acústica de insectos	27
VI. CONCLUSIONES	29
VII. REFERENCIAS	31
APÉNDICE A: Glosario Técnico	38
APÉNDICE B: Cuadros y Figuras	41
APÉNDICE C: Resumen de Hallazgos	43
APÉNDICE D: Recomendaciones Generales	46
ANEXO A: Representación Grupos de Impulsos	47
ANEXO B: Proyección Estudios Detección Acústica	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calidad metodológica de estudios incluidos	7
Tabla 2. Categoría temática 1 - Subcategoría 1	10
Tabla 3. Categoría temática 1 - Subcategoría 2	10
Tabla 4. Categoría temática 1 – Subcategoría 3	11
Tabla 5. Categoría temática 1 – Subcategoría 4	11
Tabla 6. Categoría temática 1 – Subcategoría 5	11
Tabla 7. Categoría temática 1 – Subcategoría 6	12
Tabla 8. Categoría temática 2	12
Tabla 9. Categoría temática 3	12
Tabla C1. Resumen hallazgos Orden Coleoptera	43
Tabla C2. Resumen hallazgos otros Órdenes	45
Tabla D. Resumen parámetros para óptimo muestreo	46

Tabla B1. Incremento Estudios Detección Acústica	47
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA	6
Figura B1. Representación gráfica de la detección acústica de insectos	41
Figura B2. Distribución mundial de publicaciones analizadas en la revisión	42
Figura A1. Identificación acústica de actividad larvaria de RPW	47

RESUMEN

El estudio y el desarrollo de la detección y monitoreo acústico de insectos es una disciplina que representa más de un siglo de investigación, sin embargo, su implementación se ha visto limitada principalmente por la elevada complejidad asociada a identificar la Firma Espectral de cada especie en ambientes de elevado ruido o en presencia de múltiples fuentes sonoras. No obstante, bajo el paradigma actual de manejo integrado de plagas y producción sustentable, los recientes avances en *machine learning* y algoritmos de clasificación otorgan a esta técnica un futuro promisorio. El objetivo capital de este trabajo fue constatar y contrastar mediante una Revisión Sistemática Cualitativa, los últimos hallazgos asociados a detección y monitoreo acústico de los principales Órdenes y Familias de insectos considerados plagas de hábitos crípticos a nivel mundial.

Palabras clave: bioacústica; sensores acústicos; detección automática de insectos; detección remota de insectos; métodos no destructivos.

ABSTRACT

The study and development of acoustic detection and monitoring of insects is a discipline that accounts for more than a century of research. However, its implementation has been limited mainly by the high complexity associated with the Spectral Signature of each species, in high environmental noise or by the presence of multiple sound sources. Nevertheless, under the current paradigm of Integrated Pest Management and Sustainable Production, recent advances in machine learning and classification algorithms give this technique a promising future. The principal objective of the present work was to verify and contrast through a Qualitative Systematic Review the latest findings associated with acoustic detection and monitoring on the main orders and families of insects considered cryptic pests worldwide.

Keywords: bioacoustics; acoustic sensors; automatic detection of insects; remote detection of insects; non-destructive methods.

I. INTRODUCCIÓN

En términos evolutivos, la bioacústica ha jugado un rol fundamental en una porción importante del reino animal, tanto a nivel ecosistémico como individual. La emisión y percepción de sonidos ha permitido el desarrollo de complejas estrategias de comunicación, caracterización del ambiente, como también la localización de la comida (Penar *et al.*, 2020). En este último caso, en el mundo de los artrópodos (y también en otros grupos; e.g., aves) existe un sinnúmero de especies de individuos depredadores y parasitoides capaces de percibir y localizar los sonidos emitidos por sus presas y hospederos a la hora de comunicarse, alimentarse y moverse (Meyhöfer y Casas, 1999). A raíz de la documentación de esta adaptación y conducta, sumado a la posibilidad de grabar y producir sonido de manera electrónica, los seres humanos han fomentado el desarrollo de tecnologías que permiten la detección de la presencia de insectos, como también el monitoreo de su actividad en una escala temporal (Mankin *et al.*, 2011a).

Si bien el uso de la tecnología acústica cuenta con una larga data que abarca décadas de desarrollo e implementación en la agricultura (Mankin *et al.*, 2021), el auge actual de problemáticas tales como el uso de plaguicidas, la sobreexplotación de los recursos naturales, expansión de los mercados globales, sobrepoblación, cambio en las tendencias de consumo y el avance tecnológico, han suscitado la necesidad de modernizar la agricultura en esta materia (Lima *et al.*, 2020).

En cuanto a avances respecta, la tecnología en el agro ha sido destinada principalmente al incremento en productividad y optimización en el uso de recursos a través de la agricultura de precisión, disciplina que facilita la toma de decisiones mediante el análisis de la variabilidad espacio-temporal de factores claves para la fenología y crecimiento en los cultivos (Pedersen y Lind, 2017). Por otro lado, parte importante de estos esfuerzos han sido dirigidos hacia el Manejo Integrado de Plagas (MIP) y el desarrollo de sistemas de alerta temprana, con el objetivo de reducir el uso de plaguicidas y realizar aplicaciones o manejos más precisos y oportunos (Lima *et al.*, 2020). Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas está supeditada a la precisión de la metodología de monitoreo utilizada, en conjunto al conocimiento de factores ecosistémicos y poblacionales (Jiang *et al.*, 2008).

Es relevante señalar que el uso de dichas tecnologías está usualmente asociado a grandes costos, siendo no asequible para la mayoría de los productores (Lima *et al.*, 2020). No obstante, producto de la reducción en los costos de sensores y sistemas de grabación de señales; el incremento en la velocidad de procesamiento y capacidad de almacenamiento de datos y la rápida expansión en los métodos para identificar patrones sonoros, es que la utilidad práctica y teórica de la tecnología acústica ha presentado un crecimiento dramático durante la última década (Mankin *et al.*, 2021).

En efecto, el monitoreo acústico de insectos se ha implementado en granos almacenados, leguminosas, frutas frescas y vegetales; también en embarques agrícolas, bambú, cuarteles de árboles frutales, vides, césped; también se ha aplicado sobre especies importantes para la salud como mosquitos; y finalmente en el ambiente urbano, ya sea en árboles, o en estructuras de madera (Mankin *et al.*, 2021). Una de las ventajas fundamentales de esta técnica es que corresponde a uno de los pocos métodos disponibles que permite la detección y el monitoreo

insectos cuyos hábitats en determinados estadios pueden estar situados en sustratos de difícil acceso y detección, e.g., el interior de los troncos de un árbol, en el perfil del suelo, infestando el interior de grano almacenado, etc. (Mankin *et al.*, 2011a).

Sin embargo, a pesar de la explosión en el entendimiento de la acústica de insectos durante la última década (Barbero *et al.*, 2009), la adopción y desarrollo de herramientas acústicas para la detección y monitoreo de infestaciones de insectos “crípticos” de importancia económica ha enfrentado importantes limitaciones: conocimiento limitado de la atenuación de la señal acústica en diferentes sustratos; dificultad de interpretación de señales acústicas de insectos cuando el ruido de fondo (*background noise*) es elevado; en muchas ocasiones, escaso conocimiento del comportamiento y hábitos del insecto críptico a detectar o monitorear, y el pequeño mercado existente de instrumentos para detección de insectos (Mankin *et al.*, 2011a).

A raíz de lo anteriormente expuesto, la presente revisión sistemática tiene como finalidad sentar las bases teórico-prácticas para el eventual desarrollo y fomento de la detección y monitoreo acústico de insectos en Chile, principalmente debido a que esta área se encuentra escasamente documentada en el país, y sus aplicaciones son utilizadas hoy por hoy específicamente como parte del manejo de termitas (Ripa *et al.*, 2004).

Mediante una revisión de estudios acústicos llevados a cabo para insectos de múltiples Órdenes y Familias presentes en distintos contextos, muchos de los cuales pueden presentar similitudes a la realidad entomológica chilena, se busca ahondar en la eficacia de cada caso y sistematizar la información para facilitar eventuales próximas investigaciones.

Cabe destacar, además, que la terminología utilizada en esta revisión consta de variables de carácter acústico, tales como “sonido”, “señal”, “oscilación” y “vibración”. El término “señal” será utilizado como un sinónimo de “sonido”, es decir, una perturbación u oscilación (vibración) de carácter mecánico que se propaga en el aire o una estructura (Plinke, 1991), también se entenderá “señal” como una designación matemática a una función ondulatoria (*Waveform*) de amplitud-tiempo (Mankin *et al.*, 2011a), es decir, la representación gráfica del sonido capturado.

A su vez, el fenómeno sonoro está caracterizado por magnitudes físicas: Frecuencia (f), cuya unidad de medida es Hz o kHz; Período (T), medido en segundos; y Amplitud (A), medido en decibeles (dB). Para mayor comprensión de la terminología científica y técnica utilizada, se sugiere revisar el glosario adjunto en el Apéndice A.

Finalmente, dado que las señales emitidas por los insectos pueden ser detectadas ya sea por micrófonos en forma de sonido, o bien por sensores de contacto a través de vibraciones, el término “señal acústica” se adapta a este contexto (Webb *et al.*, 1988). A su vez, la detección acústica se categoriza como una técnica “remota”, dado que la captura de señales ocurre a una determinada distancia del insecto objetivo, condicionada principalmente por el sustrato en que éste habita (Reynolds y Riley, 2002).

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Revisar y contrastar de manera sistemática la bibliografía asociada a la detección y monitoreo acústico de insectos de importancia económica en términos de hallazgos y utilidad práctica de los mismos.

2.2. Objetivos específicos

Constatar los hallazgos más relevantes para los principales órdenes y familias asociadas a plagas crípticas de interés económico en agricultura y entomología urbana.

Determinar la relación existente entre los últimos avances tecnológicos en electroacústica y la detección y monitoreo acústico de insectos.

III. MÉTODOS

La presente revisión sistemática toma en consideración estudios de carácter mixto, es decir, cuantitativos como cualitativos afines al fenómeno acústico en insectos de importancia económica para diversos rubros. Por ende, es menester destacar que la pregunta investigativa de la presente revisión corresponde a: “¿Cuáles son los últimos avances en detección y monitoreo acústico para insectos de hábitos crípticos de importancia económica? Esta pregunta de carácter amplio, busca generar la mayor cantidad de antecedentes para múltiples Órdenes, Familias, sustratos, contextos, entre otros, de manera tal, que, ante un eventual desarrollo/implementación en Chile, exista un punto de partida en cuanto a herramientas y metodologías a utilizar.

3.1. Criterios de inclusión

Ámbitos de estudio:

Estudios relacionados con el entendimiento del fenómeno acústico de insectos de carácter económico, es decir, aquellos relativos a problemas agrícolas o forestales, como también ligados a la entomología urbana. Se incorporan además estudios de entomoacústica que sirven como base al entendimiento del fenómeno.

Fenómeno de interés:

Estrategias acústicas para la detección y monitoreo de insectos de importancia económica, estado actual y eficacia.

Filtro por publicación:

Artículos relacionados al área de la agronomía, forestal, entomología, acústica, bioacústica.

Estrategia de búsqueda:

La búsqueda se realizó en inglés, español, alemán y francés en las bases de datos de Web of Science, ResearchGate y Oxford University Press. Las palabras claves pertinentes para la búsqueda fueron: “*acoustic pest detection*”, “*acoustic monitoring*”, “*vibro-acoustic signature*”, “*vibro-acoustic larva detection*”, “*wood-boring insect pests*”, “*grain borer insect pests*”, “*acoustic entomology*”, “*coleoptera acoustic detection*”, “*insect acoustics*”, “*acoustics IPM*”, “*insect acoustic sensors*”, “*acoustic stored product insect detection*”, “*insect bioacoustics*”.

Tipos de estudio:

Se revisaron estudios de carácter experimental, como también teórico. A su vez, para no perpetuar sesgos de otros investigadores, fueron excluidas las revisiones sistemáticas previas en el tema.

3.2. Criterios de exclusión

Todos aquellos estudios no ligados a agricultura o entomología urbana, muchos de los cuales abordan la temática desde una perspectiva de caracterización biológica y no necesariamente asociada a una problemática de índole económica-social. Fueron excluidas asimismo todas las publicaciones no realizadas en inglés, español, francés o alemán.

Con el fin de minimizar el sesgo de selección, fueron excluidos todos los estudios duplicados, en conjunto a la utilización de los criterios PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Páramo, 2020).

3.3. Metodología de Análisis

Evaluación de la calidad metodológica:

Cada estudio fue sometido de manera independiente a una revisión y evaluación a través de una adaptación de la herramienta *JBI Critical Appraisal Checklist for Qualitative Research* propuesta en *A Guide to Conducting Systematic Reviews in Agri-Food Public Health* (Sargeant *et al.*, 2005). En específico se cuenta con 10 preguntas dicotómicas (Q) que guardan relación con: Correcto uso de terminología y conceptos científicos asociados (Q1); Tamaño adecuado de las muestras utilizadas (Q2); Representatividad del estudio frente a condiciones de campo (Q3); Aleatoriedad del diseño experimental utilizado (Q4); Tratamiento control adecuado (Q5); Análisis estadístico adecuado (Q6); Conclusiones respaldadas por los resultados (Q7); Coherencia entre objetivos planteados y resultados (Q8); Mención de hallazgos similares realizados por otros autores (Q9); Contribución del estudio al entendimiento del fenómeno, como también a la implementación o desarrollo de tecnologías asociadas (Q10).

Cabe señalar que a cada pregunta dicotómica (Q) le correspondió un valor de verdad “Sí/No”, asignándose un valor numérico de 1 a cada respuesta positiva y un valor 0 para cada respuesta negativa. Cada estudio seleccionado por la búsqueda fue sometido al set de 10 preguntas, cuyo resultado numérico obtenido de la suma de todas las respuestas positivas por estudio se tabularon en una escala de puntajes desde 0 a 10. Posteriormente, se expresó dicho puntaje en términos porcentuales a través de una relación lineal, lo que, junto a los criterios adaptados desde el test *JBI-Qualitative Critical Appraisal Checklist* para revisiones sistémicas permitió crear un criterio de exclusión en términos de calidad metodológica para todos aquellos estudios con una puntuación porcentual inferior al 60%.

Sistematización de la revisión:

Dada la alta diversidad presente en el fenómeno en cuestión, ya sea en términos taxonómicos, ecológicos o contextuales, los estudios fueron distribuidos en función de dos parámetros: Orden y Familia taxonómica de los insectos estudiados acústicamente. Además, un tercer apartado se requirió para abordar aquellos estudios que analizan la entomo acústica económica desde una perspectiva general.

IV. RESULTADOS

Estudios incluidos en la revisión

De acuerdo con los criterios de selección, como también aquellos de inclusión y exclusión detallados en la metodología, se obtuvo un total de 54 artículos. La **figura 1** presenta de forma detallada el resultado de la búsqueda bibliográfica llevada a cabo bajo el criterio PRISMA.

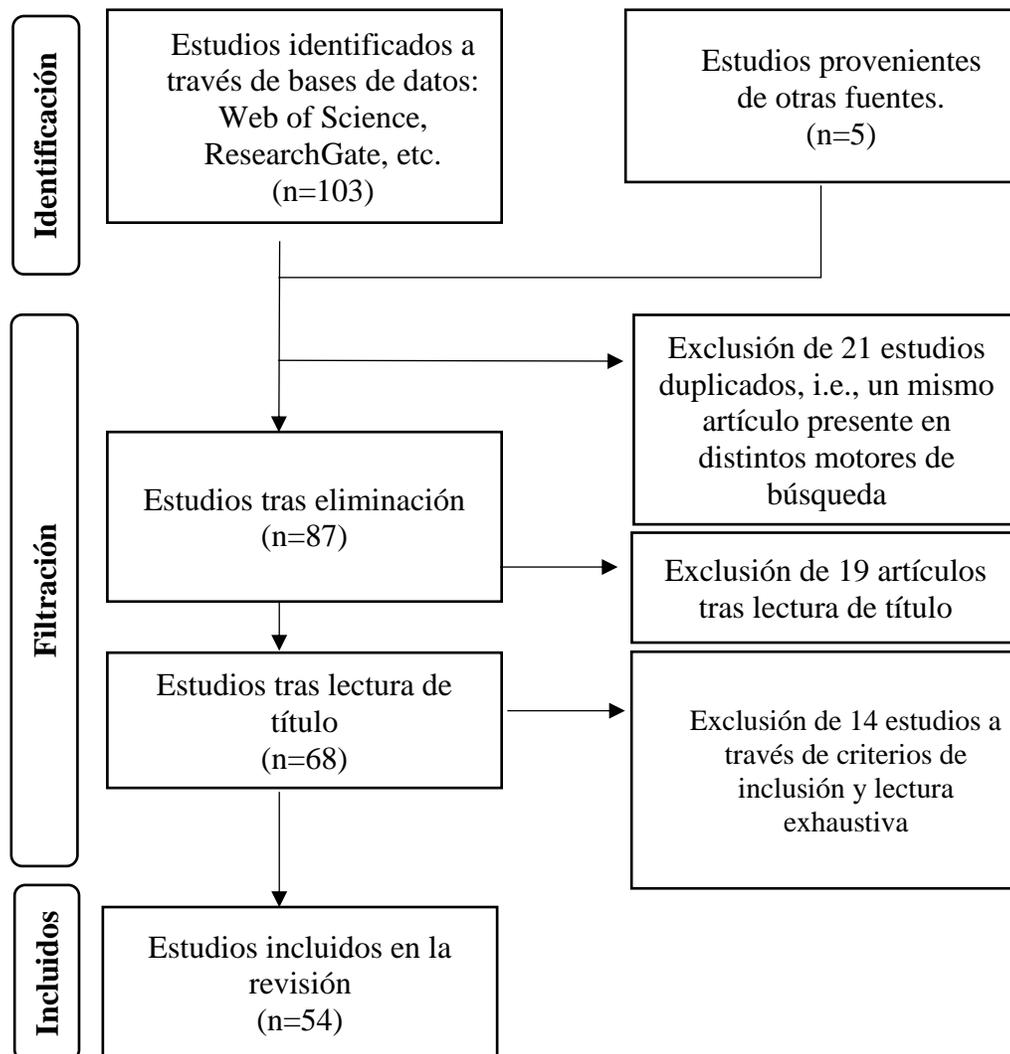


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA: Proceso de selección, exclusión y número de estudios incluidos en la revisión. Adaptado de Page *et al.* (2020) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews.

Calidad metodológica

A su vez, de los 54 artículos incluidos en la selección previamente descrita, al ser evaluados de acuerdo al test de calidad metodológica, adaptado pertinentemente para este contexto de la guía propuesta por Sargeant *et al.* (2005), sólo 35 estudios obtuvieron una ponderación mayor o igual a 60% para las preguntas dicotómicas abordadas en la metodología. En

consecuencia, los 19 artículos con calificación inferior fueron excluidos de la revisión detallada. La ponderación de cada artículo incluido puede ser observado en la **Tabla 1**, ordenados por calificación en orden descendente.

Tabla 1. Ranking de calidad metodológica de los estudios incluidos de acuerdo a ponderación Q

Autor(es)	Fecha	Título	Journal	Q (%)
Mankin, <i>et al.</i>	2018a	Assessment of plant structural characteristics, health, and ecology using bioacoustics tools	Animal Bioacoustics	100
Mankin, <i>et al.</i>	2009	Acoustic detection of <i>Melolonthina</i> larvae in Australian sugarcane	Journal of Economic Entomology	100
Mankin, <i>et al.</i>	2010	Acoustic indicators for targeted detection of stored product and urban insect pests by inexpensive infrared, acoustic, and vibrational detection of movement	Journal of Economic Entomology	100
Mankin, <i>et al.</i>	2021	Automated applications of acoustics for stored product insect detection, monitoring and management	Insects	90
Sutin, <i>et al.</i>	2019	Towards an automated acoustic detection algorithm for wood-boring beetle larvae (Coleoptera: Cerambycidae and Buprestidae)	Journal of Economic Entomology	90
Potamitis, <i>et al.</i>	2019	In-Vivo vibroacoustic surveillance of trees in the context of the Internet of Things (IoT)	Sensors	90
Mankin, <i>et al.</i>	2018b	Acoustic detection of <i>Mallodon dasystemus</i> (Coleoptera: Cerambycidae) in <i>Persea americana</i> (Laurales: Lauraceae) branch stumps	Florida Entomologist	90
Bilski, <i>et al.</i>	2017	Detection of wood boring insects' larvae based on the acoustic signal analysis and the artificial intelligence algorithm	Archives of Acoustics	90
Nowakowska, <i>et al.</i>	2017	Thermic limitations of AE detection method of old house borer larvae (<i>Hylotrupes bajulus</i> L.) in wooden structures	Construction and Building Materials	90
Njoroge, <i>et al.</i>	2017	Bioacoustics of <i>Acanthoscelides obtectus</i> (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) on <i>Phaseolus vulgaris</i> (Fabaceae)	Florida Entomologist	90
Mankin, <i>et al.</i>	2016	Acoustic detection of <i>Rhynchophorus ferrugineus</i> (Coleoptera: Dryophthoridae) and <i>Oryctes elegans</i> (Coleoptera: Scarabaeidae) in <i>Phoenix dactylifera</i> (Arecales: Arecaceae) trees and offshoots in Saudi Arabian orchards	Journal of Economic Entomology	90
Watanabe, <i>et al.</i>	2016	Relationship between the movements of the mouthparts of the bamboo powder-post beetle <i>Dinoderus minutus</i> and the generation of acoustic emission	Journal of Wood Science	90
Sciabica, <i>et al.</i>	2010	Détection acoustique des larves xylophages dans le bois	10 th French Congress of Acoustics	90

Siriwardena, <i>et al.</i>	2010	Portable acoustic device for detection of coconut palms infested by <i>Rynchophorus ferrugineus</i> (Coleoptera: Curculionidae)	Crop Protection	90
Mankin, <i>et al.</i>	2010	Acoustic detection of <i>Oryctes rhinoceros</i> (Coleoptera: Scarabaeidae: Dynastinae) and <i>Nasutitermes luzonicus</i> (Isoptera: Termitidae) in palm trees in urban Guam	Journal of Economic Entomology	90
Mankin, <i>et al.</i>	2008	Temporal and spectral features of sounds of wood-boring beetle larvae: identifiable patterns of activity enable improved discrimination from background noise	Florida Entomologist	90
Mankin, <i>et al.</i>	2008	Detection of <i>Anoplophora glabripennis</i> (Coleoptera: Cerambycidae) larvae in different host trees and tissues by automated analyses of sound-impulse frequency and temporal patterns	Journal of Economic Entomology	90
Pinhas, <i>et al.</i>	2008	Automatic acoustic detection of the red palm weevil	Computers and Electronics in Agriculture	90
Mankin, <i>et al.</i>	2006	Field testing of a prototype acoustic device for detection of Mediterranean fruit flies flying into a trap	7 th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance	90
Zhang, <i>et al.</i>	2003	Acoustic identification and measurement of activity patterns of white grubs in soil	Journal of Economical Entomology	90
Mankin, <i>et al.</i>	2002	Acoustic detection of termite infestations in urban trees	Journal of Economic Entomology	90
Inyang, <i>et al.</i>	2019	Subterranean acoustic activity patterns of <i>Vitacea polistiformis</i> (Lepidoptera: Sesiidae) in relation to abiotic and biotic factors)	Insects	80
Görres y Chesmore	2019	Active sound production of scarab beetle larvae opens up new possibilities for species-specific pest monitoring in soils	Science Reports	80
Allison, R.	2017	Development of bioacoustics nondestructive testing instruments for early detection of bark beetle infestation	20 th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium Conference Proceedings	80
Kiobia, <i>et al.</i>	2015	Characterization of sounds in maize produced by internally feeding insects: Investigations to develop inexpensive devices for detection of <i>Prostephanus truncates</i> (Coleoptera: Bostrichidae) and <i>Sitophilus zeamidis</i> (Coleoptera: Curculionidae) in small-scale storage facilities in sub-Saharan Africa	Florida Entomologist	80
Creemers, J.	2015	Use of acoustic emission (AE) to detect activity of common European dry-	International Symposium Non-	80

		woodboring insects: Practical considerations	Destructive Testing in Civil Engineering	
Le Conte, <i>et al.</i>	2015	Acoustic emission to detect xylophagous insects in wooden musical instrument	Journal of Cultural Heritage	80
Mankin, <i>et al.</i>	2004	Acoustic system for insect detection in plant stems: comparisons of <i>Cephus cinctus</i> in wheat and <i>Metamasius callizona</i> in bromeliads	Journal of Agricultural and Urban Entomology	80
Fleurat-Lessard, <i>et al.</i>	2006	Acoustic detection and automatic identification of insect stages activity in grain bulks by noise spectra processing through classification algorithms	9 th International Working Conference on Stored Product Protection	80
Nasswetrová, <i>et al.</i>	2016	Acoustic detection of wood-destroying insects during	Wood Research	70
Lemos, <i>et al.</i>	2020	Automated acoustic detection of a cicadid pest in coffee plantations	Computers and Electronics in Agriculture	70
Martínez, <i>et al.</i>	2013	On the design of a bioacoustics sensor for the early detection of the red palm weevil	Sensors	70
Unterwieser y Schickhofer	2011	Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic modulus of elasticity (MOE) of natural frequency and ultrasonic runtime measurement	European Journal of Wood and Wood Products	70
De Reyer, <i>et al.</i>	2005	Les signaux émis par les larves d'insectes xylophages et la détection acoustique	14th Triennial Meeting, ICOM Committee for Conservation	70
Hussein, <i>et al.</i>	2010	Detection of the red palm weevil <i>Rhynchophorus ferrugineus</i> using its bioacoustics features	Bioacoustics	60

Características y análisis de la información

Es relevante destacar que el estudio de la entomo acústica como disciplina, técnica y herramienta de detección y monitoreo es un fenómeno complejo, que se ha especializado de acuerdo a los requerimientos de cada contexto en particular. Y, en efecto, así lo evidencian los estudios seleccionados para esta revisión, donde existe una multiplicidad de enfoques y tendencias relacionadas con los hábitos de las plagas, el alcance de la tecnología a implementar, factor que está supeditado a la complejidad de los algoritmos y cuán explorada y documentada se encuentra la especie a tratar.

Esta tendencia de investigación manifiesta expresamente que no existe una manera estándar para el monitoreo y detección acústica de insectos. Por una parte, se señala en la totalidad de los estudios abordados la necesidad ulterior de identificar la firma espectral (Figura B1) para cada especie, de tal manera que suscite la construcción de una base de datos de señales acústicas, que permita la detección *in situ* de los individuos a través de la comparación de los sonidos que éstos emiten. Si bien la técnica puede reducirse a su expresión más sencilla: “Un sensor o transductor situado en un lugar estratégico capaz de transformar los sonidos o vibraciones emitidas por los insectos en una señal eléctrica que puede ser analizada en tiempo real por algún dispositivo remoto o grabada para el análisis en laboratorio para la toma de decisiones”, en realidad cuenta con numerosas variables que modulan el resultado final, e.g.,

el efecto de la temperatura del sustrato en la detección acústica, documentado por Nowakowska *et al.* (2017); o los estudios de Unterwieser y Schickhofer (2010), que analizan la influencia de la humedad de la madera en la velocidad de transmisión del sonido.

Por otra parte, dado que el estudio del monitoreo y detección acústica de insectos plaga se halla en su mayoría circunscrito hoy por hoy al manejo integrado de plagas (MIP), como parte de las estrategias no-destructivas de la agricultura de precisión que sirven a dicho propósito, es que la profusa cantidad de artículos se enfocan en aquellas especies consideradas plagas crípticas, es decir, aquellos insectos que poseen uno o más estados/estadios en zonas de difícil acceso para captar sus emisiones. Una prueba de esto se ve reflejada en el gran número de estudios destinados a la detección y monitoreo de larvas de coleópteros xilófagos, granívoros y de hábitos radiculares. En efecto, de los 30 artículos destinados particularmente a alguna especie, 26 de éstos se enfocan en alguna perteneciente al orden Coleoptera.

Otro hallazgo importante corresponde a la modalidad y alcance de los estudios analizados. En primer lugar, se hallan aquellos estudios dirigidos a una determinada especie, llevados a cabo en condiciones de laboratorio, con desarrollo de un algoritmo de análisis de señal, como es el caso de Bilski *et al.* (2017). Existen también estudios de laboratorio en que solamente se describen los insectos analizados en términos acústicos, sin desarrollo o aplicación de algoritmos de identificación, como en el caso de Njoroge *et al.* (2017). Se cuenta además con ensayos montados en campo, en condiciones reales. Tal es caso de los ensayos situados en árboles urbanos conducidos por Mankin *et al.* (2010). Finalmente, se tiene aquellos artículos que describen un fenómeno físico o tecnológico, como componente de la entomología acústica. Ejemplos de éstos son Nowakowska *et al.* (2017), Mankin *et al.* (2018). Unterwieser y Schickhofer (2010), entre otros.

En relación con el lugar donde cada experimento fue llevado a cabo (Figura B2), aquellos países con mayor predominancia en términos de cantidad de estudios son: Estados Unidos, Francia y Alemania (34,6%, 11,4% y 8,6%, respectivamente). El 45,4% restante de publicaciones se encuentra atomizado entre países que cuentan con 1 a 2 estudios. Cabe destacar que, para Sudamérica, sólo se encontró una publicación realizada en Brasil.

Categorización de los estudios

Dentro de los estudios incluidos en la presente revisión, existe una elevada diversidad de hallazgos abordados en cada uno, sin embargo, a raíz de la predominancia de estudios enfocados en el orden Coleoptera, se construyeron tres categorías: Categoría temática 1: “Detección y monitoreo acústico en orden Coleoptera”; Categoría temática 2: “Detección y monitoreo acústico en otros órdenes”; Categoría temática 3: “Detección y monitoreo acústico, generalidades”. A su vez, la categoría temática 1 se sistematizó en seis subcategorías representativas de las familias con mayor relevancia para el fenómeno acústico dentro del orden Coleoptera: subcategoría 1: “Curculionidae”; subcategoría 2: “Cerambycidae”; subcategoría 3: “Scarabaeidae”; subcategoría 4: “Bostrichidae”; subcategoría 5: “Ptinidae (Anobiidae)”; subcategoría 6: “Otras familias”. Los resultados de la categorización se muestran en las **tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9**.

Tabla 2. Categoría temática 1 – Subcategoría 1: Investigadores y publicaciones sobre detección y monitoreo acústico en el Orden Coleóptera, Familia Curculionidae.

Subcategoría 1: Curculionidae			
Autor(es)	Fecha	Journal	Título de artículo
Potamitis, <i>et al.</i>	2019	Sensors	Vigilancia acústica de <i>Rhynchophorus ferrugineus</i> Olivier en árboles urbanos.
Mankin, <i>et al.</i>	2016	Of Economic Entomology	Detección acústica de <i>R. ferrugineus</i> en <i>Phoenix dactylifera</i> .
Kiobia, <i>et al.</i>	2015	Florida Entomological Society	Caracterización de sonidos en maíz generados por <i>Sitophilus zeamais</i> .
Martínez, <i>et al.</i>	2013	Sensors	Diseño de sensor bioacústico para la detección temprana de <i>R. ferrugineus</i> .
Siriwardena, <i>et al.</i>	2010	Crop Protection	Dispositivo acústico portable para la detección de <i>R. ferrugineus</i> en palmas.
Hussein, <i>et al.</i>	2010	Bioacoustics	Detección acústica de <i>R. ferrugineus</i> .
Mankin, <i>et al.</i>	2008	Florida Entomologist	Características temporales y espectrales de los sonidos generados por <i>R. ferrugineus</i> .
Pinhas, <i>et al.</i>	2008	Computers and electronics in agriculture	Detección acústica de <i>R. ferrugineus</i> .
Fleurat-Lessard, <i>et al.</i>	2006	Of Stored Product Protection	Detección acústica e identificación automática de <i>Sitophilus oryzae</i> en granos almacenados.

Tabla 3. Categoría temática 1 – Subcategoría 2: Investigadores y publicaciones sobre detección y monitoreo acústico en el Orden Coleóptera, Familia Cerambycidae.

Subcategoría 2: Cerambycidae			
Autor(es)	Fecha	Journal	Título de artículo
Sutin, <i>et al.</i>	2019	Of Economic Entomology	Algoritmo de detección acústica automatizada para <i>Anoplophora glabripennis</i> .
Potamitis, <i>et al.</i>	2019	Sensors	Vigilancia acústica de <i>Xylotrechus chinensis</i> en árboles urbanos.
Mankin, <i>et al.</i>	2018	Florida Entomologist	Detección acústica de <i>Mallodon dasystemus</i> en <i>Persea americana</i> .
Bilski, <i>et al.</i>	2017	Archives of Acoustics	Detección acústica de larvas de <i>Hylotrupes bajulus</i> .
Nowakowska, <i>et al.</i>	2017	Construction and Building Materials	Limitación térmica en la detección acústica de <i>Hylotrupes bajulus</i> .
Nasswetrová, <i>et al.</i>	2016	Wood Research	Detección acústica de <i>Hylotrupes bajulus</i> .
Creemers, J.	2015	Non-Destructive Testing in Civil Engineering	Uso de emisión acústica para la detección de <i>H. bajulus</i> .

Mankin, <i>et al.</i>	2008	Forest Entomology	Detección acústica de <i>Anoplophora grlabripennis</i> .
-----------------------	------	-------------------	--

Tabla 4. Categoría temática 1 – Subcategoría 3: Investigadores y publicaciones sobre detección y monitoreo acústico en el Orden Coleóptera, Familia Scarabaeidae.

Subcategoría 3: Scarabaeidae			
Autor(es)	Fecha	Journal	Título de artículo
Görres y Chesmore	2019	Nature: Scientific Reports	Posibilidades de monitorear acústicamente larvas de <i>Melolontha melolonta</i> y <i>M. hippocastani</i> en el suelo.
Mankin, <i>et al.</i>	2016	Of Economic Entomology	Detección acústica de <i>Oryctes elegans</i> .
Mankin, <i>et al.</i>	2010	Ecology and Behavior	Detección acústica de <i>Oryctes rhinoceros</i> en palmeras urbanas.
Mankin, <i>et al.</i>	2009	Field and Forage Crops	Detección acústica de larvas de <i>Melolonthine</i> sp. en caña de azúcar.
Zhang, <i>et al.</i>	2003	Ecology and Behavior	Identificación acústica de larvas de <i>Phyllophaga</i> sp. y <i>Cyclocephala lurida</i> en suelo.

Tabla 5. Categoría temática 1 – Subcategoría 4: Investigadores y publicaciones sobre detección y monitoreo acústico en el Orden Coleóptera, Familia Bostrichidae.

Subcategoría 3: Bostrichidae			
Autor(es)	Fecha	Journal	Título de artículo
Watanabe, <i>et al.</i>	2016	Wood Science	Relación entre movimientos de armaduras bucales de <i>Dinoderus minutus</i> y generación de emisiones acústicas.
Kiobia, <i>et al.</i>	2015	Florida Entomologist	Caracterización de sonidos en maíz producidos por <i>Prostephanus truncatus</i> .
Creemers, J.	2015	Non-Destructive Testing in Civil Engineering	Uso de emisión acústica para detección de <i>Lyctus</i> sp.
Fleurat-Lessard, <i>et al.</i>	2006	Stored Product Protection	Detección acústica e identificación automática de <i>Rhyzopertha dominica</i> en granos almacenados.
De Reyer, <i>et al.</i>	2005	ICOM Committee for Conservation	Detección acústica de larvas de <i>Lyctus brunneus</i> .

Tabla 6. Categoría temática 1 – Subcategoría 5: Investigadores y publicaciones sobre detección y monitoreo acústico en el Orden Coleóptera, Familia Ptinidae (Anobiidae).

Subcategoría 5: Ptinidae (Anobiidae)			
Autor(es)	Fecha	Journal	Título de artículo

Le Conte, <i>et al.</i>	2015	Cultural Heritage	Detección de anópidos en instrumentos musicales de madera.
Creemers, J.	2015	Non-Destructive Testing in Civil Engineering	Uso de emisión acústica para detección de <i>Anobium punctatum</i> .
Sciabica, <i>et al.</i>	2010	Congrès Français d'Acoustique	Detección acústica de <i>Oligomerus ptilinoides</i> .
De Reyer, <i>et al.</i>	2005	ICOM Committee for Conservation	Detección acústica de larvas de <i>Anobium punctatum</i> .

Tabla 7. Categoría temática 1 – Subcategoría 6: Investigadores y publicaciones sobre detección y monitoreo acústico en el Orden Coleóptera, otras Familias.

Subcategoría 6: Buprestidae y Chrysomelidae			
Autor(es)	Fecha	Journal	Título de artículo
Sutin, <i>et al.</i>	2019	Of Economic Entomology	Hacia un algoritmo de detección acústica automática de <i>Agrilus planipennis</i> F.
Njoroge, <i>et al.</i>	2017	Florida Entomologist	Bioacústica de <i>Acanthoscelides obtectus</i> en <i>Phaseolus vulgaris</i> .

Tabla 8. Categoría temática 2: Detección y monitoreo acústico en otros órdenes de insectos.

Orden Blattodea			
Autor(es)	Fecha	Journal	Tema
Mankin, <i>et al.</i>	2010	Ecology and Behavior	Detección acústica de <i>Nasutitermes luzonicus</i> en palmeras urbanas.
Mankin, <i>et al.</i>	2002	Household and Structural Insects	Detección acústica de infestaciones de termitas en árboles urbanos.
Orden Hemiptera			
Lemos, <i>et al.</i>	2020	Computers and Electronics in Agriculture	Detección acústica automatizada para cicadélidos en plantaciones de café.
Orden Hymenoptera			
Mankin, <i>et al.</i>	2004	Agricultural and Urban Entomology	Sistema acústico para detección de <i>Cephus cinctus</i> en trigo.
Orden Lepidoptera			
Inyang, <i>et al.</i>	2019	Insects	Patrones de actividad acústica subterránea de <i>Vitacea polistiformis</i> .
Orden Diptera			
Mankin, <i>et al.</i>	2006	Fruit Flies of Economic Importance	Pruebas de campo para prototipo acústico para detección de <i>Ceratitis capitata</i> en trampas.

Tabla 9. Categoría temática 3: Detección y monitoreo acústico de insectos, generalidades.

Autor(es)	Fecha	Journal	Tema
------------------	--------------	----------------	-------------

Mankin, <i>et al.</i>	2021	Insects	Aplicaciones de acústica automatizada para la detección, monitoreo y control de plagas de productos almacenados.
Mankin, <i>et al.</i>	2018	Animal Bioacoustics	Evaluación de características estructurales de plantas, su salud y ecología usando herramientas bioacústicas.
Allison, R.	2017	-	Desarrollo de instrumentos bioacústicos para detección de infestaciones de escarabajos taladradores.
Mankin, <i>et al.</i>	2010	Ecology and Behavior	Indicadores acústicos para la detección de plagas de productos almacenados y plagas urbanas.
Unterwieser y Schickhofer	2010	European Journal of Wood and Wood Products	Influencia de la humedad de la madera en la velocidad del sonido y en el módulo de elasticidad de frecuencias naturales.

V. DISCUSIÓN

5.1. Orden Coleoptera

5.1.1. Familia Curculionidae

En relación con los artículos analizados para el Orden Coleoptera, se puede señalar que dentro del campo de la detección y monitoreo acústico existe hasta la fecha una predominancia de aquellas investigaciones conducidas sobre la familia Curculionidae. Se destaca además, que los hallazgos reportados pertenecen a especies relevantes económicamente hablando. En particular, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) o más conocido como RPW por la sigla de su nombre vernáculo en inglés *Red Palm Weevil*, que es una plaga ampliamente distribuida en el sur de Asia, medio oriente y regiones mediterráneas y caribeñas (Faleiro, 2006; Roda *et al.*, 2011; Hussain *et al.*, 2013; Vacas *et al.*, 2013), descrita principalmente en especies de palmeras (Arecales: Areaceae) (Mankin *et al.*, 2016).

Sus larvas tienen hábito xilófago y se alimentan internamente en los tallos y fustes, lo que puede ocasionar daño en los tejidos e incluso provocar la muerte del vegetal si no es tratado (Murphy y Briscoe, 1999). Cabe destacar que, debido a su importancia, la actividad biológica de las larvas de *R. ferrugineus* ha sido ampliamente descrita en términos acústicos, debido al elevado impacto que genera su infestación en tejidos leñosos. Sin embargo, el fenómeno aún cuenta con importantes desafíos a sobrellevar, situación que queda evidenciada al contrastar lo propuesto por cada autor.

Los estudios conducidos por Potamitis *et al.* (2019) destacan la importancia del sustrato a la hora de detectar las larvas de *R. ferrugineus*, dado que el tejido fibroso como el presente en palmeras tiende a producir vibraciones o impulsos sonoros que pueden fácilmente ser confundidos con ruidos de larvas. Esta situación no ocurre con la misma frecuencia en la detección de otras especies de insectos xilófagos en árboles, debido a que el tejido xilemático en estos últimos, presenta un módulo de elasticidad más elevado (Unterwieser y Schickhofer, 2010). Mankin *et al.* (2016) añaden que, bajo el contexto de palmeras, la detección es más sencilla en ramas o troncos delgados en contraste a aquellos con diámetros mayores a 30 cm, por efecto de la distancia al sensor.

Otro hallazgo importante corresponde al comportamiento del ruido ambiente, ocasionado por fuentes aleatorias, que puede a veces traducirse en forma de ruidos parásitos que pueden llegar a dificultar la detección, dado que estas ondas también son de carácter acústico, y en ocasiones cuentan con características similares a las emitidas por los insectos que se busca detectar (Evans *et al.*, 2005). En consecuencia, al comparar el comportamiento del ruido en el suelo y la madera, a raíz de que el primero presenta un coeficiente de atenuación mayor ($\sim 0,76 \text{ dB m}^{-1} \text{ kHz}^{-1}$) en comparación a la madera ($\sim 0,06 \text{ dB m}^{-1} \text{ kHz}^{-1}$) en torno a altas frecuencias (1 kHz) (Mankin *et al.*, 2000), en este último sustrato el ruido puede presentar máximos de intensidad en frecuencias similares a aquellas características de los sonidos emitidos por *R. ferrugineus* (Mankin *et al.*, 2008a). Esto cobra especial sentido, considerando que, al comparar la transmisión del sonido en el suelo y un tejido fibroso como la madera, la resonancia se encuentra altamente influenciada por la dimensión, masa y rigidez de la estructura (Hambric, 2006).

Ahora bien, yendo directamente a la caracterización de los sonidos emitidos por *R. ferrugineus*, las larvas producen al masticar el sustrato impulsos sonoros que se manifiestan en el espectrograma como barras de alta energía asociadas a un determinado rango de frecuencias (Potamitis *et al.*, 2019). En contraste, Mankin *et al.* (2016) mencionan que los impulsos son heterogéneos en términos de amplitud, duración y rango espectral. Debido a esta heterogeneidad, resulta extremadamente difícil distinguir los sonidos emitidos por *R. ferrugineus* cuando comparte su hábitat con otros coleópteros xilófagos. Cabe señalar que esta dificultad es omitida en los estudios conducidos por Siriwardena *et al.* (2010) y Hussein *et al.* (2010), donde respectivamente pese a haber conducido sus ensayos en condiciones de campo, reportan elevados porcentajes de precisión en la detección (97% y >94%, respectivamente). No obstante, es posible que, para los últimos casos señalados, no haya existido una discriminación adecuada entre la firma espectral de *R. ferrugineus* y los ruidos parásitos, dado que los autores no dan cuenta de aquello.

Otro método efectivo de discriminación del ruido de las larvas frente al ruido de fondo tiene relación con el comportamiento temporal de los sonidos emitidos por los estadios juveniles (Mankin *et al.*, 2008a). Este método consta de la identificación de patrones repetitivos, altamente reconocibles (Zhang *et al.*, 2003). Para el caso de *R. ferrugineus*, Mankin *et al.* (2008a) documentaron que el patrón se manifiesta como un grupo de impulsos consecutivos de baja y alta amplitud (Anexo A), que oscilan entre 6 a 200 impulsos separados por intervalos menores a 500 ms. Este hallazgo permitió identificar las larvas de *R. ferrugineus* frente a *Oryctes elegans* Prell, especie con la que comparte su firma espectral y también hábitat, además es un efectivo criterio para descartar ruidos parásitos. No obstante, los autores destacan que dentro de los grupos de impulsos hay una predominancia de aquellos de baja amplitud, lo que implícitamente recalca la importancia de contar con sensores capaces de percibir señales débiles, muy cercanos al umbral de ruido ambiente.

La cuantificación y distribución de los grupos de impulsos permite construir índices de nivel de infestación, para el caso de *R. ferrugineus* se estimaron en: Bajo, $n < 1$; Medio, $1 \leq n < 3$; Alto $n \geq 3$, donde n es el número de sets de impulsos por grabación de 50 s (Mankin *et al.*, 2008a). Este método abre muchas posibilidades en cuanto a su aplicación a señales de otras especies de insectos presentes en otras especies de árboles, es debido a ello que se requieren más estudios relacionados.

La actividad larvaria puede variar considerablemente en función del nivel de infestación y la distancia entre el sensor y la larva (Potamitis *et al.*, 2019). Además, Mankin *et al.* (2011a) mencionan que la temperatura del sustrato y el estadio de la larva pueden llegar a afectar el nivel de actividad. Lo anteriormente enunciado es señalado como el punto débil de las herramientas acústicas, puesto que están limitadas a los períodos de actividad de las plagas, y en caso de estar inactivas (sin alimentarse o desplazarse) en el momento de obtención de las señales, esto ocasionará un falso negativo (Pinhas *et al.*, 2008). Análogamente, Siriwardena *et al.* (2010) atribuyen a esta incertidumbre un <3% de probabilidad de identificar erróneamente una palma infestada, como también un <8% para palmas no infestadas. Señalan además que la actividad de *R. ferrugineus* no es continua, pues posee períodos de descanso, los que, a su vez, pueden traslaparse con los de otros individuos.

Lo anteriormente abordado, deja en evidencia la necesidad de contar con estudios futuros que permitan identificar los hábitos y conductas de las plagas a detectar, en términos de sus períodos de actividad, y qué parámetros y variables los modulan.

Si bien los autores señalados cuentan con discrepancias en sus hallazgos en términos de frecuencias importantes, los métodos utilizados para la detección, como también múltiples variables disímiles, existe una baja variación en términos del éxito de la detección: En primer lugar, Potamitis et al. (2019) obtienen resultados satisfactorios para la detección de *R. ferrugineus* evaluados en campo para palmeras en Grecia. Asimismo, Mankin et al. (2016) logran la identificación y detección de dichas larvas en *Phoenix dactylifera* L. (Arecaceae) en Arabia Saudita, en condiciones de viento y polvo, con temperaturas ambientales que llegaron hasta los 42°C. Situación similar fue observada en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Poales: Poaceae) (Mankin et al., 2008a). Lo que sugiere que estas investigaciones pueden ser utilizadas como puntapié inicial para un eventual estudio a nivel nacional para plagas similares.

En términos de limitaciones, algo que no es mencionado por la mayoría de autores, que Potamitis et al. (2019) abarcaron en su estudio, corresponde a la calidad de las mediciones frente a diferentes condiciones ambientales: tormenta de viento; lluvia pesada golpeando el tronco; tráfico de vehículos pesados en horario punta en caminos próximos al predio, etc. Estos autores concluyen que, si bien todos los contextos enumerados contribuyen enormemente al ruido de fondo, la lluvia imposibilita la labor de detección. Esto es de suma importancia, ya que muchos estudios obvian mencionar en qué época, a qué hora y bajo qué circunstancias ambientales realizan sus mediciones.

Si bien anteriormente se mencionó el suceso de los falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) en la detección, se debe hacer hincapié en el alcance de éstos, dado que son reportados usualmente como algo despreciable. Pinhas et al. (2008) reportan la media de FP y FN para la detección de *R. ferrugineus* en un 3,8% y 1,4%, respectivamente. A su vez, para esta misma especie, Siriwardena et al. (2010): FP:<8%; FN:<3%. Cuando un árbol es diagnosticado como infestado, las medidas a tomar dependerán de cada contexto, siendo el control químico o la remoción del árbol prácticas habituales (Hussein et al., 2010; Potamitis et al., 2019), por ende, el diagnóstico errado puede llevar a remover un árbol sano, o no controlar alguno infestado. Situación que toma vital relevancia en los mercados de exportación y sus requerimientos sanitarios, o en árboles de alto valor comercial o “cultural” por su edad, ubicación, etc. Por ello, a pesar de lo promisorio que es contar con elevados porcentajes de precisión y exactitud, se requiere de mayor investigación y avances al respecto.

En cuanto a los alcances mencionados por los investigadores, Potamitis et al. (2019) teorizan sobre la utilización de tres sensores por árbol, lo que permitiría localizar la posición exacta de los insectos en términos de coordenadas x, y, z a través del desfase existente en los sensores (TDOA: *time delay of arrival*), aunque señalan además que aquello es poco práctico para aplicaciones a gran escala. Por otra parte, Siriwardena et al. (2010) y Mankin et al. (2016) recalcan la necesidad de desarrollar dispositivos pequeños, de utilización sencilla, puesto que para este tipo de ensayos se utilizan prototipos poco optimizados para el uso y distribución comercial. En adición, Martínez et al. (2013) comentan que el futuro de estas

tecnologías debe basarse en la creación de una red automatizada inalámbrica que permita el monitoreo automático a distancia.

***Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae: Dryophthorinae)**

De acuerdo con los estudios analizados, existe evidencia que sustenta la utilización de sensores acústicos en forma de sonda para el monitoreo y detección de curculiónidos (gorgojos) asociados a granos y productos almacenados (Mankin et al., 2010). Fleurat-Lessard et al. (2006) concluyen en su estudio montado sobre granos de arroz y maíz almacenado con infestaciones de *S. oryzae*, que los individuos adultos presentan una firma espectral, cuya predominancia oscila entre 1,8 a 3,0 kHz y 3,3 a 3,8 kHz. Las larvas, a su vez, presentan mayor energía en el rango que comprende 1,3 a 2,0 kHz. Dado que el espectro de frecuencias asociado a la actividad de las larvas es común para otras especies, como *Rhyzopertha dominica* Fabricius (Coleoptera: Bostrichidae), los autores señalan que la identificación a nivel de especies en estos estadíos requiere de mayores estudios. Sin embargo, como se ha discutido en el apartado dedicado a *R. ferrugineus*, el análisis del espectro debe complementarse con la firma temporal, pues la delimitación de patrones puede ser crucial para la identificación (Mankin et al., 2008a).

El efecto de la temperatura del sustrato sobre la actividad de los individuos es una gran interrogante, dado que puede limitar la efectividad de la detección acústica. Para el caso de *S. oryzae*, Fleurat-Lessard et al. (2006) señalan que la actividad de los individuos comienza a cesar bajo los 10°C, aunque omiten la fuente de esta información. Sin embargo, a través de su estudio documentan grabaciones positivas a 8°C, lo que deja en evidencia que las larvas no se encuentran del todo quiescentes a estas temperaturas, pese a que el umbral inferior de desarrollo para la gran mayoría de insectos que infestan granos almacenados está estimado alrededor de los 15°C (Arthur et al., 2020). Por otra parte, estos criterios y hallazgos son omitidos en la investigación de características similares desarrollada por Kiobia et al. (2015).

También se documenta que, para granos almacenados, la firma espectral para individuos adultos es identificable a una distancia máxima de 20 cm del sensor. Esta distancia se reduce a 15 cm para la identificación de larvas (Fleurat-Lessard et al., 2006). Sin embargo, Kiobia et al. (2015) mencionan que la distancia máxima para la detección de larvas de *S. oryzae* es alrededor de 30 cm en un ambiente silencioso. La diferencia entre los valores propuestos por estos autores responde al uso de equipos y tecnologías de post procesado distintos, siendo más certeros y eficaces los utilizados por Kiobia et al. (2015). No obstante, en la investigación de estos últimos no se documenta la firma espectral de los individuos, quedando excluida así la identificación, situación que no responde a la hipótesis planteada por los autores: “Detección de *Prostephanus truncatus* Horn (Bostrichidae: Dinoderinae) y *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Curculionidae: Dryophthorinae)”.

5.1.2. Familia Scarabaeidae

Subfamilia Melolonthinae

Respecto a los artículos relacionados a la detección acústica de larvas pertenecientes a esta subfamilia, Mankin et al. (2009) señalan que para el caso de *Dermolepida albohirtum* (Waterhouse) y *Antitrogus parvulus* Britton, especies cuyas larvas poseen un carácter alimenticio radicícola, infestando raíces de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en Australia, la

actividad de estas dos especies cuenta con firma espectral y patrones distintivos, lo que permite no solamente la detección, sino también la identificación. Estos sonidos son consecuencia de la alimentación de las larvas, y se presentan como secuencias o grupos de impulsos separados por menos de 250 ms. La detección oportuna de estos individuos es crucial, dado que las larvas destruyen los tallos y yemas subterráneas del vegetal, lo que, bajo una elevada presión puede suscitar pérdidas económicas importantes (Agnew, 1997).

Se destaca además que la futura implementación de esta tecnología en el campo de la caña de azúcar en Australia, se produciría una optimización en la detección convencional de gusanos blancos (white grubs, que son las larvas de estos escarabeidos), puesto que suscita una reducción en la necesidad de realizar excavaciones prospectivas y disminución del tiempo destinado a cada planta (Mankin et al., 2009). Sin embargo, queda en evidencia la necesidad de investigaciones relacionadas a la identificación o caracterización acústica de otras especies presentes en el suelo, que pueden llevar a la determinación de falsos positivos.

Un aspecto importante a señalar para Melonithinae guarda relación con la estridulación, que son sonidos activamente producidos por los individuos para la comunicación a través de la frotación de partes del cuerpo (Alexander y Moore, 1963). En las larvas de esta subfamilia, los órganos estriduladores se hallan en la región maxilo-mandibular y consisten en un par de estridentes (stridens en inglés. Área con estriaduras paralelas finas) y una púa (cresta muy confinada) (Wessel, 2006). Para estridular, estos órganos deben frotarse mutuamente (Schiödte, 1874).

Frente a lo anterior, otro enfoque del monitoreo y detección acústica de escarabeidos de carácter radicícola presentes en el suelo es abordado por Görres y Chesmore (2019), quienes a través de un ensayo en laboratorio con larvas situadas en un contenedor con suelo, documentan el fenómeno de la estridulación de *Melolontha melolontha* L. (Scarabaeidae: Melolonthinae) y *Melolontha hippocastani* Fabricius (Scarabaeidae: Melolonthinae), concluyendo que si bien ambas especies poseen una firma espectral cuyos máximos de energía se hallan alrededor de 1.700 Hz, las estridulaciones de *M. melolontha* poseen una mayor duración que las de *M. hippocastani*. Si bien la causa de este suceso se teoriza alrededor de la diferencia de tamaño entre las especies, queda abierta la necesidad de más estudios en este campo.

Por otra parte, un alcance inesperado del estudio llevado a cabo por Görres y Chesmore (2019) da cuenta del posible rol de las estridulaciones en larvas de *M. hippocastani*, esto luego de incrementar gradualmente el número de individuos en un recipiente con suelo, lo que condujo a un aumento en el número de eventos sonoros, i.e. una larva produjo 188 estridulaciones durante 12 h, mientras que 3 larvas juntas produjeron 682 estridulaciones en un período de 2,5 h. Si bien el rol de las estridulaciones en larvas del género Scarabaeidae aún no es comprendido del todo (Wessel, 2006), Kočárek (2009) menciona que este comportamiento puede interpretarse como una estrategia de defensa, especialmente para evitar la competencia con otras larvas y el canibalismo. A su vez, puede constituir una conducta de adecuación a un nuevo ambiente, dado que existe un incremento momentáneo en la tasa de estridulación aun cuando la larva está aislada de otros individuos (Sprecher-Uebersax y Durrer, 1998). A pesar de esto, existe todavía un vacío importante en este campo del saber.

En cuanto a los escarabeidos *Phyllophaga crinita* (Burmeister), *Phyllophaga congrua* (LeConte), *Phyllophaga crassissima* (Blanchard) y *Cyclocephala lurida* (Bland), que son otras especies de gusanos blancos de interés agrícola, Zhang et al. (2003) si bien no describen la firma espectral de cada especie, realizan una caracterización temporal para una. Asimismo, concluyen que la actividad de estas larvas no depende de la hora del día o de un reloj circadiano, sino más bien de la temperatura del sustrato (Zhang et al., 2003; Fleurat-Lessard et al., 2006). Para este contexto en particular con larvas de *P. crinita*, *P. congrua*, *P. crassissima* y *C. lurida* criadas en macetas con pasto azul, *Poa arachnifera* Torr. (Poales: Poaceae), se obtuvo que, bajo 9°C, la tasa media fue de 0,32 sonidos/min, y el 75% de grabaciones de 1 minuto no contuvieron sonidos detectables. Entre 23 y 26°C, la tasa promedio fue de 10,7 sonidos/min. La tasa incrementó a 13,6 sonidos/min en temperaturas entre 30 y 32°C (Zhang et al., 2003). Esto sugiere que la captura de señales no debiese ser realizada con temperaturas inferiores a 9°C.

Subfamilia Dynastinae

En el contexto de plagas de árboles urbanos, Mankin y Moore (2010) investigaron sobre la detección acústica de adultos y larvas de *Oryctes rhinoceros* L. (Scarabaeidae: Dynastinae) infestando diversas especies de palmeras, entre ellas *Cocos nucifera* L. en la isla de Guam, realizando ensayos en laboratorio con larvas infestando bloques de madera, y posteriormente validando los acontecimientos hallados en campo.

Los adultos y larvas están caracterizados por impulsos sonoros con predominancia energética alrededor de los 2 kHz y picos secundarios entre 4 y 5 kHz, sin embargo, los sonidos emitidos por larvas muestran menor amplitud sonora. Por otra parte, con el motivo de diferenciar la actividad de *O. rhinoceros* de otros insectos presentes, tales como *Nasutitermes luzonicus* Oshima (Blattodea: Termitidae), se determinó que la cantidad óptima de impulsos por grupos es mayor o igual a 20 eventos/grupo (Mankin y Moore, 2010). Situación similar observaron Mankin et al. (2016) con *Oryctes elegans* Prell (Coleoptera: Scarabaeidae) infestando palma datilera (*Phoenix dactylifera* L.) en Arabia Saudita, donde pudieron contrastar que la firma espectral de las larvas de este insecto es similar a la perteneciente a larvas de *R. ferrugineus*. Por ello calcularon la firma temporal como un criterio de discriminación entre ambas especies, siendo el número de impulsos por grupos de 18 eventos/grupo para *O. elegans*. Situación que permite vislumbrar la similitud entre *O. rhinoceros* y *O. elegans*, sin embargo, para realizar esta aseveración, las condiciones de temperatura del sustrato en ambos estudios deberían ser equivalentes. No obstante, dicho aspecto no es abordado por los artículos.

5.1.3. Familia Bostrichidae

Con el objetivo de entender las emisiones acústicas producidas por *Dinoderus minutus* Fabricius (Coleoptera: Bostrichidae) en bambú (*Phyllostachys bambusoides* Siebold & Zucc) (Poales: Poaceae), el estudio de Watanabe *et al.* (2016) documenta que, bajo condiciones de laboratorio a través de sensores y cámaras microscópicas monitoreando individuos infestando bloques de madera de bambú, en larvas y adultos la actividad mandibular al alimentarse produce entre el 26 - 42% y 27 - 43% de las emisiones acústicas, respectivamente. Por ende, se concluye que para el caso de esta especie en estas condiciones particulares, no toda la actividad de las mandíbulas genera sonidos detectables, y a su vez,

las emisiones acústicas detectadas provienen de actividades mandibulares. Si bien el alcance de esta investigación es de carácter preliminar, ya que no cuenta con una aplicación directa, es el puntapié inicial a futuros eventuales trabajos en el ámbito de la detección en campo.

Por otra parte, para la caracterización de *Lyctus* sp. (Bostrichidae: Lyctinae) infestando madera seca en ensayos de laboratorio, Creemers (2015) documenta el efecto de la temperatura del sustrato sobre la actividad larvaria. Se menciona que la ocurrencia de eventos de emisión acústica es casi nula a 4°C, lo que, según el autor, es consistente con el origen tropical de la especie. Este resultado reafirma lo que se ha mencionado previamente para otras familias y subfamilias, es decir, la temperatura del sustrato es directamente proporcional a la actividad larvaria, sugiriendo que todas las mediciones acústicas deberían ser tomadas con temperaturas superiores a 10°C (Pallaske, 1986; Zhang *et al.*, 2003; Fleurat-Lessard *et al.*, 2006; Creemers, 2015).

Reconociendo la relevancia que poseen especies xilófagas como *Lyctus brunneus* Stephens (Bostrichidae: Lyctinae) en la entomología urbana, De Reyer *et al.* (2005) desarrollan un ensayo de laboratorio montado en muestras de madera (sin identificar) infestadas con larvas y observan que la actividad de éstas se manifiesta como un pulso regular en el tiempo. Sin embargo, no existe validación en campo frente a otras variables tales como temperatura del sustrato, ruido ambiente, geometría del sustrato, posición de los sensores, etc. Los autores señalan la necesidad de generar estudios que analicen la firma espectral de esta especie.

En cuanto al montaje de sensores, Creemers (2015) realiza una comparación de 3 tipos de acoplamiento sensor-sustrato para la detección de *Lyctus* sp. en laboratorio: imán con tornillo; prensa; sensor de contacto. El primero presenta una captura de las emisiones acústicas del 100% (162 golpeteos/5 min); el segundo, del 40% (64 golpeteos/5 min); y finalmente, el tercero, del 7% (11 golpeteos/5 min). Esto deja en evidencia la desuniformidad existente en los ensayos entomoacústicos, y abre un cuestionamiento relevante, dado que los sensores de contacto son ampliamente utilizados a raíz de que son instrumentos no intrusivos, que no requieren de perforación o modificación del sustrato a la hora del montaje.

5.1.4. Familia Cerambycidae

De acuerdo con la información analizada referente a la familia de los cerambycoides, se constata la predominancia de investigaciones asociadas al barrenador europeo de las casas (*Hylotrupes bajulus* L.). En consecuencia, queda en evidencia el auge que representa la detección acústica para esta especie. Concretamente, Nasswetrová *et al.* (2016) en su ensayo montado en laboratorio con larvas de *H. bajulus* en bloques de madera (especie no especificada), plantean una importante interrogante que guarda relación con la función biológica de los sonidos emitidos por los individuos. Como posible hipótesis a lo anteriormente mencionado, se señala que, análogamente a lo evidenciado en otras familias de coleópteros, en cerambycoides las emisiones acústicas generadas por las larvas no solamente serían consecuencia de la alimentación y movimiento en las galerías, sino que también pueden actuar como un mecanismo de señalización ante sus pares para evitar la competencia o el canibalismo (Victorsson y Wikars, 1996; Kočárek, 2009), no obstante, se requiere de un mayor número de investigaciones al respecto para establecer resultados concluyentes.

Ahora bien, a pesar de que la investigación de Nasswetrová *et al.* (2016) persigue la descripción de la mortalidad de los individuos a través del uso de aire caliente, utilizando el monitoreo acústico como una herramienta y no un fin *per se*, se describe que el carácter de las emisiones acústicas generadas por las larvas está dado por la estructura de la madera, contenido de humedad de la misma, la edad y tamaño de los individuos y la profundidad de su posición en la estructura, sin embargo, no se documenta de qué manera estas variables ejercen su efecto en el registro sonoro. Además, no se describe cuál es el tipo de madera utilizada en el experimento.

En función de lo descrito en el párrafo anterior, Mankin *et al.* (2008b) destacan que si bien las emisiones acústicas de *Anoplophora glabripennis* Motschulsky (Coleoptera: Cerambycidae) infestando distintos tejidos de árboles de sauce negro (*Salix nigra* Marshall) (Malpighiales: Salicaceae); arce rojo (*Acer rubrum* L.) (Sapindales: Sapindaceae); y falsa acacia (*Robinia pseudoacacia* L.) (Fabaceae: Faboideae), presentan un carácter acústico que se halla supeditado a las condiciones del sustrato y de los individuos monitoreados, las diferencias entre tejidos son sutiles, lo que permite crear un perfil espectral característico para la especie.

De acuerdo a Mankin *et al.* (2008b), se observa que las larvas de *A. glabripennis* presentan una mayor y más consistente contribución energética para la banda de 0,5 kHz el rango entre los 2,5 y 2,8 kHz cuando éstas habitan la albura, en contraste a lo observado cuando se sitúan en el duramen y el cambium del árbol (Apéndice A). En adición, Sutin *et al.* (2019) en un ensayo de laboratorio para larvas de la misma especie infestando madera de *Populus tremuloides* Michaux (nombre vernáculo: Álamo temblón) (Malpighiales: Salicaceae) y arce rojo (*A. rubrum*), se señala que las frecuencias características de la especie se localizan alrededor de las bandas cercanas a 4,5 y 3,25 kHz. Establecido este amplio rango de frecuencias, las causas pueden deberse a múltiples variables: temperatura y humedad de la madera; diferencia en la composición de la fibra vegetal (Hambric, 2006), entre otros. Por ello, es menester describir la actividad acústica de las larvas en términos temporales, es decir, el número de eventos sonoros por unidad de tiempo.

En consecuencia, análogamente a lo discutido para otras familias de coleópteros abordadas, la actividad acústica de los cerambícidos cuenta con una firma temporal característica, que se manifiesta en forma de pulsos en el tiempo, facilitando la identificación de las larvas en presencia de elevado ruido ambiente (Mankin *et al.*, 2008b), la que puede variar considerablemente en función del nivel de infestación (Potamitis *et al.*, 2019).

En larvas de *A. glabripennis*, Sutin *et al.* (2019) describen pulsos con una duración media de 5,6 ms, y una duración máxima de 13 ms. A su vez, Mankin *et al.* (2008b) utilizan una clasificación basada en la cantidad de grupos de impulsos por minuto (i.e., un grupo contiene entre 6 a 50 impulsos). En larvas de *Mallodon dasystemus* Say (Coleoptera: Cerambycidae: Prioninae) infestando paltos (*Persea americana* Miller) (Laurales: Lauraceae), se señala que un grupo de impulsos contiene entre 6 a 200 impulsos, con una separación entre cada impulso menor a 200 ms (Mankin *et al.*, 2018a). Si bien los métodos mencionados cuentan con una determinada precisión, sensibilidad y especificidad, se destaca que ante elevado ruido de fondo, especialmente cuando éste se manifiesta en pulsos similares a los producidos por las

larvas, se produce una cantidad elevada de falsos positivos, mermando la capacidad discriminatoria de los algoritmos utilizados para este experimento (RBF kernel, kernel polinómico y kernel lineal. Apéndice A) (Bilski *et al.*, 2017).

En cuanto al efecto de la temperatura del sustrato sobre la actividad larvaria en cerambícidos, Creemers (2015) describe para *H. bajulus*, que en condiciones de laboratorio la cantidad de registros es máxima cuando la temperatura del sustrato alcanza los 30°C. No obstante, cuando la temperatura de la madera disminuye gradualmente a 20°C, la cantidad de registros disminuye a la mitad. De igual manera, se observa una atenuación significativa en la actividad larvaria cuando la temperatura disminuye a 6°C, con registros nulos a 2°C. A su vez, Nowakowská *et al.* (2017) concluyen que existe una correlación estadísticamente significativa entre la temperatura de la madera y la actividad de *H. bajulus* para el rango entre 5 a 30°C, y que, en contraste a lo documentado por Creemers (2015), a 22°C la actividad larvaria no difiere significativamente de aquella observada a 30°C, existiendo si una dramática atenuación a 10°C.

La discrepancia anteriormente descrita, puede deberse principalmente al grosor de la madera y tipo de sensores utilizados (Krajewski *et al.*, 2012). No obstante, existe concordancia en que la temperatura mínima para detectar acústicamente dichas larvas corresponde a 10°C (Creemers, 2015). Sin embargo, es importante notar que, en estructuras de madera de amplio grosor, la temperatura de la superficie puede no necesariamente ser equivalente a la temperatura del interior, donde las larvas habitan (Nowakowská, *et al.*, 2017). Lo anteriormente descrito es crítico, puesto que no existe un criterio único a la hora de registrar la temperatura de muestreo en las investigaciones abordadas, es decir, en algunos casos se registra la temperatura ambiente, en otros la temperatura superficial del sustrato, como también la temperatura al interior del sustrato.

Respecto al tiempo de muestreo, a pesar de que la eficacia de la detección acústica es directamente proporcional al tiempo de grabado o registro de señales (Mankin *et al.*, 2008b), la factibilidad logística y de oportunidad en campo dificulta el avance en este aspecto. Por otra parte, reducir extremadamente el tiempo de muestreo puede ocasionar la toma de decisiones erróneas, cuando la actividad larvaria es muy baja (Sutin *et al.*, 2019). Tal es el caso de *H. bajulus*, que presenta períodos de inactividad constantes de alrededor de 30 minutos en condiciones de laboratorio (Creemers, 2015).

5.1.5. Familia Ptinidae (Anobiidae)

Para el caso de *Oligomerus ptiniloides* Wollaston (Coleoptera: Ptinidae: Anobiinae), Sciabica *et al.* (2010) señalan que, para la detección de larvas en madera en laboratorio, el método de detección basado en *Wavelets* (una manera matemática de representar el sonido que otorga mayor resolución para señales de alta frecuencia, Apéndice A) ofrece los mejores resultados en términos de localización temporal y discriminación de eventos sonoros. No obstante, tiende a generar una mayor cantidad de errores o falsos negativos (De Reyser *et al.*, 2005).

Respecto a la interacción de las emisiones acústicas con ruido de fondo, Le Conte *et al.* (2015) utilizan el método de Análisis de Componente Principal (PCA: Principal component analysis), el que, si bien logra detectar infestaciones de larvas de pínidos sobre muebles de madera, no describe la identificación de cada especie, ni la presión de infestación, puesto que no cuenta con información referente al comportamiento temporal de las emisiones sonoras registradas y analizadas.

En cuanto a los tiempos de muestreo se destaca que las larvas de *O. ptilinoides* presentan largos períodos de inactividad (Sciabica *et al.*, 2010). Lo mismo sucede con larvas de *Anobium punctatum* De Geer (Coleoptera: Ptinidae: Anobiinae) infestando bloques de madera en laboratorio, cuya actividad puede ser irregular, i.e., nula o muy intensa entre registros (De Reyer *et al.*, 2005). Debido a esto, se establece un tiempo mínimo de registro que consta de 1 h diaria por al menos un mes (Sciabica *et al.*, 2010). Sin embargo, si bien para el caso de *O. ptilinoides* las mediciones fueron efectuadas de 19:00 a 20:00 pm, no queda registro del porqué de esta decisión, ni del efecto de la temperatura sobre las mediciones.

Para vislumbrar una respuesta a esta interrogante, Creemers (2015) describe en un ensayo acústico de laboratorio sobre bloques de madera infestados situados en un pequeño gabinete aclimatado donde se puede variar la temperatura interior, que para larvas de *A. punctatum* y *Xestobium rufovillosum* De Geer (Coleoptera: Ptinidae: Anobiinae), se evidencia una disminución dramática en la actividad de los individuos cuando la temperatura del sustrato es menor a 10°C, siendo nula a 1°C para ambas especies.

5.1.6. Familia Buprestidae

De acuerdo con el estudio publicado por Sutin *et al.* (2019) para la detección acústica de larvas de *Agilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) infestando ramas de fresno blanco (*Fraxinus americana* L.) en laboratorio, se describe que estos individuos generan emisiones acústicas caracterizadas por pulsos con duración media de 9,1 ms y predominancia energética en las bandas de 0,8 y 1,5 kHz. Los autores sugieren implícitamente que los perfiles acústicos utilizados para la detección de *A. planipennis*, pueden ser adaptados de la metodología empleada para la detección de *A. glabripennis*.

5.1.7. Familia Chrysomelidae

En la bibliografía analizada para esta familia, la investigación de Njoroge *et al.* (2017) para la detección acústica de *Acanthocelides obtectus* Say (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) en estado larvario y adulto infestando granos almacenados de *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae), constata que los adultos muestran una predominancia en las frecuencias altas y medias, mientras que las larvas emiten impulsos en el rango medio. Además, las emisiones acústicas de estas últimas tienen un carácter de grupo de impulsos.

Un hallazgo poco común documentado por Njoroge *et al.* (2017), guarda relación con la amplitud de las emisiones: en coleópteros que infestan granos almacenados, usualmente los adultos generan emisiones de mayor amplitud e intensidad que las larvas (Shade *et al.*, 1990; Hagstrum *et al.*, 1991; Mankin *et al.*, 2011b). Sin embargo, Njoroge *et al.* (2017) reportan que los adultos de *A. obtectus* producen emisiones de menor amplitud que las larvas. Los autores atribuyen esta anomalía a la posible alteración en la conducta habitual de los adultos como consecuencia del experimento, dado que previo a la toma de muestras acústicas, los individuos adultos fueron trasladados entre contenedores, lo que pudo alterar su conducta habitual, ya que en esta especie los adultos pueden fingir la muerte cuando son perturbados (Mankin *et al.*, 2011a). Otra posible explicación a esta anomalía es descrita por Godfrey y Long (2008), quienes señalan que en algunos casos de Bruchinae, las hembras adultas son capaces de oviponer sin alimentarse, debido a la acumulación de nutrientes en las etapas previas. No obstante, se evidencia la falta de estudios que establezcan resultados concluyentes al respecto.

5.2. Orden Blattodea

Según Mankin *et al.* (2002), para el caso de *Coptotermes formosanus* Shiraki (Blattodea: Rhinotermitidae), *Reticulitermes flavipes* (Kollar) (Blattodea: Rhinotermitidae) y *R. virginicus* Blanks (Blattodea: Rhinotermitidae) infestando árboles urbanos: encino siempreverde (*Quercus virginiana* Mill, Fagaceae), pino taeda (*Pinus taeda* L., Pinaceae) y ciprés calvo (*Taxodium distichum* Rich., Taxodiaceae). Se evidencia que la amplitud y la tasa de sonidos puede variar ampliamente incluso dentro del mismo árbol. Situación que está supeditada a la presión de infestación en el hospedero, como también a la sección donde se montan los sensores. A pesar de aquello, existe una predominancia en el espectro de frecuencias alrededor de los 2 kHz, y pulsos característicos que permiten distinguirlas del ruido de fondo. Para el caso de *Nasutitermes luzonicus* infestando palmeras (*Cocos nucifera*), se ha estimado que el grupo de impulsos acústicos debe contener un mínimo de 15 eventos por grupo (Mankin y Moore, 2010).

Otro hallazgo relevante reportado por Mankin *et al.* (2002) corresponde a la distancia de medición. Se señala que en el suelo las termitas no pueden ser detectadas a distancias mayores a 20 cm desde el sensor. En contraste, en placas de madera infestadas con *R. virginicus* y monitoreada en una cámara anecoica, los individuos pudieron ser identificados fácilmente a una distancia de 180 cm desde el sensor. No obstante, queda en evidencia la necesidad de mayor investigación que permita corroborar estos hallazgos *in situ* en igualdad de condiciones.

5.3. Orden Hemiptera

De acuerdo con la información analizada, se puede afirmar que la detección acústica está escasamente descrita para hemípteros de importancia agrícola. No obstante, Lemos *et al.* (2020) describen en su investigación un método para detectar en tiempo real a machos adultos

de *Quesada gigas* Olivier (Hemiptera: Cicadidae) en plantaciones de café (*Coffea arabica* L., Rubiaceae) describiendo la estridulación que los machos producen, mostrando una predominancia armónica alrededor de la banda de 1,6 kHz, lo que, en conjunto con el algoritmo desarrollado en base a *Bark Scale*, *Wavelet-packet Transform* (WPT) y *Support Vector Machine* (SVM) (ver apéndice A), permite una detección que cuenta con una precisión del 96,41%. No obstante, no especifica el cómo de su implementación, tampoco profundiza en las características sonoras de cada emisión acústica transmitida a través del aire, ni su utilidad práctica, dado que la estridulación de los individuos es fácilmente reconocible para el oído humano.

5.4. Orden Hymenoptera

Para la detección acústica de larvas de himenópteros de interés agrícola, Mankin *et al.* (2004) condujeron una investigación enfocada en infestaciones de larvas de *Cephus cinctus* Norton (Hymenoptera: Cephidae) en tallos de trigo (*Triticum aestivum* L.) en laboratorio a 20-23°C, donde se evidencia una predominancia armónica en las bandas de 1,7 kHz y entre 2,5 y 4,5 kHz, hallazgo reportado anteriormente por Mankin *et al.* (2000). Cabe destacar que, a pesar de que larvas mayores tienden a generar ruidos con mayor predominancia en frecuencias altas, se describe que en términos de intensidad no existen diferencias estadísticamente significativas que la correlacionen con la edad o peso de las larvas (Mankin *et al.*, 2004).

5.5. Orden Lepidoptera

De manera análoga a los órdenes previamente abordados, para el caso de lepidópteros cuyas larvas representan problemas en la fruticultura, se evidencia una escasa cantidad de estudios relacionados a la detección acústica. Aquel seleccionado para la presente revisión estudia la detección de *Vitacea polistiformis* Harris (Lepidoptera: Sesiidae) en raíces de vid (*Vitis rotundifolia* Michaux) llevado a cabo por Inyang *et al.* (2019) en campo, donde se señala que el efecto de la temperatura del suelo no posee un efecto estadísticamente significativo sobre la actividad larvaria medido a través de las emisiones acústicas. Por el contrario, los autores teorizan que la actividad larvaria podría hallarse modulada por el reloj circadiano de la planta hospedera en términos de la calidad de los nutrientes y metabolitos, sin embargo, estas conjeturas abren espacio a nuevas investigaciones.

5.6. Orden Diptera

A pesar de que la literatura para este orden es prácticamente inexistente en relación a la detección acústica, Mankin *et al.* (2006) montaron un estudio para describir acústicamente el vuelo de machos adultos de mosca mediterránea de la fruta *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) ingresando a trampas de feromonas en una cámara anecoica (ver apéndice A). Se reporta que el vuelo de los individuos tiene una frecuencia fundamental alrededor de los 185 Hz, y armónicos consecutivos (segundo y tercer armónico) de 370 y 555 Hz. Sin embargo, la frecuencia de vuelo depende de múltiples factores: tamaño de los

individuos (Darveau *et al.*, 2005); la temperatura del ambiente (Unwin y Corbet, 1984); y la aerodinámica del vuelo (Hendrick y Daniel, 2006).

Se documenta, que a medida que el ruido ambiente se incrementa, el vuelo no es detectado por el sensor, a menos que el individuo vuele muy cerca de este último. Sin embargo, ante esta situación, la extrema cercanía del individuo al sensor puede inutilizar el registro al generar una emisión acústica saturada (*clipping* en inglés). La elevada cantidad de incertidumbre durante la validación *in situ*, hace de esta técnica, una práctica muy poco efectiva (Mankin *et al.*, 2006).

5.7. Antecedentes generales en la detección acústica de insectos

Respecto al estado del arte en la detección acústica, Allison (2017) destaca que las principales limitantes que esta técnica enfrenta pueden reducirse principalmente a cuatro aspectos, aseveración que es compartida por otros investigadores, quienes reportan que éstos corresponden a: entendimiento limitado de la atenuación de la señal acústica en distintos sustratos (Yanase *et al.*, 2000); dificultad en la interpretación de señales débiles producidas por insectos en entornos con elevado ruido ambiente (Pinhas *et al.*, 2008; Watanabe *et al.*, 2016; Potamitis *et al.*, 2019); conocimiento limitado del comportamiento y conducta de cada especie críptica que produce las señales (Mankin *et al.*, 2004, Mankin *et al.*, 2008b; Allison, 2017); y finalmente, el pequeño mercado asociado a los instrumentos destinados a la detección acústica de insectos (Mankin *et al.*, 2011a; Allison, 2017).

Por otra parte, se evidencia que los sensores más utilizados son acelerómetros, sensores piezoeléctricos, micrófonos y vibrómetros laser Doppler (LDV) (Allison, 2017). Liu (2017) señala que los acelerómetros pueden sensor impactos o vibraciones en uno, dos o tres ejes. Sin embargo, éstos tienden a contar con una respuesta de frecuencia más limitada (Martin *et al.*, 2013). Los sensores piezoeléctricos se componen de cristales piezoeléctricos que tienen la capacidad de transformar estrés mecánico en una señal eléctrica (Janshoff *et al.*, 2007; Allison, 2017; Liu, 2017). A su vez, los micrófonos proporcionan una medida del impacto acústico de una señal a través de un material como una membrana o una placa metálica, que bien pueden ser usados en contacto con el sustrato o a distancia, y presentan una respuesta de frecuencias similar al rango audible de los humanos (Mankin *et al.*, 2011a; Allison, 2017). Finalmente, Zorovic y Cokl (2015) describen los vibrómetros laser Doppler como una alternativa altamente sensible, con la ventaja de poder registrar a distancia, sin embargo, el costo de estos dispositivos es extremadamente elevado.

Tal y como se ha mencionado en el apartado de órdenes y familias, existe evidencia empírica que sustenta el efecto de múltiples factores abióticos y bióticos sobre la detección acústica (Mankin *et al.*, 2018). Los procesos fisiológicos como la muda de los artrópodos (Jalinas *et al.*, 2017), temperatura del sustrato, clima y variación de presión (Zagvazdina *et al.*, 2015), como también el contenido humedad de la madera (Unterwieser y Schickhofer, 2011). Lo anterior puede condicionar la fiabilidad de los métodos de detección bioacústica. Mankin *et*

al. (2018) destacan que una de las formas de evitar los falsos negativos, es precisamente muestrear en reiteradas ocasiones durante un período de varios días, en función de las variaciones climatológicas y la conducta propia de la especie a quien se dirige el monitoreo.

Cabe señalar que, si bien la detección acústica de insectos y estudios de análisis evidencian una proyección hacia el incremento para la próxima década (Anexo B) (Mankin *et al.*, 2021), la implementación en el mercado, a pesar de su elevada relación costo-efectividad, ha sido lenta, y se estima que no reemplazará al uso de trampas de feromonas u otro método de detección en el corto plazo (Mankin *et al.*, 2010; Mankin *et al.*, 2021). No obstante, Vincent *et al.* (2009) mencionan que la detección acústica debiese ser implementada en conjunto con otras técnicas de la agricultura de precisión, tales como el uso de termografías infrarrojas, telemetría, uso de cámaras en tiempo real, etc. (Lima *et al.*, 2020).

VI. CONCLUSIONES

Los principales hallazgos recabados y analizados sobre detección acústica de insectos como parte del manejo integrado de plagas, guardan una estrecha relación con la descripción y caracterización de los perfiles acústicos de aquellas especies estudiadas, principalmente en términos de la firma acústica espectral y temporal. Si bien existen concordancias y discrepancias críticas, incluso en aquellas investigaciones centradas en la detección acústica de una misma especie, la vasta cantidad de variables y limitaciones asociadas al fenómeno abre la necesidad de tratar cada caso como uno independiente de otro (ver resumen de la información en las tablas C1 y C2, Apéndice C y recomendaciones en la tabla D, Apéndice D).

No obstante, pese a la elevada variabilidad de parámetros, existen apartados indispensables y confluyentes que no sólo son clave para obtener resultados parsimoniosos, sino que también pueden llevar a resultados erróneos en la detección acústica de insectos que pueden traducirse en malas prácticas de manejo. El más importante de todos corresponde al conocimiento de los hábitos y conductas de la especie objetivo, como también la morfología de sus estructuras con las que los individuos emiten sonidos. Dichas emisiones acústicas pueden ser producto de la alimentación, locomoción e incluso la señalización entre individuos para evitar competencia y/o canibalismo en algunas familias, tal es el caso de las estridulaciones en larvas de escarabeidos, y pulsos en larvas de cerambícidos. Conocer el período de actividad de los individuos es crucial para el adecuado montaje de los sensores y registro de señales, si bien aún es un ámbito no documentado para un sinnúmero de especies, se teoriza que la temperatura del sustrato es la principal variable moduladora.

Dentro de los aspectos fundamentales y transversales a todos los artículos revisados que contribuyen directamente a las características de las señales recogidas, como también a su calidad, destacan: el tipo de sensor a utilizar (acelerómetros, sensores piezoeléctricos, micrófonos y vibrómetros laser Doppler), su posición respecto del insecto objetivo y la cantidad de sensores por árbol; la estructura física y el contenido de humedad del sustrato; el nivel de ruido ambiente puede interferir o enmascarar las señales acústicas de interés, es por ello que eventos como la lluvia y ruidos intensos imposibilitan la labor de detección.

A pesar de que no existe un registro detallado de los umbrales térmicos de actividad para cada especie, se señala que por lo general cualquier colección de datos acústicos debe ser efectuada con temperaturas superiores a 10°C.

Cabe señalar que, si bien queda en evidencia el alcance y la efectividad de la entomo acústica como herramienta, múltiples aristas y aspectos deben ser aún investigados y desarrollados, puesto que el fenómeno se estudia de acuerdo a cada orden, familia y especie. En base a esto último, se observa una clara predominancia de estudios asociados a coleópteros para diversos contextos y hábitos. Ello puede deberse a la escasez de prácticas y herramientas que permitan dar solución a problemas relacionados con plagas económicas de carácter críptico en la

agricultura, sector forestal y entomología urbana, como las xilófagas, granívoras y de hábito subterráneo.

En cuanto a la implementación y desarrollo de nuevas tecnologías de la información y manejo de datos, tales como algoritmos, redes neuronales, *Deep Learning* y *Machine Learning*, se concluye que no existe una vía única para el procesamiento y clasificación de datos acústicos asociados a insectos. A su vez, debido a la elevada complejidad y diversidad que estos sistemas representan, se sugiere la posterior realización de una revisión sistemática o estudio bibliográfico cuyo enfoque sea valorar y categorizar las herramientas informáticas de análisis de datos para la automatización de la detección y monitoreo acústico, dado que esto requiere de competencias y habilidades que trascienden a la Agronomía.

Finalmente, bajo el supuesto de sentar las bases para un eventual desarrollo e implementación a nivel nacional, es necesario destacar que, a pesar de abordar el fenómeno en torno a muchas especies no presentes en el país, esta revisión deja en evidencia directrices generales que pueden permitir a los investigadores realizar la asociación entre conductas acústicas estereotipadas para órdenes/familias ya descritas, con aquellas de interés para el contexto chileno.

VII. REFERENCIAS

- Alexander, R.; Moore, T. 1963. The evolutionary differentiation of stridulatory signals in beetles (Insecta: Coleoptera). *Animal Behaviour*. 11:111-115.
- Agnew, J. 1997. Australian sugarcane pests. Bureau of Sugar Experiment Stations, Brisbane, Queensland, Australia.
- Allison, R. 2017. Development of Bioacoustic Nondestructive testing instruments for early detection of bark beetle infestation. Forest and Wildlife Ecology Department, University of Wisconsin-Madison.
- Arthur, F., Morrison, W.; Trdan, S. 2020. Feasibility of using aeration to cool wheat stored in Slovenia: A predictive modeling approach using historical weather data. *Applied Sciences*. 10(17): 6066.
- Barbero, F.; Thomas, J.; Bonelli, S.; Balletto, E.; Schonrogge, K. 2009. Queen ants make distinctive sounds that are mimicked by a butterfly social parasite. *Science*. 323:782-85.
- Bliski, P.; Bobinski, P.; Krajewski, A.; Witomski, P. 2017. Detection of wood boring insects' larvae based on the Acoustic Signal Analysis and the Artificial Intelligence Algorithm. *Archives of Acoustics*. 42(1):61-70.
- Creemers, J. 2015. Use of Acoustic Emission (AE) to detect activity of common European dry-woodboring insects: Practical Considerations. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering. NDTCE 2015.
- Darveau, C.; Hochachka, P.; Welch, K.; Roubik, D.; Suarez, R. 2005. Allometric scaling of flight energetics in Panamanian orchid bees: a comparative phylogenetic approach. *Journal of Experimental Biology*. 208:3581-3591.
- Data-Flair. 2021. Machine Learning Tutorials: Kernel Functions, Introduction to SVM Kernel & Examples. <https://data-flair.training/blogs/svm-kernel-functions>.
- De Reyer, D.; Maurin, E.; Daudet, L.; Fontaine, J. M. 2005. Signals emitted by xylophagous insect larvae and acoustic detection. ICOM Committee for Conservation 14th Triennial Meeting. The Hague 12-16 Sept. 2005.
- Evans, T.; Lai, J.; Toledano, E.; McDowall, L.; Rakotonarivo, S.; Lenz, M. 2005. Termites assess wood size by using vibration signals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 102:3732-3737.
- Faleiro, J. 2006. A review of the issues and management of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Rhynchophoridae) in coconut and date palm during the last one hundred years. *International Journal of Tropical Insect Science*. 26:135-154.
- Fleurat-Lessard, F.; Tomasini, B.; Kostine, L.; Fuzeau, B. 2006. Acoustic detection and automatic identification of insect stages activity in grain bulks by noise spectra processing through classification algorithms. 476:5-13.

- Godfrey, L.; Long, R. 2008. Dry bean weevils. UC IPM Pest Management Guidelines: Dry Beans. University of California Agriculture and Natural Resources Publication 3446.
- Görres, C.; Chesmore, D. 2019. Active sound production of scarab beetle larvae opens up new possibilities for species-specific pest monitoring in soils. *Science Reports*. 9:10115. Doi: 10.1038/s41598-019-46121-y.
- Hagstrum, D.; Vick, K.; Flinn, P. 1991. Automated acoustical monitoring of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) populations in stored wheat. *Journal of Economic Entomology*. 84:1604-1608.
- Hambric, S. 2006. Structural acoustics tutorial – Part 1: Vibrations in Structures. *Acoustics Today*. 2:21-33.
- Han, J.; Ren, W.; Sun, Z. 2005. Wavelet packet-based damage identification of beam structures. *International Journal of Solids and Structures*. 42(26):6610-6627.
- Hansen, C. 1951. *Fundamental of Acoustics*. American Journal of Physics. 19.
- Hendrick, T.; Daniel, T. 2006. Flight control in the hawkmoth *Manduca sexta*: the inverse problem of hovering. *Journal of Experimental Biology*. 209:3114-3130.
- Hussain, A.; Rizwan-ul-Haq, M.; Al-Jabr, A.; Al-Ayied, H. 2013. Managing invasive populations of red palm weevil: A worldwide perspective. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 11:456-463.
- Hussein, W.; Hussein, M.; Becker, T. 2010. Detection of the Red Palm Weevil *Rhynchophorus ferrugineus* using its bioacoustics features. *Bioacoustics*. 19(3):177-194.
- IBM. 2020. What is Deep Learning? IBM Cloud Education. Artificial Intelligence.
- IEC. 1994. *Acoustic Glossary: Sound and vibration terms and definitions*. International Electrotechnical Commission.
- Inyang, E.; Hix, R.; Tsoleva, V.; Rohde, B.; Dosunmu, O.; Mankin, R. 2019. Subterranean acoustic activity patterns of *Vitacea polistiformis* (Lepidoptera: Sesiidae) in relation to abiotic and biotic factors. *Insects*. 10:267.
- Jalinas, J.; Guerri-Agulló, B.; Dosunmu, O.; Lopez-Llorca, L.; Mankin, R. 2017. Acoustic activity cycles of *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Dryophthoridae) early instars after *Beauveria bassiana* (Hypocreales: Clavicipitaceae) treatments. *Annals of the Entomological Society of America*. 110:551-557.
- Janshoff, A.; Steinem, C.; Copper, M. 2007. *Piezoelectric Sensors*. Berlin, Germany. Springer. ISBN 9783540365679.
- Jiang, J.A.; Tseng, C.L.; Lu, F.M.; Yang, E.C.; Wu, Z.S.; Chen, C.P.; Lin, S.H.; Lin, K.C.; Liao, C.S. 2008. A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Computer Electronic Agriculture*. 62: 243–259.
- Jolliffe, I.; Cadima, J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>.

- Kinsler, L.; Frey, A.; Coppers, B.; Sanders, J. 2000. Fundamentals of Acoustics. 548p.
- Kiobia, D.; Tumbo, S.; Cantillo, J.; Rohde, B.; Mallikarjunan, P., et al. 2015. Characterization of sounds in maize produced by internally feeding insects: Investigations to develop inexpensive devices for detection of *Prostephanus truncates* (Coleoptera: Bostrichidae) and *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) in small-scale storage facilities in Sub-Saharan Africa. Florida Entomologist. 98(2):405-409.
- Kočárek, P. 2009. Sound production and chorusing behaviour in larvae of *Icosium tomentosum*. Central European Journal of Biology 4(3):422-426.
- Krajewski, A.; Witomski, P.; Bobiński, P.; Wojcik, A.; Nowakowska, M. 2012. An attempt to detect fully-grown house longhorn beetle larvae in coniferous wood based on electroacoustic signals. Prace naukowe. 55(108):5-15.
- Le Conte, S.; Vaiedelich, S.; Thomas, J. H.; Muliava, V.; De Reyer, D.; Maurin, E. 2014. Acoustic emission to detect xylophagous insects in wooden musical instrument. Journal of Cultural Heritage. 16:338-343.
- Lemos, J.; Capobianco, R.; Nunes, I.; Moraes, A.; Bottura, D.; Kenzo, A. 2020. Automated acoustic detection of a cicadid pest in coffee plantations. Computers and Electronics in Agriculture. 169:105215.
- Lima, M.; Almeida Leandro, M.; Valero, C.; Pereira, L.; Gonçalves, C. 2020. Automatic detection and monitoring of insect pests – A review. Agriculture. 10(5):161.
- Liu, H.; Lee, S.; Chahl, J. 2017. A review of recent sensing technologies to detect invertebrates on crops. Precision Agriculture. 18:635-666.
- Lyal, C.; King, T. 1996. Elytro-tergal stridulation in weevils (Coleoptera: Curculionidae). Journal of Natural History. 30(5):703-773.
- Mankin, R.; Hagstrum, D.; Guo, M.; Eliopoulos, P.; Njoroge, A. 2021. Automated applications of acoustics for stored product insect detection, monitoring, and management. Insects. 12(3):259.
- Mankin, R.; Burman, H.; Menocal, O.; Carrillo, D. 2018a. Acoustic detection of *Mallodon dasystemus* (Coleoptera: Cerambycidae) in *Persea americana* (Laurales: Lauraceae) branch stumps. Florida Entomologist. 101(2):321-323.
- Mankin, R.; Stanaland, D.; Haseeb, M.; Rohde, B.; Menocal, O.; Carrillo, D. 2018b. Assessment of plant structural characteristics, health, and ecology using bioacoustic tools. Animal Bioacoustics. 33:010003.
- Mankin, R.; Al-Ayedh, H.; Aldryhim, Y.; Rohde, B. 2016. Acoustic detection of *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Dryophthoridae) and *Oryctes elegans* (Coleoptera: Scarabaeidae) in *Phoenix dactylifera* (Arecales: Arecaceae) trees and offshoots in Saudi Arabian orchards. Journal of Economic Entomology. 0:1-7.
- Mankin, R. 2012. Applications of acoustics in insect pest management. CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources. 7:1-7.

- Mankin, R.; Hagstrum, D.; Smith, M.; Roda, A.; Kairo, M. 2011a. Perspective and Promise: a century of insect acoustic detection and monitoring. *American Entomologist*. 57(1):30-44.
- Mankin, R.; Hagstrum, D. 2011b. Acoustic monitoring of insects. *Stored Product Protection*. 156(1):263–269.
- Mankin, R.; Moore, A. 2010. Acoustic detection of *Oryctes rhinoceros* (Coleoptera: Scarabaeidae: Dynastinae) and *Nasutitermes luzonicus* (Isoptera: Termitidae) in palm trees in urban Guam. *Journal of Economic Entomology*. 103(4):1135-1143.
- Mankin, R.; Hodges, R.; Nagle, H.; Schal, C.; Pereira, R.; Koehler, P. 2010. Acoustic indicators for targeted detection of stored product and urban insect pests by inexpensive infrared, acoustic, and vibrational detection of movement. *Journal of Economic Entomology*. 103(5):1636-46.
- Mankin, R.; Samson, P.; Chandler, K. 2009. Acoustic detection of Melolonthine larvae in Australian sugarcane. *Journal of Economic Entomology*. 102(4):1523-1535.
- Mankin, R.; Mizrach, A.; Hetzroni, A.; Levsky, S.; Nakache, Y.; Soroker, V. 2008a. Temporal and spectral features of sounds of wood-boring beetle larvae: Identifiable patterns of activity enable improved discrimination from background noise. *Florida Entomologist*. 91(2):241-248.
- Mankin, R.; Smith, M.; Tropp, J.; Atkinson, E.; Jong, D. 2008b. Detection of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae in different host trees and tissues by Automated Analyses of Sound-Impulse Frequency and Temporal Patterns. *Journal of Economic Entomology*. 101(3):838-849.
- Mankin, R.; Machan, R.; Jones, R. 2006. Field testing of a prototype acoustic device for detection of Mediterranean Fruit Flies flying into a trap. *Fruit Flies of Economic Importance: From Basic to Applied Knowledge*. Pp. 165-169.
- Mankin, R.; Weaver, D.; Grieshop, M.; Larson, B.; Morrill, W. 2004. Acoustic system for insect detection in plant stems: Comparisons of *Cephus cinctus* in wheat and *Metamasius callizona* in bromeliads. *Journal of Agricultural and Urban Entomology*. 21(4):239-244.
- Mankin, R.; Osbrink, W.; Oi, F.; Anderson, J. 2002. Acoustic detection of termite infestations in urban trees. *Journal of Economic Entomology*. 95(5):981-988.
- Mankin, R.; Brandhorst-Hubbard, J.; Flanders, K.; Zhang, M.; Crocker, R.; Lapointe, S.; McCoy, C.; Fisher, J.; Weaver, D. 2000. Eavesdropping on insects hidden in soil and interior structures of plants. *Journal of Economic Entomology*. 93:1173-1182.
- Martin, B.; Juliet, V.; Sankaranarayanan, P.; Gopal, A.; Rajkumar, I. 2013. Wireless implementation of MEMS accelerometer to detect red palm weevil on palms. *IEEE: International Conference on Advanced Electronic Systems*. Pp. 248-252.
- Martínez, M.; Migallón, H.; López, O.; Perez, M.; Martí, A.; Serrano, J. J. 2013. On the design of a bioacoustic sensor for the early detection of the Red Palm Weevil. *Sensors*. 13:1706-1729.

- Matsuoka, H.; Fujii, Y.; Okumura, S.; Imamura, Y.; Yoshimura, T. 1996. Relationship between the Type of Feeding Behavior of Termites and the Acoustic Emission (AE) Generation. *Wood Research*. 83:1-7.
- Meyhofer, R.; Casas, J. 1999. Vibratory stimuli in host location by parasitic wasps. *J. Insect Physiology*. 45: 967-971.
- Murphy, S.; Briscoe, R. 1999. The red palm weevil is an alien invasive: Biology and the prospects for biological control as a component of IPM. *Biocontrol News and Information*. 20:35-46.
- Nasswetrová, A.; Křivánková, S.; Šmíra, P.; Ostrava-Kunčičky, J. 2016. Acoustic detection of wood-destroying insects during. *Wood Research*. 61(5):755-766.
- Njoroge, A.; Affognon, H.; Mutungi, C.; Richter, U.; Hensel, O.; Rohde, B.; Mankin, R. 2017. Bioacoustics of *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) on *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae). *Florida Entomologist*. 100(1):109-115.
- Nowakowska, M.; Krajewski, A.; Witomski, P.; Bobinski, P. 2017. Thermic limitation of AE detection method of old house borer larvae (*Hylotrupes bajulus* L.) in wooden structures. *Construction and Building Materials*. 136:446-449.
- Page, M.; McKenzie, J.; Bossuyt, P.; Boutron, I.; Hoffmann, T.; Mulrow, C. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting Systematic Reviews. Doi: 10.1136/bmj.n71.
- Pallaske, M. 1986. Measurement and evaluation of the activity of larvae of the longhorn beetle *Hylotrupes bajulus* L. in wood and in a diet using modern electronics. *Material and Organisms*. 21(1):63-79.
- Páramo, P. 2020. How to elaborate a Systematic Review. Doi: 10.13140/RG.2.2.31465.85608.
- Penar, W.; Magiera; Angelika; Klocek, C. 2020. Applications of bioacoustics in animal ecology. *Ecological Complexity*. Doi: 10.1016/j.ecocom.2020.100847.
- Pedersen, S.M.; Lind, K.M. 2017. Precision Agriculture - From Mapping to Site-Specific Application. *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. 1:1–20.
- Pinhas, J.; Soroker, V.; Hetzroni, A.; Mizrach, A.; Teicher, M.; Goldberger, J. 2008. *Computers and Electronics in Agriculture*. 63:131-139.
- Plinke, B. 1991. Acoustic detection of insect infestation in timber framing. *Wood as a raw material*. 49:404.
- Potamitis, I.; Rigakis, I.; Tatlas, N. A.; Potirakis, S. 2019. In-Vivo vibroacoustic surveillance of trees in the context of the IoT. *Sensors*. 19:1366.
- Reynolds, D.; Riley, J. 2002. Remote-sensing, telemetric and computer-based technologies for investigating insect movement: a survey of existing and potential techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*. 35:271-307.

- Ripa, R.; Luppichini, P.; Krecek, J.; Lenz, M.; Creffield, J. 2004. Termitas y otros insectos xilófagos de Chile: Especies, Biología y Manejo. Colección Libros INIA N°11.
- Roda, A.; Kairo, M.; Damian, T.; Franken, F.; Heidweiller, K.; Johanns, C.; Mankin, R. 2011. Red palm weevil (*Rhynchophorus ferrugineus*), an invasive pest recently found in the Caribbean that threatens the region. OEPPP/EPPO, Bulletin 41:116-121.
- Sargeant, J.; Amezcua, M.; Waddell, L. 2005. A guide to conducting Systematic Reviews in Agri-Food Public Health. Public Health Agency of Canada: Guelph, ON, Canada.
- Schiödte, J. 1874. Note on the organs of stridulation in the larvae of coleoptera lamellicornes. Annals of the Entomological Society of France. 4, 39.
- Sciabica, J. F.; Daudet, L.; Maurin, E.; De Reyer, D. 2010. Acoustic détection of xylophagous larvae in wood. 10th French Acoustics Congress. hal-00554453.
- Shade, R.; Furgason, E.; Murdock, L. 1990. Detection of hidden insect infestations by feeding-generated ultrasonic signals. American Entomologist. 36:231-234.
- Siriwardena, K.; Fernando, L.; Nanayakkara, N.; Perera, K.; Kumara, A.; Nanayakkara, T. 2010. Portable acoustic device for detection of coconut palms infested by *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae). Crop Protection. 29:25-29.
- Sprecher-Uebersax, E.; Durrer, H. 1998. Investigations on the stridulation behavior of the stag beetle larvae (*Lucanus cervus* L.) (Coleoptera: Lucanidae). Communications of the Swiss Entomological Society. 71:471-479.
- Sutin, A.; Yakubovskiy, A.; Salloum, H.; Flynn, T.; Sedunov, N.; Nadel, H. 2019. Towards an Automated Acoustic Detection Algorithm for wood-boring beetle larvae (Coleoptera: Cerambycidae and Buprestidae). Journal of Economic Entomology. 112(3):1327-1336.
- Unterwieser, H.; Schickhofer, G. 2011. Influence of wood moisture on the sound velocities and the dynamic modulus of elasticity from natural vibration and ultrasonic transit time measurement. European Journal of Wood and Wood Products. 69(2):171-181.
- Unwin, D.; Corbet, S. 1984. Wingbeat frequency, temperature and body size in bees and flies. Physiological Entomology. 9:115-121.
- USDA. 1966. Differences between heartwood and sapwood. U.S. Forest Service Research Note FPL-0147.
- Vacas, S.; Primo, J.; Navarro-Llopis, V. 2013. Advances in the use of trapping systems for *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae): Traps and attractants. Journal of Economic Entomology. 106:1739-1746.
- Van den Burg, G.; Groenen, P. 2016. GenSVM: A generalized multiclass support vector machine. Journal of Machine Learning Research. 17(224):1-42.
- Victorsson, J.; Wikars, L. 1996. Sound production and cannibalism in larvae of the pinesawyer beetle *Monochamus sutor* L. (Coleoptera: Cerambycidae). Entomologisk tidskrift, Entomologiska föreningen i Stockholm. 117:29-33.

- Vincent, C.; Weintraub, P.; Hallman, G.; Fleurat-Lessard, F. 2009. Insect management with physical methods in pre- and post-harvest situations. *Integrated Pest Management*. 309-323.
- Watanabe, H.; Yanase, Y.; Fukii, Y. 2016. Relationship between the movements of the mouthparts of the bamboo powder-post beetle *Dinoderus minutus* and the generation of acoustic emission. *Journal of Wood Science*. 62:85-92.
- Webb, J.; Litzkow, C.; Slaughter, D. 1988. A computerized acoustical larval detection system. *Applied Engineering in Agriculture*. 4:268-274.
- Wessel, A. 2006. Stridulation in the Coleoptera – An Overview. *Insects sounds and communication*. 397-404.
- Yanase, Y.; Fujii, Y.; Okumura, S.; Yoshimura, T. 2000. Plate-type waveguides for detecting acoustic emissions generated by termite attacks. *Journal of Wood Science*. 46:243-247.
- Zagvazdina, N.; Paris, T.; Udell, B.; Stanislauskas, M.; McNeil, S.; Allan, S.; Mankin, R. 2015. Effects of atmospheric pressure trends on calling, mate-seeking, and phototaxis of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Annals of the Entomological Society of America*. 108:762-770.
- Zhang, M.; Crocker, R.; Mankin, R.; Flanders, K.; Brandhorst-Hubbard, J. 2003. Acoustic identification and measurement of activity patterns of white grubs in soil. *Journal of Economical Entomology*. 96(6):1704-1710.
- Zorović, M.; Čokl, A. 2015. Laser vibrometry as a diagnostic tool for detecting wood-boring beetle larvae. *Journal of Pest Science*. 88(1):107-112.

APÉNDICE A: Glosario Técnico

Albura (*Sapwood* en inglés): Corresponde a la porción exterior del tronco de un árbol, comprendida entre la corteza y el duramen, que se caracteriza por una coloración clara, cuya función principal comprende el transporte de agua desde el sistema radical a las hojas y el almacenamiento de nutrientes (USDA, 1966).

Amplitud Sonora: La amplitud de una onda longitudinal, se define como el máximo desplazamiento de una partícula desde su posición de equilibrio (Kinsler *et al.*, 2000). A su vez, esta magnitud guarda estrecha relación con la cantidad de energía transportada, donde manifiesta una proporcionalidad directa. La cantidad promedio de energía que pasa por una unidad de área por unidad de tiempo en una dirección específica recibe el nombre de Intensidad Sonora, que se mide en watts por metro cuadrado (W/m^2). La intensidad sonora integra la densidad del medio, la velocidad del sonido y la presión sonora. A su vez, dado que el comportamiento del oído humano frente a diferentes presiones sonoras no posee un carácter lineal, sino más bien logarítmico, es que el Nivel de Intensidad Sonora se mide en decibeles (dB) (Hansen, 1951).

Armónico: Componente sinusoidal de una onda sonora compleja, cuya frecuencia es un múltiplo integral de la frecuencia fundamental (IEC, 1994).

Análisis de Componente Principal (PCA: *Principal Component Analysis*): Es una técnica para la interpretación de grandes cantidades de datos, que busca la reducción de la dimensionalidad de dichos sets de datos, incrementando la interpretabilidad y al mismo tiempo minimizando la pérdida de información (Jolliffe y Cadima, 2016).

Background Noise: Se define como la interferencia total proveniente de todas las fuentes en un sistema utilizado para la producción, transmisión, detección, medición, o grabación de una señal acústica (IEC, 1994).

Bark Scale: El oído humano combina sonidos de frecuencias similares dentro de bandas de frecuencias, llamadas bandas críticas. De acuerdo al modelo de Zwicker, el espectro audible se divide en 24 bandas críticas, siendo cada unidad un “*bark*” (IEC, 1994).

Cámara Anecoica: Habitación tratada acústicamente con el fin de inhibir cualquier tipo de reverberación o eco, utilizada para realizar mediciones acústicas (IEC, 1994).

Deep Learning: Es un subconjunto del Machine Learning, que es esencialmente una red neuronal con tres o más capas. Dicha red busca asemejar el comportamiento del cerebro humano, lo que le permite aprender de grandes cantidades de datos y posteriormente realizar predicciones aproximadas de elevada precisión (IBM, 2020).

Duramen (*Heartwood* en inglés): Corresponde a la región central del tronco. En la mayoría de los árboles éste puede ser diferenciado de la albura por su coloración oscura, y se encuentra a continuación del mismo. Este tejido está conformado principalmente por células muertas, cuyas paredes celulares se hallan eventualmente obstruidas por varias sustancias, algunas de las cuales oscurecen la madera (USDA, 1966).

Emisión Acústica Saturada (*Clipping*): Una señal eléctrica se considera saturada cuando el nivel de la señal excede la capacidad del amplificador. Obteniendo una señal distorsionada (IEC, 1994).

Estridulación en insectos: Acción de producir sonido a través de la fricción de ciertas partes del cuerpo, usualmente denominadas órganos estriduladores (Lyal y King, 1996).

Firma Espectral Acústica: Se define como la caracterización de una onda sonora en términos de frecuencia y amplitud. Se requiere de un analizador de espectro para describir los componentes de frecuencia de la onda. Este dispositivo convierte la señal desde la escala temporal a la escala de frecuencias, usualmente a través del uso de series de Fourier (IEC, 1994).

Firma Temporal Acústica: Corresponde a la caracterización de una onda sonora en términos de su amplitud en función del tiempo, a través del análisis de la *waveform*, lo que permite detectar trenes de impulsos o patrones consecutivos (IEC, 1994).

Frecuencia (f): Corresponde al número de ciclos de variación de presión en el medio por unidad de tiempo, o simplemente, el número de ciclos por segundo. Se mide en Hertz (Hz), magnitud que equivale a 1/s. Por ejemplo, el ruido usualmente se compone de muchas frecuencias combinadas (Hansen, 1951).

Frecuencia Fundamental: En acústica se define como la frecuencia más baja de un sistema oscilatorio. El espectro de una señal periódica consiste de un componente fundamental y posiblemente de una serie de armónicos de esta frecuencia. La fundamental es también denominada el primer armónico (IEC, 1994).

Impulso: En acústica, es el caso límite de un pulso infinitamente corto en el tiempo, pero que mantiene su área o integral, por lo que usualmente presentan un máximo de amplitud muy elevado.

Kernel: Dentro de los algoritmos de aprendizaje SVM (*Support Vector Machine*) y *Machine Learning* se utilizan funciones matemáticas definidas como “*kernel*”. La función de un kernel es coleccionar datos como inputs y transformarlos a su forma requerida, se utilizan para reconocer patrones e identificar tipos generales de relaciones en sets de datos (rankings, componentes principales, correlaciones, clasificaciones, etc.) (Data-Flair, 2021).

Machine Learning: Es un componente importante dentro del campo de las ciencias de la información. Corresponde a una rama de la inteligencia artificial e informática que se enfoca en el uso de datos y algoritmos que imitan la forma en que los humanos aprenden, permitiendo la mejora gradual en su precisión. A través del uso de métodos estadísticos, los algoritmos son entrenados para realizar clasificaciones o predicciones (IBM, 2020).

Periodo (T): Constituye el tiempo que tarda para que un ciclo de una onda pase por un punto fijo. Matemáticamente se representa como el inverso multiplicativo de la frecuencia (Hansen, 1951).

Pulsos y Trenes (Grupos) de Impulsos: Un pulso es una onda que transporta una perturbación que posee una duración que comprende un corto intervalo de tiempo. Un tren de impulsos corresponde a una secuencia consecutiva de oscilaciones de mayor duración (Kinsler *et al.*, 2000).

Sonido: En acústica, el sonido se define como una onda mecánica energética que puede ser transmitida de un lugar a otro en un determinado medio. Es una forma de onda de presión que se genera por la vibración de un objeto (Kinsler *et al.*, 2000).

Support Vector Machine (SVM): En Machine Learning, los SVMs son modelos de aprendizaje supervisado algoritmos de aprendizaje asociados que analizan datos para la clasificación y análisis de regresión. Son uno de los modelos de predicción más robustos (Van den Burg y Groenen, 2016).

Vibración (Oscilación): En acústica, corresponde a un movimiento de partículas en un medio elástico alrededor de una posición de equilibrio, lo que también puede ser denominado como oscilación acústica (IEC, 1994).

Waveform: Corresponde a una representación visual o gráfica del valor instantáneo de la onda trazada en función del tiempo, usualmente visualizada en un osciloscopio. Esta representación permite analizar la firma temporal de la onda (IEC, 1994).

Wavelet-Packet Transform (WPT): Es un método para analizar señales, que provee una combinación de series de funciones básicas que permiten separar una señal en tiempo y frecuencia. Esta transformada se forma por la combinación lineal de la *wavelet*. De esta forma, el WPT puede indicar las características permanentes y temporales de una señal con la separación de frecuencia-tiempo deseada (Han *et al.*, 2005).

APÉNDICE B: Cuadros y Figuras

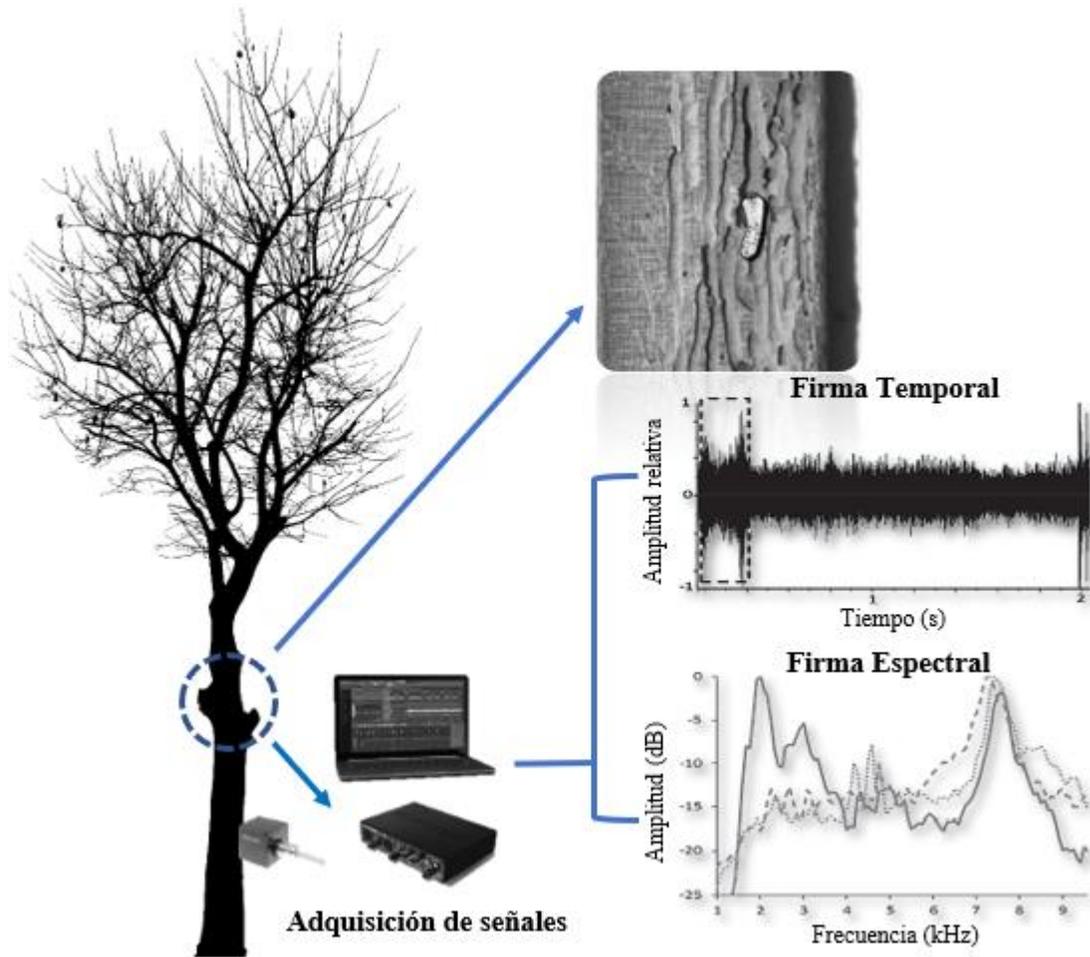


Figura B1. Representación gráfica de la detección acústica de insectos en sus dos componentes: Firma Temporal: variación de amplitud sonora en el tiempo; Firma Espectral: Distribución energética en el espectro de frecuencias. Elaboración Propia.

APÉNDICE C: Resumen de Hallazgos

Tabla C1: Resumen de principales hallazgos recabados de los estudios analizados para el Orden Coleoptera.

Familia: Subfamilia	Especie(s)	Frecuencia(s) Predominante(s) (kHz)	Identificación Patrón temporal (Sí/No)	Temperatura Ideal Muestreo (°C)	Tiempo Ideal Muestreo (min)	Sustrato	Tipo Ensayo
Curculionidae	<i>Rhynchophorus ferrugineus</i>	Larvas: 0,5 - 1,0 [1]; 2,5 [3]	Sí [2, 3, 4, 6]	No indicado	No indicado	Fibra de palmera [1, 2, 3, 4, 5, 6]	En Campo [1, 2, 3, 4, 5, 6]
Curculionidae: Dryophthorinae	<i>Sitophilus oryzae</i>	Adultos: 1,8 – 3,0; 3,3 – 3,8 [8] Larvas: 1,3 – 2,0 [8]	Sí [7]	>14 [8]	>2 [8]	Grano almacenado [7, 8]	In Situ [7,8]
Scarabaeidae: Melolonthinae	<i>Dermolepida albohirtum</i> ; <i>Antitrogus parvulus</i> <i>Melolontha melolontha</i> ; <i>M. hippocastani</i>	Larvas: 0,1 – 3,5 [9] Estridulación larvas: 1,7 [10]; 3,0 [10]	Sí [9] Sí [10]	No indicado No indicado	~10 [9] No indicado	Raíz caña de azúcar [9] Contenedor con suelo [10]	In Vivo [9] Laboratorio [10]
Scarabaeidae	<i>Phyllophaga crinita</i> ; <i>P. congrua</i> ; <i>P. crassissima</i> ; <i>Cyclocephala lurida</i>	No indicado	Sí [11]	>9 [11]	No indicado	Maceta con suelo y pasto azul [11]	Laboratorio [11]
Scarabaeidae: Dynastinae	<i>Oryctes rhinoceros</i> ; <i>Oryctes elegans</i>	Adultos y larvas: 2,0 [2, 12]; 4,0 – 5,0 [2, 12]	Sí [12]	No indicado	No indicado	Fibra de palmeras vivas y muertas [2, 12]	En Campo [2, 12]

Bostrichidae	<i>Dinoderus minutus</i>	No indicado; Emisiones generadas por mandíbulas [13]	Sí [13]	No indicado	No indicado	Trozos de Madera de bambú [13]	Laboratorio [13]
Bostrichidae: Lyctinae	<i>Lyctus</i> sp.; <i>Lyctus brunneus</i>	No indicado	Sí [15]	>10 [8, 11, 14]	No indicado	Bloques de madera [14]; Madera de muebles ornamentales [15]	Laboratorio [14, 15]
Cerambycidae	<i>Hylotrupes bajulus</i>	Larvas: 1,6 [16]	No indicado	>15 [14, 17]	No indicado, periodos de inactividad de ~30 min [14]	Bloques de madera [16]	Laboratorio [16, 17]
	<i>Anoplophora glabripennis</i>	Larvas: 0,5 [18]; 2,5 – 2,8 [18] 3,3 – 4,5 [19]	Sí [18, 19]	No indicado	No indicado	Troncos y brotes de sauce negro, arce rojo y falsa acacia [18]; Troncos de álamo temblón [19]	Laboratorio [18, 19]
Cerambycidae: Prioninae	<i>Mallodon dasystemus</i>	Larvas: 7,5 [20]	Sí [20]	No indicado	No indicado	Paltos [20]	En Campo [20]
Ptinidae (Anobiidae)	<i>Oligomerus ptiniloides</i> ; <i>Anobium punctatum</i>	No indicado	No indicado	>10 [14]	60 [21]	Bloques de madera [21]	Laboratorio [21]
Buprestidae	<i>Agrilus planipennis</i>	Larvas: 0,8 – 1,5 [19]	Sí [19]	No indicado	No indicado	Ramas de fresno blanco [19]	Laboratorio [19]

Chrysomelidae	<i>Acanthocelides obtectus</i>	Larvas: 3,0 [22]; Adultos: 3,0 [22]; 4,0 – 5,5 [22]	Sí [22]	No indicado	No indicado	Frejoles almacenados [22]	Laboratorio [22]
---------------	--------------------------------	---	---------	-------------	-------------	---------------------------	------------------

[1] Siriwardena *et al.*, 2010; [2] Mankin *et al.*, 2016; [3] Mankin *et al.*, 2008a; [4] Potamitis *et al.*, 2019; [5] Hussein *et al.*, 2010; [6] Pinhas *et al.*, 2008; [7] Kiobia *et al.*, 2015; [8] Fleurat-Lessard *et al.*, 2006; [9] Mankin *et al.*, 2009; [10] Görres y Chesmore, 2019; [11] Zhang *et al.*, 2003; [12] Mankin y Moore, 2010; [13] Watanabe *et al.*, 2016; [14] Creemers, 2015; [15] De Reyer *et al.*, 2005; [16] Nasswetrová *et al.*, 2016; [17] Nowakowska *et al.*, 2017; [18] Mankin *et al.*, 2008b; [19] Sutin *et al.*, 2019; [20] Mankin *et al.*, 2018b; [21] Sciabica *et al.*, 2010; [22] Njoroge *et al.*, 2017.

Tabla C2: Principales hallazgos recabados de los estudios analizados para el resto de Órdenes.

Orden: Familia	Especie(s)	Frecuencia(s) Predominante(s) (kHz)	Identificación Patrón temporal (Sí/No indicado)	Temperatura Ideal Muestreo (°C)	Tiempo Ideal Muestreo (min)	Sustrato	Tipo Ensayo
Blattodea: Rhinotermitidae	<i>Coptotermes formosanus</i> ; <i>Reticulitermes flavipes</i> ; <i>R. virginicus</i>	Adultos: 0,1 – 4,0 [1]; ~2,0 [1]	Sí [1, 2]	No indicado	No indicado	Árboles urbanos: Encino siempreverde, pino taeda, ciprés calvo [1]	En Campo [1, 2]
Hemiptera: Cicadidae	<i>Quesada gigas</i>	Estridulación adultos: 1,6 [3]	No indicado	No indicado	No indicado	Plantas de café [3]	En Campo [3]
Hymenoptera: Cephididae	<i>Cephus cinctus</i>	Larvas: 1,7 [4]; 2,5 – 4,5 [4]	No indicado	No indicado	No indicado	Macetas con trigo [4]	En Invernadero
Lepidoptera: Sesiidae	<i>Vitacea polistiformis</i>	Larvas: 3,6 [5]; 14,0 [5]	Sí [5]	No indicado	No indicado	Raíces de vid [5]	En Campo [5]
Diptera: Tephritidae	<i>Ceratitis capitata</i>	Vuelo de adultos: 0,2 – 0,5 [6]	No indicado	No indicado	No indicado	Trampa feromonas [6]	Cámara Anecoica [6]

[1] Mankin *et al.*, 2002; [2] Mankin y Moore, 2010; [3] Lemos *et al.*, 2020; [4] Mankin *et al.*, 2004; [5] Inyang *et al.*, 2019; [6] Mankin *et al.*, 2006.

APÉNDICE D: Recomendaciones generales

Tabla D. Resumen de principales parámetros a considerar para un óptimo muestreo.

Criterio	Recomendación
Temperatura	Todas las mediciones deben ser colectadas cuando la temperatura del sustrato es superior a 10°C. La temperatura óptima de muestreo oscila alrededor de los 25°C.
Ruido	Cualquier evento de ruido ambiente elevado (<i>i.e.</i> , lluvia, tráfico vehicular, presencia de música, etc.) imposibilita la labor de muestreo al enmascarar las señales de interés.
Tiempo de muestreo	Si bien está supeditado a cada especie, contexto de muestreo (<i>e.g.</i> , laboratorio, campo agrícola, ambiente urbano) y oportunidad, la duración de las muestras está en directa relación con la cantidad de eventos registrados.
Periodicidad de muestreo	Realizar colecciones diarias reiteradas para una misma unidad de muestreo puede compensar el efecto de los períodos de inactividad de algunas larvas.
Tipo de sensor	Acelerómetros, sensores piezoeléctricos, micrófonos de membrana, vibrómetros láser. La elección dependerá de la oportunidad e implementación en términos de tipo de sustrato y cantidad de muestreos a realizar.
Cantidad sensores	El uso de múltiples sensores (>3 sensores/unidad de muestreo), permite la visualización tridimensional de las emisiones sonoras de las larvas a través del TDOA (<i>time delay of arrival</i>).
Distancia sensor-larva	Estrictamente supeditada a la sensibilidad del sensor y la estructura física del sustrato en cuestión. Se utiliza el Coeficiente de Atenuación/Absorción Acústica para determinar la distancia óptima desde el sensor hacia la fuente sonora: a valores elevados (<i>e.g.</i> , suelo: 0,70 para 1 kHz) la distancia máxima se halla alrededor de los 20 cm; a valores bajos (<i>e.g.</i> , madera: 0,01 para 1 kHz), la distancia máxima supera los 150 cm.
Identificación de especie	Requiere de conocimientos previos en torno a las conductas y características fisio-morfológicas de cada especie. La identificación y discriminación acústica de cada especie se efectúa a través de la caracterización en términos de Firma Espectral y Temporal de sus emisiones acústicas.

ANEXO A: Representación Grupos de Impulsos

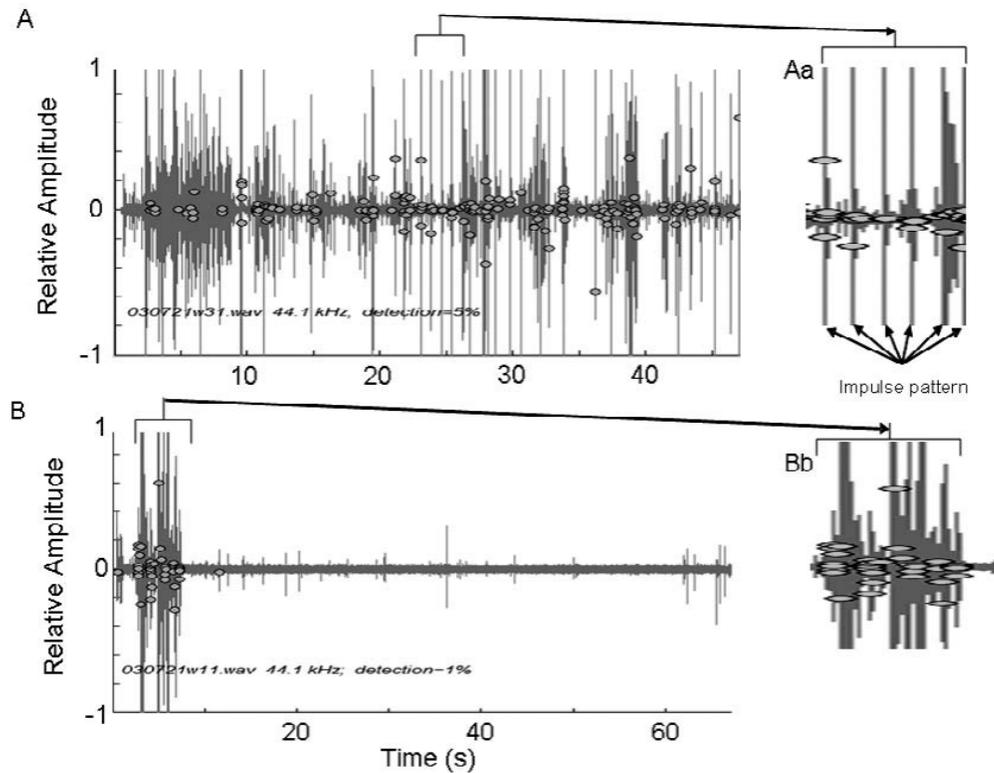


Figura A1: Identificación acústica de la actividad larvaria de RPW grabada desde una palmera infestada (A) y una no infestada (B), La línea continua indica la señal original y los óvalos indican identificación positiva de potencial actividad larvaria. La vista expandida (Aa) muestra impulsos regulares en el tiempo colectados en una palmera infestada, y la vista expandida (Bb) muestra impulsos irregulares grabados desde una palmera no infestada. Adaptada de “Temporal and spectral features of sounds of wood-boring beetle larvae: Identifiable patterns of activity enable improved discrimination from background noise” por Mankin *et al.*, 2008.

ANEXO B: Proyección de Estudios en Detección Acústica de Insectos

Tabla B1: Incremento a lo largo de las décadas en reportes que describen aplicaciones de la detección acústica de insectos.

Década	Número de Estudios	
	Mankin <i>et al.</i> , 2021	Mankin, 2012
1901-1910		1
1911-1920		1
1921-1930		2
1930-1940		4
1941-1950		0
1951-1960		5

1961-1970	1	4
1971-1980	2	4
1981-1990	6	22
1991-2000	14	44
2001-2010	46	50
2011-2020	133	
Total	202	137

Nota: Adaptado de “Automated applications of acoustics for stored product insect detection, monitoring, and management” por Mankin *et al.*, 2021.