



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL**

**ALERTAMIENTO VEGETAL DE *RAPHANUS SATIVUS* EN
LOS MECANISMOS DE RESISTENCIA Y TOLERANCIA:
EXPLORANDO EL PAPEL DE LA SEÑALIZACIÓN
ACÚSTICA**

TESIS

Que presenta:

Jorge Osmar López Ek

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical

Director de tesis:

Dr. Horacio Salomón Ballina Gómez

Conkal, Yucatán, México

Mayo, 2025



TecNM



Conkal, Yucatán, México a 13 de junio de 2025.

El comité de tesis del candidato a grado: Jorge Osmar López Ek, constituido por los CC. Dr. Horacio Salomón Ballina Gómez, Dra. Kati Beatriz Medina Dzul y Dr. Esaú Ruiz Sánchez, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **Alertamiento vegetal de *Raphanus sativus* en los mecanismos de resistencia y tolerancia: explorando el papel de la señalización acústica**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

ATENTAMENTE

Dr. Horacio Salomón Ballina
Gómez

Dra. Kati Beatriz Medina Dzul
Asesor de Tesis

Dr. Esaú Ruiz Sánchez
Asesor de Tesis



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



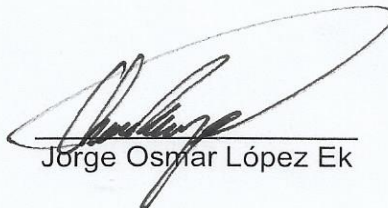
TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Conkal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Conkal, Yucatán, México a 13 de junio de 2025

DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.



Jorge Osmar López Ek

AGRADECIMIENTOS

A mi comité de Tesis por todos los consejos y guía durante todo este trabajo de investigación.

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Horacio por creer en mí y la idea de este proyecto, así como el apoyo brindado para la realización del trabajo de investigación.

A mis compañeros de generación maestría de por su apoyo.

Al Instituto Tecnológico Nacional de México campus Conkal y a sus profesores, así como a Conahcyt por apoyar la investigación científica.

A quienes me ayudaron en laboratorio durante los análisis.

A mi familia por todo el cariño otorgado

A mi hermano Aaron por brindarme todos sus conocimientos para la realización de este proyecto.

A José por todo el apoyo durante el establecimiento y muestreos del proyecto.

DEDICATORIA

A MOSI

*"Lo que está más abajo es como lo que está arriba,
y lo que está arriba es como lo que está abajo.
Actúan para cumplir los prodigios del Uno"*

Agradecimientos ii

Dedicatoria iii

Índice de contenido iv

Índice de cuadros y figuras v

RESUMEN vi

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL 7

1.1 Introducción general 7

1.2 Antecedentes 8

1.3 Hipótesis 23

1.4 Objetivos 23

1.4.1 Objetivo general 23

1.4.2 Objetivos específicos 23

1.5 Procedimiento experimental 24

1.6 Literatura citada 25

CAPÍTULO 2. LA SINFONÍA DE LAS PLANTAS: MECANISMOS DE SEÑALIZACIÓN ACÚSTICA PARA MEJORAR LA RESISTENCIA Y LA TOLERANCIA EN CULTIVOS HORTÍCOLAS 33

2.1 Resumen 33

2.2 Introducción 34

2.3 Materiales y métodos 34

2.3.1 Material vegetal, biológico y aislamiento acústico 34

2.3.2 Experimento 1. Restricción de la comunicación 35

2.3.3 Experimento 2. Comunicación aérea por señalización 36

2.4 Resultados 36

2.4.1 Restricción de la comunicación acústica 36

2.4.2 Comunicación aérea por señalización acústica 38

2.4.3 Análisis acústico (MFCC) 39

2.4.4 Fenoles foliares totales 41

2.5 Discusión 41

2.6 Conclusiones 44

ÍNDICE DE CUADROS Y/O FIGURAS

Figura 1.	Efecto de la restricción de comunicación vegetal de crecimiento vegetal (nula, total, aérea y terrestre) de <i>R. sativus</i> sobre el número de hojas (a), altura (b) y distancia de raíz(c), registrado en 0, 24, 48 horas. (Bonferroni, $p < 0.05$).	28
Figura 2.	Efecto de los tratamientos de exclusión de la comunicación (nula, aérea, terrestre y total) en plántulas de <i>R. sativus</i> en la orientación de la raíz, negativa (opuesto a la raíz del emisor) neutra y positiva (hacia la raíz de la planta emisora).	28
Figura 3.	Frecuencias vibratorias (Hz) de los tratamientos de comunicación vegetal (nula, total, aérea y terrestre) en <i>R. sativus</i> registrado en 0, 24, 48 horas. (Bonferroni, $p < 0.05$)	29
Figura 4.	Contenido de fenoles totales expresados como mg EAG por g b.s. en hojas de <i>Raphanus sativus</i> en los tratamientos (planta, herbivoría y emulación), registrado a los 45, 65 y 95 d.d.t. *GLMM $p < 0.05$.	32
Tabla 1.	Efecto de la comunicación aérea por señalización fitoacústica, en plántulas de <i>Raphanus sativus</i> sobre las variables de crecimiento y defesas físicas. Letras diferentes indican diferencias significativas (Bonferroni < 0.05).	31

RESUMEN

El significado ecológico de la aplicación de ondas acústicas en plantas puede tener gran relevancia en los cultivos hortícolas. Se evaluó la comunicación fitoacústica como respuestas de alertamiento en los mecanismos de resistencia y tolerancia de *Raphanus sativus*, en presencia de *Ascia monuste*. Se realizó el registro de frecuencias de vibración (Hz) entre plántulas emisoras (herbivoría) y receptoras (sin daño), con cuatro tipos de comunicación (nula, total, aérea y terrestre) en condiciones controladas. El estudio fue segmentado en dos experimentos; el experimento I) restricción de comunicación (nula, área, terrestre y total). Experimento II) comunicación aérea por señalización fitoacústica (t1: planta, t2: herbivoría y t3: emulación de Hz). Se registraron las variables de crecimiento (altura, hojas, peso seco, diámetro de raíz y bulbo), defensas físicas (grosor foliar, dureza foliar) y químicas (fenoles totales foliares). Los resultados obtenidos en el experimento I, el largo de raíz, indicó un mayor tamaño en plantas con comunicación total ($P<0.036$, χ^2 Wald 3.58), no hubo diferencias en altura ($P<0.223$, χ^2 Wald 1.55) y número de hojas ($P<0.309$, χ^2 Wald 1.23). Las plántulas emisoras, arrojaron un promedio de 6 Hz/s, mientras que el registro de Hz de las plántulas 48 h posteriores, fue mayor con un promedio de 11 Hz/s. En el experimento II dos, el factor tiempo tuvo efectos significativos en el peso seco, siendo mayor a los 45 ddt pero disminuye progresivamente. El diámetro incrementó con el tiempo a diferencia de la dureza que mostró una disminución conforme el avance del tiempo. En cuanto las defensas físicas, la dureza y el grosor presentaron un efecto inverso proporcional entre sí y en el tiempo, donde la dureza foliar (mm) fue mayor a los 95 ddt (0.52 ± 0.03), mientras que el mayor grosor foliar (mm) se registró a los 45 ddt (0.43 ± 0.02). Los fenoles totales foliares (mg EAG/g bs) fueron mayores en el tratamiento con herbivoría, en plantas emisoras a los 65 ddt ($3,58\pm0,05$) y en plantas receptoras a los 65 ddt ($3,76\pm0,05$). La comunicación sonora es más eficaz en medios aéreos, siendo más rápida en la transmisión de señales de alerta a plantas vecinas.

I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción.

Para superar su estilo de vida sésil, las plantas han desarrollado mecanismos para examinar su entorno dinámico en busca de mínimas señales que propicié condiciones favorables para su crecimiento y desarrollo. Las plantas también identifican señales que les ayuden a aclimatarse fisiológicamente hacia condiciones indeseables, por lo que, la sensibilidad de las plantas ha evolucionado a un nivel más que solo responder a los estímulos físicos como la 'luz' y 'temperatura' permitiendo, incluso percibir estímulos mecánicos como el tacto, el viento, la lluvia, etc. (Heggie y Halliday, 2005; Telewski, 2006; Mishra, 2016).

Mientras que respuestas de plantas al viento, tacto (Chehab *et al.*, 2009) y volátiles (Heil, 2010) han sido examinadas, el cual tiene un claro significado adaptativo (Appel, 2014). En la última década el estudio de las respuestas de las plantas ante el sonido ha tomado importancia (Khait, 2018), así mismo la detección de la emisión de sonidos en la planta (Khait, 2019).

Evolutivamente, la recepción y el procesamiento de la energía como ondas sonoras, tiene ciertas ventajas, ya que permite obtener información sobre el entorno, cercano o lejano. La percepción de vibraciones sonoras y/o mecánicas, donde organismos diversos han desarrollado una diversidad de órganos sensoriales con adaptaciones estructurales, morfológicas y funcionales, adaptado sus respuestas sensoriales acorde con las diversas fuentes, formas y medios a través de los cuales se propagan las vibraciones (Gagliano, 2012).

Muchos organismos, por ejemplo, los herbívoros y sus depredadores, responden al sonido. Se ha demostrado que las plantas responden a los sonidos, cambiando a nivel genético o fisiológicos, aumentando la concentración de azúcar en su néctar. Por lo tanto, si las plantas son capaces de emitir sonidos informativos en el aire, estos sonidos pueden potencialmente desencadenar un efecto rápido en los organismos cercanos, incluidos animales y plantas. Incluso si la emisión de los sonidos es

completamente involuntaria, simplemente el resultado de la condición fisiológica de la planta, los organismos cercanos que son capaces de escuchar los sonidos podrían usarlos para su propio beneficio (Khait, 2019).

Es así que, en los últimos 25 años, importantes investigaciones se han centrado en descubrir los mecanismos de señalización de las plantas. Por ejemplo, varios de estas investigaciones demostraron cómo, bajo diferentes tipos de estrés, las plantas emiten señales para advertir a las plantas vecinas sobre el estrés, de tal manera, que la planta estresada, ubicadas más lejos de las plantas estresadas, podrían recibir la señal de alerta e iniciar una estrategia de defensa (Falik *et al.*, 2011). La hipótesis es que las plantas pueden percibir y emitir esta alarma a través de vibraciones sonoras u ondas acústicas. Sin embargo, en la actualidad, los estudios científicos no han reportado mediciones confiables mecanismos que explican en detalle las habilidades comunicativas acústicas de plantas, en su mayoría se centra en cómo afecta los procesos fisiológicos cuando existe estimulación acústica y cómo esto puede traer beneficios agrícolas y beneficios biotecnológicos dejando frecuentemente relegados sus aspectos ecológicos. Por lo tanto, el significado ecológico de la aplicación de las ondas acústicas en las plantas puede tener gran relevancia, ya que permite la comprensión del mecanismo de detección de las ondas acústicas en las plantas, lo que podría ayudar a comprender cómo la planta percibe y transmite vibración sonora. Este conocimiento podría permitir generar tecnologías viables de bajo costo con el uso de ondas acústicas para maximizar los beneficios de las plantas en agricultura y biotecnología (Jaramillo *et al.*, 2018).

1.2 Antecedentes.

Mecanismos de resistencia y tolerancia vegetal

La resistencia de las plantas y la tolerancia a la herbivoría son determinantes cruciales que tienen un impacto significativo en la productividad de las plantas y la protección de los cultivos. La resistencia abarca una serie de características que disuaden a las plagas de establecerse, alimentarse y reproducirse, o que disminuyen su palatabilidad. Por el contrario, la tolerancia implica rasgos que minimizan los efectos negativos del daño causado por los herbívoros en el rendimiento y la productividad de las plantas.

Tanto la resistencia como la tolerancia son estrategias fundamentales para promover la agricultura sostenible y reducir la dependencia de los insumos químicos.

Las plantas poseen la capacidad de responder a la herbivoría a través de diversos mecanismos, que se activan al reconocer las señales asociadas a la herbivoría (HAC). Estas señales facilitan la mejora de las respuestas defensivas de las plantas contra los insectos herbívoros. La técnica de simulación de herbivoría, que incorpora estas señales, se ha empleado para investigar las respuestas de las plantas. Por ejemplo, cuando la polilla de la papa (*Phthorimaea operculella*) las somete a la herbivoría, las hojas de la papa muestran patrones similares de respuestas fitohormonales y transtómicas. El daño mecánico desencadena principalmente la activación de la señalización mediada por el ácido jasmónico (JA), mientras que las señales asociadas a los herbívoros derivadas de las amidas del ácido hidroxicinámico (PTM-HAC) desempeñan un papel importante a la hora de provocar la respuesta de defensa temprana de la planta (Mao *et al.*, 2022). La resistencia y la tolerancia de las plantas son atributos fundamentales que permiten a las plantas hacer frente a diversos tipos de estrés y plagas. La resistencia a los patógenos depende de dos mecanismos principales. En primer lugar, la resistencia puede verse facilitada por la capacidad de la planta para restringir la multiplicación de patógenos, proporcionando así una protección eficaz contra las enfermedades (Pagán, 2018).

Por el contrario, la tolerancia de las plantas se refiere a su capacidad de regenerarse y reproducirse tras un daño provocado por los herbívoros, como se indica en el artículo de referencia (Strauss, 1999). Numerosos estudios han explorado estos rasgos en diferentes especies de plantas. Minarro y Dapena (2007) descubrieron que los cultivares de manzana presentaban resistencia al pulgón *Dysaphis plantaginea* basándose en la fenología de los árboles. Además, observaron que los cultivares de manzana resistentes también demostraban tolerancia a los pulgones rosados de la manzana (Minarro y Dapena, 2008).

En otra investigación, Minarro *et al.* (2005) evaluaron la colonización de huertos de manzanos por depredadores de *Dysaphis plantaginea* y las consiguientes implicaciones para el control biológico. Además, Minarro *et al.* (2010) examinaron el papel de las hormigas en la organización de la comunidad de pulgones en los huertos de manzanos.

Estas investigaciones proporcionan información sobre los mecanismos por los que los cultivares de manzana muestran resistencia y tolerancia a las plagas.

Herbivoría en las plantas

La herbivoría puede caracterizarse como una interacción antagónica, en la que los herbívoros ejercen un impacto perjudicial sobre el crecimiento y la reproducción de las plantas (Delphia, 2009; Díaz, 2015). Al aumentar las tasas de mortalidad y agotar la biomasa utilizable para el crecimiento y la reproducción, los herbívoros ejercen una presión selectiva sobre las especies de plantas, lo que lleva al desarrollo de estrategias defensivas (Del Val, 2012). En consecuencia, cualquier atributo que mejore la aptitud biológica de las plantas en presencia de herbívoros, pero no en su ausencia, se clasifica como mecanismo de defensa (Karban, 1997; Madriaza, 2017). En respuesta, las plantas han desarrollado estrategias para contrarrestar los efectos adversos de los herbívoros, siendo la resistencia y la tolerancia las principales estrategias identificadas (Kessler, 2002; Weining, 2003; Valverde *et al.*, 2007; Díaz, 2015).

La tolerancia y la resistencia son dos estrategias distintas empleadas por las plantas contra la herbivoría, y algunos estudios sugieren que las plantas asignan recursos simultáneamente a ambas estrategias, lo que resulta en una combinación de patrones defensivos (Núñez *et al.*, 2007). La tolerancia de una planta hacia un herbívoro se hace evidente solo cuando el herbívoro ataca a la planta, ya que se considera un rasgo inducido que permite a la planta compensar los efectos negativos causados por la alimentación del herbívoro (Karban, 1997; Strauss, 1999; Núñez *et al.*, 2007; Díaz, 2015). Según Strauss (1999), la tolerancia puede definirse como la capacidad de las plantas para sobrevivir, regenerarse y/o reproducirse tras el daño causado por los herbívoros.

Entre los mecanismos por los que las plantas muestran tolerancia a la herbivoría (Strauss, 1999; Thompson *et al.*, 2003; Madriaza, 2017) se encuentran entre los mecanismos por los que las plantas muestran tolerancia a la herbivoría (Strauss, 1999; Thompson *et al.*, 2003).

Los rasgos de resistencia pueden ser constitutivos o inducidos e impactan directamente en el desarrollo de los herbívoros. Algunos ejemplos de mecanismos de resistencia incluyen la producción de defensas químicas o físicas que influyen directamente en el desarrollo de los herbívoros (Valverde, 2007). Por lo general, estas defensas se evalúan con prontitud (Salgado-Luarte, 2010). Las defensas químicas implican la producción de metabolitos secundarios en las plantas, mientras que las defensas físicas se manifiestan en forma de tricomas o espinas que se encuentran en varias partes de la planta (Strauss *et al.*, 2003; Díaz, 2015).

La mayoría de los metabolitos secundarios sintetizados por la planta cuando se enfrenta a un ataque se consideran agentes protectores debido a su alta toxicidad para numerosos insectos y microorganismos, lo que evita infestaciones extensas, un consumo excesivo y limita los daños. Algunos ejemplos de estos metabolitos secundarios son los terpenos, alcaloides y fenilpropanoides (Baldwin *et al.*, 2001; Schardl, 2002).

Sin embargo, debido al considerable costo metabólico que imponen a la planta o a su limitada eficacia contra herbívoros especializados, las plantas pueden optar por la selección por tolerancia, ya que la resistencia resulta ser una estrategia menos factible (Strauss, 1999). Esto se debe a que los recursos disponibles para las plantas en su hábitat natural son limitados y, para maximizar una función en particular, es necesario reducir los recursos disponibles para otras funciones.

En consecuencia, ante la escasez de recursos en un hábitat determinado, debe haber una asignación de recursos que minimice el equilibrio entre costos y beneficios. Estos desafíos de asignación de recursos se denominan comúnmente compromisos o compensaciones (Stearns 1989; Madriaza, 2017). Sin embargo, las plantas pueden emplear un mecanismo de comunicación intraespecífico e

interespecífico más rentable e igualmente eficaz en comparación con la producción de compuestos orgánicos volátiles (COV): la emisión de frecuencias sonoras o vibratorias.

Comunicación vegetal

La comunicación vegetal es un fenómeno bien documentado que implica el intercambio de información entre plantas a través de diversos mecanismos como compuestos orgánicos volátiles (COV), señales eléctricas y exudados radiculares. Los COV, incluidos los volátiles vegetales inducidos por herbívoros (HIPV), juegan un papel crucial en la mediación de la transferencia de información entre los tejidos vegetales y pueden afectar las interacciones de los organismos vegetales, la dinámica de la población y la dinámica del ecosistema (Kessler, 2023). Se ha observado actividad eléctrica en plantas y cuerpos micorrízicos, y estudios recientes sugieren que las plantas pueden comunicarse entre sí eléctricamente a través de vías miceliales aisladas conductivamente (Hassan, 2022; Matthew, 2022). Los exudados de raíz contienen metabolitos primarios y secundarios que pueden influir en el comportamiento de herbívoros, nematodos y microbios, y también pueden servir como señales para microbios beneficiosos y sustancias patógenas (Kaur, 2022). Estos hallazgos resaltan la complejidad de la comunicación de las plantas y su importancia en la configuración de las interacciones de las plantas, la estructura de la comunidad y el funcionamiento del ecosistema.

Las plantas pueden percibir señales de estrés de otras plantas mediante la liberación de compuestos orgánicos volátiles (COV) en respuesta a estímulos de estrés, como el ataque de herbívoros o la infección por patógenos. Las plantas pueden "espiar" las señales químicas volátiles de sus vecinos estresados y se han adaptado para utilizar estas señales en el aire para prepararse para un peligro inminente sin tener que experimentar el estrés real. El papel de los COV en la comunicación entre plantas ha ganado una atención significativa durante la última década, particularmente con respecto al potencial de los COV para preparar plantas no estresadas para respuestas de defensa más sólidas a futuros desafíos

de estrés (Midzi, 2022). Se ha debatido mucho la relevancia ecológica de tales interacciones bajo diversas tensiones ambientales y existe una comprensión incipiente de los mecanismos implicados.

Las plantas son capaces de generar sonidos tanto en frecuencias bajas como altas (10-300 kHz) al ejercer tensión en su xilema a través de la cavitación, que puede ser causada por factores como el estrés por sequía (Rosner, 2006; Perks, 2004). Esta tensión da lugar a la formación de burbujas de gas dentro del xilema (Laschinke, 2006), así como a la actividad respiratoria y del cambium (Zweifel, 2008) o a los movimientos de los orgánulos (Gagliano, 2013).

Estudios recientes han demostrado que las plantas pueden producir sonidos incluso en ausencia de oxígeno, lo que demuestra su capacidad para emitir sonidos en condiciones de estrés inducidas por la sequía y los procesos de cavitación. Por ejemplo, las raíces jóvenes del maíz emiten sonidos parecidos a chasquidos cuando se sumergen en el agua (Gagliano, 2012; Schöner, 2016).

Planta-Planta

La comunicación química entre plantas es un fenómeno fascinante que afecta su crecimiento y desarrollo de varias formas. A través de la emisión de moléculas, las plantas pueden comunicarse entre sí y con otros organismos, como insectos herbívoros y enemigos naturales. Esta comunicación tiene un papel importante en la defensa de las plantas contra los insectos fitófagos.

Cuando las plantas son atacadas por insectos herbívoros, liberan moléculas que actúan como neurotransmisores. Estas moléculas sirven como señales químicas para advertir a otras plantas cercanas sobre la presencia de los insectos y estimulan la adopción de medidas preventivas y de defensa. El frijol de lima (*Phaseolus lunatus*), sirve como ejemplo de plantas que emiten señales químicas como medio de alertar a otros sobre un peligro potencial. En su estudio, Kost y Heil (2006) descubrieron que cuando esta especie sufre daños causados por herbívoros, no solo desencadena la producción de compuestos volátiles

en sus hojas, sino que estos compuestos también actúan como señales químicas que sirven para atraer organismos como los parasitoides (Salazar, 2022).

En otra investigación, De Moraes *et al.* (1998) observaron que especies económicamente importantes, como el maíz, el tabaco y el algodón, provocan la producción de compuestos volátiles específicos en respuesta a los daños causados por determinados herbívoros. Esta capacidad de los compuestos volátiles para funcionar como señales altamente específicas permite a los parasitoides detectar eficazmente los herbívoros a los que parasitarán. Además de la comunicación con insectos herbívoros, las plantas también pueden comunicarse con otros organismos, como bacterias, a través de señales químicas. Castro *et al.*, (2008) menciona que las bacterias utilizan un "lenguaje químico" para comunicarse y coordinar actividades como la regulación de genes y la formación de biopelículas. Esta comunicación planta-bacteria tiene un impacto significativo en la salud y el desarrollo de las plantas.

Por un lado, cuando se trata de interacciones subterráneas entre plantas, el proceso de selección natural ha favorecido el desarrollo de mecanismos que permiten a las plantas emitir y recibir señales químicas con el fin de comunicarse desde las raíces. A modo de ejemplo, Gfeller *et al.*, (2019) demostraron que los compuestos volátiles específicos liberados por las raíces de la especie *Centaurea stoebe* favorecen la germinación y el crecimiento de las especies vecinas al mejorar varios procesos fisiológicos.

Planta-Herbívoro

En la interacción entre plantas y herbívoros, a pesar de su connotación negativa, las plantas poseen la capacidad de compensar la pérdida de tejido causada por la herbivoría, lo que se traduce en un aumento

de la productividad. Este proceso crucial desempeña un papel importante a la hora de mantener la productividad primaria, reducir el predominio de las especies hospedadoras y facilitar el ciclo de los nutrientes (Lohnes, 2021). La interacción entre plantas y herbívoros, facilitada por la señalización de planta a planta, se ha observado en numerosas especies. Orman (2022) estudió, como la conducta alimentaria de los herbívoros en las plantas se veía afectada por el contacto previo con una planta dañada, y si el impacto de la señalización entre plantas variaba según los diferentes genotipos. Descubrió que, en promedio, los caracoles pasaban más tiempo en las plantas que habían estado en contacto con una planta dañada y las consumían en mayor medida. Sin embargo, la influencia de la señalización de planta a planta en el comportamiento de los caracoles varió según el genotipo. Mediante estudios de asociación de todo el genoma, se descubrió que una pequeña cantidad de variaciones genéticas asociadas con la capacidad de afrontar el estrés y la vía del jasmonato explicaban esta variabilidad.

La actividad de alimentación de los herbívoros de *A. thaliana* se vio alterada por la señalización entre las plantas. Estos hallazgos plantean dudas sobre la teoría subyacente a la dinámica evolutiva de las interacciones entre plantas y herbívoros facilitadas por la señalización de planta a planta. (Orman, 2022).

La disponibilidad de agua también juega un papel en las interacciones planta-herbívoro, con déficit de agua que mejora la resistencia de las plantas y los rasgos de escape contra la herbivoría, pero afectando negativamente otras estrategias de defensa (Lin *et al.*, 2022).

Los microorganismos asociados con los herbívoros desempeñaron un papel fundamental en la modulación de las respuestas de las plantas y en la inhibición de las defensas de las plantas contra los herbívoros. Swetha (2020) determinó que los microorganismos fueron responsables de la desintoxicación de las toxinas de las plantas, así como, la regulación del sistema inmunitario del huésped y del suministro de nutrientes a las plantas. La identificación de los microorganismos que alteran las interacciones entre plantas e insectos y la comprensión de sus características fisiológicas pueden servir como un medio para proteger a las plantas del daño causado por los insectos (Gregg, 2008).

Comunicación planta-herbívoro-enemigo

Las interacciones planta-herbívoro-enemigo natural son complejas e influenciadas por diversos factores. Los estudios han demostrado que las plantas de la familia Fabaceae albergan una comunidad diversa de insectos herbívoros y sus enemigos naturales (Ferreira et al., 2023). La diversidad filogenética de las comunidades vegetales también puede influir en la interacción entre plantas, herbívoros y sus enemigos naturales, Alavez *et al.*, (2023) determinó la influencia de la diversidad filogenética en las comunidades vegetales sobre las complejas interacciones entre plantas, herbívoros y sus enemigos naturales. Las comunidades que albergan especies filogenéticamente diversas revelaron una diversidad de rasgos funcionales y nichos ecológicos, ejerciendo impactos significativos en las interacciones competitivas entre plantas y modelando la calidad de alimentos y hábitat para herbívoros y sus depredadores naturales. Con el fin de investigar estos fenómenos, se establecieron parcelas experimentales de árboles tropicales, implementando tratamientos de alta y baja diversidad filogenética. Las especies pioneras destacaron tanto en crecimiento como en niveles fenólicos en las parcelas con alta diversidad filogenética. Contrastando, en las parcelas con baja diversidad filogenética, se registró un mayor daño herbívoro, acompañado de una menor producción de defensas por parte de las plantas pioneras. Asimismo, se observó un incremento en la actividad depredadora en modelos arcillosos dentro del tratamiento de baja diversidad filogenética, pero este fenómeno fue específico para especies no mirmecofíticas.

La inexistencia de una población vegetal infectada conlleva a la ausencia de patógenos en el sistema, posibilitando la coexistencia armoniosa de plantas, herbívoros y sus enemigos naturales. Basara *et al.*, (2022) desarrolló un modelo matemático detallado de las interacciones planta-patógeno-herbívoro, que incorpora el efecto Allee y considerando el factor de cosecha. El análisis del modelo reveló la estabilidad del sistema e identificó condiciones cruciales para la coexistencia de todas las especies. Se determinó que la tasa de crecimiento intrínseco de las plantas debe superar la tasa de cosecha para mantener la coexistencia. Además, la falta de plantas susceptibles lleva a que los herbívoros emigren en busca de alimento, mientras otras especies experimentan deterioro y mortalidad. Las defensas de las plantas son adaptaciones que reducen el daño causado por herbívoros y patógenos. Las defensas químicas, como las toxinas, han evolucionado a través de una carrera armamentista con enemigos naturales. Estas defensas conllevan un costo para las plantas en términos de energía y nutrientes, y solo evolucionan cuando los beneficios superan los costos. Diferentes hábitats pueden favorecer inversiones

distintas en defensas, reflejando los costos subyacentes y el potencial de daño a las plantas (Endara, 2024).

Los efectos indirectos de los patógenos vegetales en niveles tróficos superiores en sistemas tritróficos fueron estudiados por Srisakrapikoop (2020) a través de un metaanálisis de 29 estudios primarios. En general, no se observó un efecto significativo de los patógenos vegetales en los rasgos de enemigos naturales, ya que las diferencias entre los tipos de patógenos ocultaron sus efectos. Sin embargo, la infección por hongos patógenos de plantas tuvo efectos negativos indirectos en el rendimiento y la preferencia de los enemigos naturales, afectando a los gremios de herbívoros de insectos masticadores y chupadores-picadores. En contraste, la infección por patógenos bacterianos de plantas tuvo un efecto positivo en los enemigos naturales (parasitoides) de herbívoros masticadores. La presencia de patógenos virales de plantas no mostró un efecto claro en los enemigos naturales, aunque la preferencia de los parasitoides podría verse afectada positivamente. Se recomiendan estudios adicionales que examinen los efectos de los patógenos vegetales en niveles tróficos superiores en sistemas tritróficos.

Comprender estas interacciones es importante para las estrategias de conservación y manejo, así como para abordar los impactos de las actividades humanas en la dinámica del enemigo planta-herbívoro-natural. Se necesita más investigación para explorar los mecanismos específicos y las consecuencias de estas interacciones en diferentes contextos ecológicos.

Comunicación por vibración en las plantas

La idea de que se tiene el como sucede la propagación del sonido por medio de las vibraciones sonoras y su efecto en la materia, tiene una fuerza capaz de crear y destruir formas, generan procesos y actúan como elemento regulador en la naturaleza. Weltharmonik, astrónomo y matemático moderno Johannes Kepler en 1619, propusieron un tratado (Kepler, 1971), sitúa a la música y sus leyes como fuerza determinante para la estructuración de naturaleza y movimientos celestes. Arthur Schopenhauer, en su obra fundamental “El mundo como voluntad y como representación” (Schopenhauer, 2005; Silveira, 2008) da a la música una posición destacada y toma importancia en el desarrollo permanente en los seres vivos, sobresaliendo al ser humano.

La comunicación de la planta vibratoria es un fenómeno observado en diversos contextos. Las chinches apestosas, como *Chinavia impicticornis*, *C. ubica* y *Euschistus heros*, se comunican a través de señales vibratorias transmitidas por sustrato producidas por la vibración del abdomen. Las bandas espectrales de frecuencia de las señales de zumbido se extienden a varios kHz por encima de aproximadamente 100 Hz, que es la frecuencia fundamental y significativamente mayor en *E. heros* en comparación con ambas especies de *Chinavia* (Čokl, 2021).

El fenómeno de las vibraciones de las plantas abarca una amplia gama de temas, que abarcan desde el suave balanceo de los árboles con el viento hasta la propagación de ondas elásticas causadas por insectos en las hojas, que sirven como medio de comunicación con los organismos vecinos. El estudio realizado por Langre (2019), proporcionó una descripción completa de los principales hallazgos y obstáculos encontrados en el campo de las vibraciones de las plantas. El análisis abarca múltiples escalas, que van desde las diminutas y localizadas, como las hojas o los frutos, hasta las amplias copas de numerosas plantas.

La comunicación vibratoria entre insectos y plantas, se observado, que la transmisión de vibraciones a lo largo de los tallos de las plantas afecta las señales, con variabilidad entre especies y partes de plantas. Reginald (2006) estimaron la magnitud de la variación relacionada con el sustrato en las señales de anuncio de pareja de un saltamontes. Se registraron señales masculinas en dos especies de plantas, notándose influencias en las características espectrales y temporales según la distancia y la planta.

A pesar de pequeñas variaciones, se encontró una repetibilidad significativa de las características de las señales dentro de los individuos en diferentes sustratos de plantas. La comunicación láser por satélite es sensible a las vibraciones de la plataforma óptica, lo que lleva a la fluctuación óptica, que se puede controlar utilizando técnicas de control de retroalimentación adaptativa (Zheng-yan, 2013). Con estas tecnologías se ha podido realizar estudios más precisos sobre la comunicación vegetal por medio de vibraciones, Appel *et al.*, (2014), utilizando un vibrómetro láser Doppler, reprodujeron experimentalmente las vibraciones de alimentación de la oruga *P. rapae* mediante actuadores piezoeléctricos. Antes de la reproducción, se caracterizó la respuesta de frecuencia de cada actuador y se

diseñó un filtro digital para compensar esa respuesta, basándose en el comportamiento de alimentación de las orugas de *P. rapae*.

Comunicación vegetal por señales acústicas

Aristóteles describió la distinción entre animales y plantas basándose en la capacidad de sentir y responder ante estímulos de manera “premeditada”, esta idea ha prevalecido durante mucho tiempo. Sin embargo, estudios en décadas pasadas, se puede comprobar los rápidos movimientos sensoriales exhibido por las plantas carnívoras. Con esto surge una pregunta inmediata: si las plantas pueden sentir el tacto, ¿por qué no pueden sentir también el sonido? Los estudios sobre acústica de plantas comenzaron en la década de 1950. con varios informes controversiales que afirman el efecto de sonido musical en las plantas (Ekici *et al.*, 2007).

Anteriormente, los agricultores y varios científicos de China y Corea del Sur aplicaron a las plantas la llamada "música verde" para mejorar la calidad, salud y rendimiento de las plantas (Qin *et al.*, 2003). Los resultados fueron a veces inconsistentes y muy variables dependiendo del lugar. Además, el sonido utilizado en estos experimentos no estaba estandarizado, y no se realizaba en hertzios (vibración) y decibelios (fuerza) uniformes y consistentes, por el cual estos estudios utilizaron (fuerza) de las señales, utilizando diferentes estilos de música para el tratamiento sonoro (Qin *et al.*, 2003). Sin embargo, estudios recientes que utilizan tecnología adecuada para el control de calidad de los niveles de hertzios y decibelios, así como la integración de “big data” han contribuido a cambiar el estado de este campo (Gagliano *et al.*, 2012; Chowdhury *et al.*, 2014; Mishra *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2018).

Se sabe que las plantas producen ultrasonidos de baja y alta frecuencia (10-300 kHz) (Kikuta, 1997; Laschimke, 2006), siendo el resultado de una rápida disminución de las tensiones localizadas en la xilema de las plantas tras la cavitación, por ejemplo, debido a estrés por sequía (Perks, 2004; Rosner, 2006), de un sistema de burbujas en la xilema, la respiración y la actividad metabólica del crecimiento del cambium (Zweifel, 2008) o del movimiento de los orgánulos. Investigaciones recientes demuestran que las plantas son capaces de producir sonido en presencia de estrés por sequía y procesos de cavitación. Las raíces jóvenes del maíz, por ejemplo, producen sonidos similares a los de un “clic” cuando se

sumergen en el agua (Gagliano, 2012). Sin embargo, hasta el momento no se han encontrado pruebas de estos sonidos con fines de comunicación (Michael *et al.*, 2016).

Cuando las plantas son consumidas por herbívoros, se producen múltiples sonidos, estos sonidos del propio herbívoro caminando o vocalizando, sonidos del proceso de masticación, que podría hacer vibrar directamente la planta, así como viajar por el aire, sabe que las plantas emiten compuestos orgánicos volátiles (COV) que alertan plantas cercanas por el posible ataque de estos organismos (Khait, 2019). Sin embargo, la producción de estos metabolitos de alertamiento puede ser muy costosos para la planta, por lo que la emisión de sonidos es una de las alternativas más adecuadas para transmitir el mensaje rápidamente.

Alertamiento vegetal (Plant defense priming)

La importancia del alertamiento en plantas (plant defense priming), se define como un rasgo adaptativo para el ajuste de la defensa de la planta en entornos impredecibles (estrés biótico o abiótico). Este mecanismo de alerta, es postulado como adaptativo ya que la planta expresa una estrategia de bajos costos de energía. A su vez, las respuestas de defensa se implementan de manera más rápida y fuerte de manera sostenida al percibir por volátiles una señal desafiante próxima a suceder (Pastor, 2013). Implicando mecanismos complejos que permiten a las plantas responder de manera más eficiente a los factores estresantes y los desafíos ambientales. Uno de los mecanismos clave es la modificación de la expresión genética, que permite a las plantas activar vías de defensa específicas e iniciar respuestas al estrés. La preparación también puede implicar cambios en el equilibrio hormonal dentro de las plantas, lo que lleva a una mayor tolerancia al estrés y un mejor crecimiento y desarrollo. Los factores ambientales

como la temperatura, la luz y la disponibilidad de nutrientes pueden influir en el proceso de cebado, así como los factores genéticos que determinan la capacidad inherente de la planta para cebarse. Comprender estos mecanismos es crucial para desarrollar aplicaciones efectivas de la preparación en agricultura y horticultura, como la preparación de semillas para la mejora de cultivos y técnicas de manejo del estrés en las plantas (Sen y Puthur, 2020).

Las plantas son capaces de activar sus defensas en respuesta a información proporcionada por sus vecinas, aparte de hacer su defensa más efectiva pueden tener ventaja sobre las plantas que no reconocen esa información (Dicke *et al.*, 2003). Este estado de alerta, se caracteriza por cambios registrados en la cromatina y la acumulación de ARNm, con un papel de señalización de defensa al activar los receptores de reconocimiento de patrones, inducir y acumular proteínas, metabolitos y otros componentes moleculares que se aceleran en la acumulación e inducción más rápido y fuertemente ante un acontecimiento de estrés (Martínez, 2016).

Las plantas pueden volverse más resistentes y productivas bajo diversas señales ambientales mejorando la resistencia de las plantas contra plagas y enfermedades mediante la preparación de la inmunidad de las plantas (Cooper, 2022). El priming proporciona una protección duradera de amplio espectro contra plagas y enfermedades (Turgut-Kara, 2020). Estudios recientes han revelado la importancia y el compromiso dinámico de los mecanismos epigenéticos, como la metilación del ADN y las modificaciones de histonas que están estrechamente relacionadas con la reconfiguración de la cromatina, en la adaptación de las plantas a diferentes estreses bióticos.

El alertamiento puede estar mediado por mecanismos epigenéticos que tienen funciones fundamentales en el control de la expresión génica mediante la metilación del ADN, modificaciones de histonas y ARN pequeños (Espinas, 2016). Estas modificaciones podrían transmitirse a las próximas generaciones, proporcionando mecanismos alternativos para constituir memorias de estrés en las plantas (Liu X, 2022). Las reducciones inducidas por el estrés en la hipometilación del ADN en los elementos transponibles pueden preparar genes de defensa. El alertamiento se puede aprovechar en la protección de cultivos y es necesario trasladar los resultados de la investigación del sistema modelo *Arabidopsis* a los cultivos (Shering, 2022).

1.3 Hipótesis.

En los últimos años se han registrado diversas respuestas de alertamiento de defensa vegetal en varias especies, mayormente por vía comunicación de compuestos volátiles orgánicos y en menor medida por vibraciones acústicas. Por tanto, es posible que este alertamiento vegetal sea activado por las plantas de rábano (*Raphanus sativus*) en forma de frecuencias acústicas, en respuesta al daño causado por su herbívoro natural, la larva de lepidoptero *Ascia monustes*.

1.4 Objetivos.

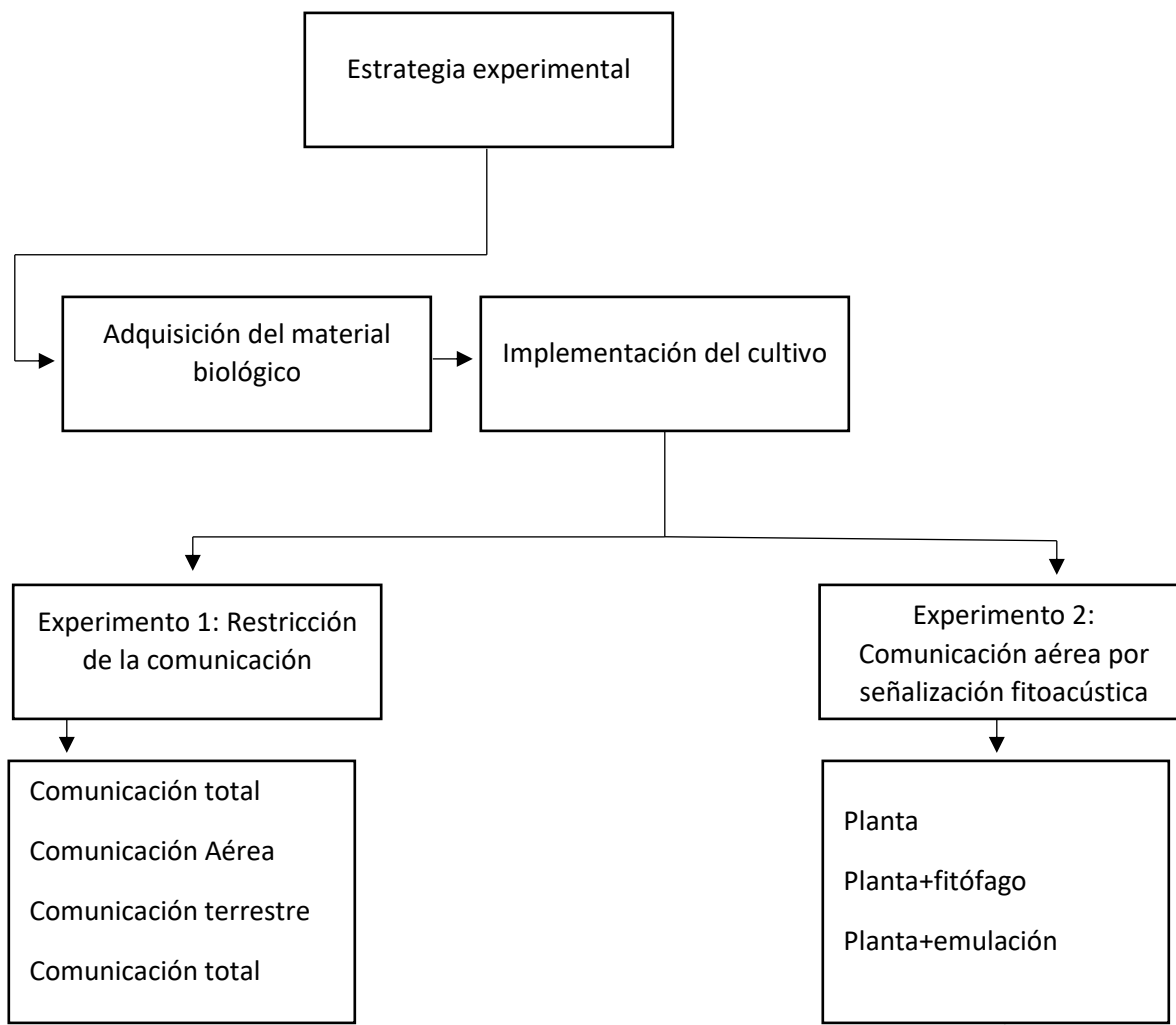
General

Evaluar el alertamiento vegetal activado por señales acústicas de *Raphanus sativus* de sus mecanismos de resistencia y tolerancia, en respuesta al daño causado por la larva de lepidóptero *Ascia monuste*.

Específicos

- Identificar las frecuencias vibratorias específicas (Hz) como señales acústicas emitidas por *Raphanus sativus* en respuesta a la presencia de *Ascia monuste*.
- Evaluar la inducción de los mecanismos de tolerancia (altura de la planta, número de hojas, diámetro y orientación de las raíces) y resistencia (defensas físicas: grosor y dureza, y químicas: fenoles foliares totales).
- Evaluar la dinámica temporal de la señalización acústica de *Raphanus sativus* en intervalos de tiempo (0, 0,01, 24 y 48 horas) después de la exposición a *Ascia monuste*.

1.5 Procedimiento experimental.



1.6 Literatura citada.

- A., & Puthur, J. T. (2020). Seed priming-induced physiochemical and molecular events in plants coupled to abiotic stress tolerance: an overview. Priming-mediated stress and cross-stress tolerance in crop plants, 303-316.
- Andrade e Silva, J., & Lochak, G. (1969). The quants. Guadarrama Editions.
- André, Kessler., Michael, B., Mueller., Aino, Kalske., Alexander, Chautá. (2023). Volatile-mediated plant–plant communication and higher-level ecological dynamics. *Current Biology*, doi: 10.1016/j.cub.2023.04.025.
- Andrej, Čokl., Alenka, Žunič, Kosi., Maria, Carolina, Blassioli, Moraes., Miguel, Borges., Raul, Alberto, Laumann. (2021). Stink Bug Inter-Plant Communication with Signals Produced by Vibration of Lifted Wings. *Journal of Insect Behavior*, 34(4):194-210. doi: 10.1007/S10905-021-09780-2.
- Apel, W. (1945). *Harvard dictionary of music*. Cambridge: Harvard University Press.
- Benade, A. H. (1976). *Fundamentals of musical acoustics: the simplest musical implication of characteristic*. (2nd ed.). New York: Dover Publications. pp. 50-69.
- Cespédes, J. (2014). Influence of the sound frequency of 528 Hz on the germination of seeds of *Chenopodium quinoa* (Quinoa) Arequipa. Thesis. Professional School of Biotechnology Engineering, Arequipa, Peru.
- Chehab, E. W., Eich, E., & Braam, J. (2009). Thigmomorphogenesis: a complex plant response to mechanostimulation. *Journal of Experimental Botany*, 60, 43–56.
- Chowdhury, M. E. K., Lim, H., & Bae, H. (2014). Update on the effects of sound waves on plants. *Research in Plant Disease*, 20, 1–7.
- Čokl, A., Žunič-Kosi, A., Stritih-Peljhan, N., Blassioli-Moraes, M. C., Laumann, R. A., & Borges, M. (2021). Stink Bug Communication and Signal Detection in a Plant Environment. *Insects*, 12(12), 1058. doi: 10.3390/insects12121058.
- Cooper A, Ton J. Immune priming in plants: from the onset to transgenerational maintenance. *Essays Biochem*. 2022 Sep 30;66(5):635-646. doi: 10.1042/EBC20210082. PMID: 35822618; PMCID: PMC9528079.

- David, Lohnes. (2021). Herbivory. 567-622. doi: 10.1016/b978-0-323-85673-7.00006-x
- De Juana, J. M. (2003). General Physics. Spain: Pearson Education.
- De Moraes, C. M., Lewis, W. J., Paré, P. W., Alborn, H. T., y Tumlinson, J. H. (1998, 11 de junio). Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids, *Nature*, 393, 570-573.
- Del Stabile, F., Marsili, V., Forti, L., & Arru, L. (2022). Is There a Role for Sound in Plants? *Plants (Basel)*, 11(18), 2391. doi: 10.3390/plants11182391.
- Dicke, M., Takabayashi, J., Posthumus, M. A., Schütte, C., & Krips, O. E. (1998). Plant-phytoseiid interactions mediated by herbivore-induced plant volatiles: variation in signal production and responses of predatory mites. *Experimental and Applied Acarology*, 22, 311–333.
- Ekici, N., Dane, F., Mamedova, L., Metin, I., & Huseyinov, M. (2007). The effects of different musical elements on root growth and mitosis in onion (*Allium cepa*) root apical meristem (musical and biological experimental study). *Asian Journal of Plant Sciences*, 6, 369–373.
- Emmanuel, de, Langre. (2019). Plant vibrations at all scales: a review.. *Journal of Experimental Botany*, 70(14):3521-3531. doi: 10.1093/JXB/ERZ209
- Espinas NA, Saze H, Saijo Y. Epigenetic Control of Defense Signaling and Priming in Plants. *Front Plant Sci*. 2016 Aug 11;7:1201. doi: 10.3389/fpls.2016.01201. PMID: 27563304; PMCID: PMC4980392.
- Falik, O., Mordoch, Y., Quansah, L., Fait, A., & Novoplansky, A. (2011). Rumor has it...: relay communication of stress cues in plants. *PLoS One*, 6.
- Gagliano, M. (2013). Green symphonies: a call for studies on acoustic communication in plants. *Behavioral Ecology*, 24(4), 789-796. doi: 10.1093/beheco/ars206.
- Gagliano, M., Grimonprez, M., Depczynski, M., et al. (2017). Tuned in: plant roots use sound to locate water. *Oecologia*, 184, 151–160. <https://doi.org/10.1007/s00442-017-3862-z>.
- Gagliano, M., Mancuso, S., & Robert, D. (2012). Towards understanding plant bioacoustics. *Trends in Plant Science*, 17, 323-325.

- Gerges, S. N. Y., & Arenas, J. P. (2004). Fundamentals and control of noise and vibrations. Florianópolis, 1st edition, NR editor.
- Gianoli, E., & Salgado-Luarte, C. (2017). Tolerance to herbivory and the Resource Availability Hypothesis. *Biology Letters*, in press.
- Gregg, A., Howe., Georg, Jander. (2008). Plant Immunity to Insect Herbivores. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1):41-66. doi: 10.1146/ANNUREV.ARPLANT.59.032607.092825
- Guijarro-Rodríguez, A. A., Torres, L. J. C., Preciado-Maila, D. K., & Manzur, B. N. Z. (2018). Automated irrigation system with Arduino. *System*, 39(37), 27.
- Hassan, Vatandoost. (2022). The Communication of Plants and Creatures in the World. *Journal of marine science research and oceanography*, doi: 10.33140/jmsro.05.03.01
- Heggie, L., & Halliday, K. J. (2005). The highs and lows of plant life: temperature and light interactions in development. *International Journal of Developmental Biology*, 49, 675–687.
- Heil, M., & Karban, R. (2010). Explaining evolution of plant communication by airborne signals. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(3), 137–144.
- Heinze, J. (2020). Herbivory by aboveground insects impacts plant root morphological traits. *Plant Ecology*, 221, 725–732. doi: 10.1007/s11258-020-01045-w.
- Heinzen, J., Krumpholz, L., Blaum, N., Hoefgen, R., & Ogden, M. (2021). Shoot herbivory by grasshoppers has stronger effects on root morphology than clipping. *Plant Ecology*, 223, 1069–1078.
- Isaac, K., Barasa., Samuel, B., Apima., Amos, O., Wanjara. (2022). Mathematical Modelling of Plant-Pathogen-Herbivore Interaction Incorporating Allee Effect and Harvesting. *Journal of advances in mathematics and computer science*, 23-38. doi: 10.9734/jamcs/2022/v37i91711
- Izzo, L. G., Romano, L. E., De Pascale, S., Mele, G., Gargiulo, L., & Aronne, G. (2019). Chemotropic vs Hydrotropic Stimuli for Root Growth Orientation in Microgravity. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1547. doi: 10.3389/fpls.2019.01547.
- Jaramillo, A., Galvan, C., Mier, L., Garcia, S., & Medina, L. (2018). Effects of acoustic wave on plants: an agricultural ecological molecular and biochemical perspective. *Scientia Horticulturae*, 235, 340-348.

- Jung, J., Seon-Kyu, Kim Y., Jeong Mi-Jeong, Ryu Choong-Min. (2018). Beyond Chemical Triggers: Evidence for Sound-Evoked Physiological Reactions in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 1664-462X.
- Karban, R., & Baldwin, I. (1997). *Induced responses to herbivory*. The University of Chicago Press.
- Kaur, M., Sodhi, H.S. (2022). *Implication of Microbial Signals: Plant Communication*. doi: 10.1201/9781003171416-3.
- Kepler, J. (1971). *Welt-Harmonik*, R. Oldenbourg Verlag, Munique.
- Khait, I., et al. (2018). Plants Emit Remotely Detectable Ultrasounds That Can Reveal Plant Stress BIORXIV 2018/507590.
- Khait, I., Ubolski, U., Yovel, Y., & Hadany, L. (2019). Sound perception in plants. *Seminars in Cell and Developmental Biology*, 92. TheSEVIER. pp. 134-138.
- Kikuta, S. B., Lo Gullo, M. A., Nardini, A., Richter, H., & Salleo, S. (1997). Ultrasound acoustic emissions from dehydrating leaves of deciduous and evergreen trees. *Plant Cell Environ*, 20, 1381-1390.
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1999). *Fundamentals of acoustics*. United States: Wiley.
- Kost, C., y Heil, M. (2006, 10 de abril). Herbivore-induced plant volatiles induce an indirect defence in neighbouring plants. *Journal of Ecology*, 94(3), 619-628.
- Kutschera, U., & Briggs, W. R. (2012). Root phototropism: from dogma to the mechanism of blue light perception. *Planta*, 235(3), 443–452. doi: 10.1007/s00425-012-1597-y.
- Laschimke, R., Burger, M., & Vallen, H. (2006). Acoustic emission analysis and experiments with physical model systems reveal a peculiar nature of the xylem tension. *Journal of Plant Physiology*, 163, 996-1007.
- Litzkow, C. A., Webb, J. C., & Vick, K. W. (1990). Piezoelectric apparatus and process for detection of insect infestation in an agricultural commodity.
- Liu X, Quan W, Bartels D. Stress memory responses and seed priming correlate with drought tolerance in plants: an overview. *Planta*. 2022 Jan 23;255(2):45. doi: 10.1007/s00425-022-03828-z. PMID: 35066685; PMCID: PMC8784359.

- Machado, R. A. R., Baldwin, I. T., & Erb, M. (2017). Herbivory-induced jasmonates constrain plant sugar accumulation and growth by antagonizing gibberellin signaling and not by promoting secondary metabolite production. *New Phytologist*, 215(2), 803-812. doi: 10.1111/nph.14597.
- Madriaza, A. (2017). Luz y Herbivoría: Factores a considerar en la distribución de especies leñosas del bosque templado lluvioso del sur de Chile. Tesis. Universidad de Concepcion. Facultad de Ciencias Naturales y Oceanograficas. Concepción, Chile.
- Mao Z, Ge Y, Zhang Y, Zhong J, Munawar A, Zhu Z, Zhou W. Disentangling the Potato Tuber Moth-Induced Early-Defense Response by Simulated Herbivory in Potato Plants. *Front Plant Sci*. 2022 May 26;13:902342. doi: 10.3389/fpls.2022.902342. PMID: 35693154; PMCID: PMC9178332.
- María-José Endara, Dale L. Forrister, Phyllis D. Coley. (2024). Ecology of Plant Anti-herbivore Defenses. *Encyclopedia of Biodiversity* (Third Edition). Academic Press, 52-62. doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00129-8.
- Martinez-Medina, A., Flors, V., Heil, M., Mauch-Mani, B., Pieterse, C. M., Pozo, M. J., & Conrath, U. (2016). Reconociendo el alertamiento de defensa de plantas. *Tendencias en la ciencia de las plantas*, 21(10), 818–822.
- Matthew, A., Thomas., Robin, L., Cooper. (2022). Building bridges: mycelium-mediated plant-plant electrophysiological communication. *bioRxiv*, doi: 10.1080/15592324.2022.2129291.
- Midzi J, Jeffery DW, Baumann U, Rogiers S, Tyerman SD, Pagay V. Stress-Induced Volatile Emissions and Signalling in Inter-Plant Communication. *Plants (Basel)*. 2022 Sep 29;11(19):2566. doi: 10.3390/plants11192566. PMID: 36235439; PMCID: PMC9573647.
- Miñarro M y Dapena E. 2007. Resistance of apple cultivars to *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae): role of tree phenology in infestation avoidance. *Environmental Entomology* 36: 1206-
- Miñarro M y Dapena E. 2008. Tolerance of some scab-resistant apple cultivars to the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*. *Crop Protection* 27: 391-395.
- Miñarro M, Fernández-Mata G y Medina P. 2010. Role of ants in structuring the aphid community in apple. *Ecological Entomology* 35: 206-215.

- Miñarro M, Hemptinne J-L y Dapena E. 2005. Colonization of apple orchards by predators of *Dysaphis plantaginea*: sequential arrival, response to prey abundance and consequences for biological control. *BioControl* 50 (3): 403-414.
- Mishra, R. C., Ghosh, R., & Bae, H. (2016). Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants. *Journal of Experimental Botany*, 67, 4483–4494.
- Nuñez-Farfan, J., Fornoni, J., & Valverde, P. (2007). The evolution of resistance and tolerance to herbivores. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 38, 541-566.
- Pagán I, García-Arenal F. (2018). Tolerance to Plant Pathogens: Theory and Experimental Evidence. *Int J Mol Sci.*11;19(3):810.
- Pastor, V., Luna, E., Mauch-Mani, B., Ton, J., & Flors, V. (2013). Las plantas preparadas no se olvidan. *Botánica ambiental y experimental*, 94, 46–56.
- Pedro, Ferreira, Pinto, Brandão-Dias., Scott, P., Egan., T., Morales-Silva., Alejandro, Zaldívar-Riverón., Victor, Hugo, Duarte, da, Silva., Gabriella, Melo, Oliveira., Lucas, Del, Bianco, Faria. (2023). Description of the herbivore and natural enemy community associated with the seeds of an invasive plant in Brazil. *Ecological Entomology*, doi: 10.1111/een.13261
- Perks, M. P., Irvine, J., & Grace, J. (2004). Xylem acoustic signals from mature *Pinus sylvestris* during an extended drought. *Annals of Forest Science*, 61(1), 1-8.
- Po-An, Lin., Jessica, T., Kansman., Wen-Po, Chuang., Christelle, A., M., Robert., Matthias, Erb., Gary, W., Felton. (2022). Water availability and plant-herbivore interactions.. *Journal of Experimental Botany*, 74(9):2811-2828. doi: 10.1093/jxb/erac481
- Qin, Y. C., Lee, W. C., Choi, Y. C., & Kim, T. W. (2003). Biochemical and physiological changes in plants as a result of different sonic exposures. *Ultrasonics*, 41, 407–411.
- Reginald, B., Cocroft., H., J., Shugart., K., T., Konrad., K., Tibbs. (2006). Variation in Plant Substrates and its Consequences for Insect Vibrational Communication. *Ethology*, 112(8):779-789. doi: 10.1111/J.1439-0310.2006.01226.X

- Ribeiro, D. L., Alvarenga, A. M., & B. (1998). *Física geral, con experimentos sencillos*. México: Oxford University.
- Rodrigo-Moreno, A., Bazihizina, N., Azzarello, E., Masi, E., Tran, D., Bouteau, F., Baluska, F., & Mancuso, S. (2017). Root phonotropism: Early signaling events following sound perception in *Arabidopsis* roots. *Plant Science*, 264, 9-15. doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.08.001.
- Rosner, S., Klein, A., Wimmer, R., & Karlsson, B. (2006). Extraction of features from ultrasound acoustic emissions: a tool to assess the hydraulic vulnerability of Norway spruce trunkwood? *New Phytologist*, 171, 105-116.
- Ruland, H. (1981). *Ein Weg zur Erweiterung des Tonerlebens: musikalische Tonkunde am Monochord*. Basel: Verlag Die Pforte. 294p.
- Salgado-Luarte, C., & Gianoli, E. (2010). Herbivory on temperate rainforest seedlings in sun and shade: resistance, tolerance, and habitat distribution. *PLoS ONE*, 5(7).
- Schöner, M. G., Simon, R., & Schöner, C. R. (2016). Acoustic communication in plant–animal interactions. *Current Opinion in Plant Biology*, 32, 88-95.
- Schopenhauer, A. (2005). *O mundo como vontade e como representação*. Ed. UNESP, São Paulo, p. 336-350.
- Sharon Y. Strauss, Anurag A. Agrawal. (1999). The ecology and evolution of plant tolerance to herbivory. *Trends in Ecology & Evolution*. 14, 5: 179-185.
- Sherin, G., Aswathi, K.P., & Puthur, J.T. (2022). Photosynthetic functions in plants subjected to stresses are positively influenced by priming. *Plant Stress*.
- Silveira, M. (2008). *Estudos sobre a ação de vibrações acústicas e música em organismos vegetais*. Tesis. Universidade Estadual Paulista: Instituto de Biociências.
- Strauss, A., & Agrawal, A. (1999). The ecology and evolution of plant tolerance to herbivory. *Trends in Ecology and Evolution*, 14(5), 179-185.
- Swetha, Kumari, Koduru. (2020). Herbivore-associated microorganisms in the modulation of plant responses: An overview. 221-228. doi: 10.1016/B978-0-12-821406-0.00020-5

- Telewski, F. W. (2006). A unified hypothesis of mechanoperception in plants. *American Journal of Botany*, 93, 1466–1476.
- Terri, Van, Orman., Dusimbetova, Nargiza, Bakhtiyarovna. (2022). Plant-herbivore interactions: experimental demonstration of genetic variability in plant-plant signaling. doi: 10.1101/2022.06.28.497952
- Thompson, V. P., Cunningham, S. A., Ball, M. C., & Nicotra, A. B. (2003). Compensation for herbivory by *Cucumis sativus* through increased photosynthetic capacity and efficiency. *Oecologia*, 134(2), 167-175.
- Torres-Salazar, Felipe de Jesús y Sosenski, Paula. (2022, marzo-abril). Comunicación a través del olor: las plantas y sus secretos. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 23(2).
- Turgut-Kara N, Arikan B, Celik H. Epigenetic memory and priming in plants. *Genetica*. 2020 Apr;148(2):47-54. doi: 10.1007/s10709-020-00093-4. Epub 2020 Apr 30. PMID: 32356021.
- Ulmann, D. (1996). *Chladni und die Entwicklung der Akustik von 1750-1860*. Basel: Birkhäuser Verlag. 237p.
- Ussawit, Srisakrapikoop., Tara, J., Pirie., Mark, D., E., Fellowes. (2020). Meta-Analysis Suggests Differing Indirect Effects of Viral, Bacterial, and Fungal Plant Pathogens on the Natural Enemies of Insect Herbivores. *Insects*, 11(11):765-. doi: 10.3390/INSECTS11110765
- Valverde, P. L., Fornoni, J., & Nuñez-Farfán, J. (2003). Evolutionary ecology of *Datura stramonium*: equal plant fitness benefits of growth and resistance against herbivory. *Journal of evolutionary biology*, 16(1), 127-137.
- Verónica Alavez, Rocío Santos-Gally, Manuel Gutiérrez-Aguilar et al. (2023). Influence of phylogenetic diversity of plant communities on plant-herbivore-natural enemies interactions. *Oecology*. [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2588393/v1]
- Wiley, R. H., & Richards, D. G. (1978). Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: implications for the evolution of animal vocalizations. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 3, 69–94.
- Zheng-yan, Xue., Bo, Qi., Ge, Ren. (2013). Vibration-induced jitter control in satellite optical communication. 8906:512-520. doi: 10.1117/12.2034575
- Züst, T., & Agrawal, A. A. (2017). Trade-Offs Between Plant Growth and Defense Against Insect Herbivory: An Emerging Mechanistic Synthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 68, 513-534.

Zweifel, R., & Zeugin, F. (2008). Ultrasonic acoustic emissions in drought-stressed trees: more than signals from cavitation? *New Phytologist*, 179, 1070-1079

II CAPITULO 2. ALERTAMIENTO VEGETAL DE *RAPHANUS SATIVUS* DE SUS MECANISMOS DE RESISTENCIA Y TOLERANCIA: EXPLORANDO EL PAPEL DE LA SEÑALIZACIÓN ACÚSTICA

Osmar López-Ek¹, H.S Ballina-Gómez^{1*}, Esaú Ruíz-Sánchez¹, Katy Medina-Dzul¹

¹ División de estudios de posgrado e investigación, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, México.

*Autor para correspondencia: horacio.bg@conkal.tecnm.mx

RESUMEN

El significado ecológico de la aplicación de ondas acústicas en plantas puede tener gran relevancia en los cultivos hortícolas. Se evaluó la señalización acústica como respuestas de alertamiento en los mecanismos de resistencia y tolerancia de *Raphanus sativus*, en presencia de *Ascia monuste*. Se registraron frecuencias de vibración (Hz) de plántulas emisoras (herbivoría) y receptoras (sin daño). El estudio fue segmentado en dos experimentos; el experimento 1) restricción de comunicación (nula, área, terrestre y total). Experimento 2) comunicación aérea por señalización fitoacústica (t1: planta, t2: herbivoría y t3: emulación de Hz). Se registraron variables de crecimiento (altura, hojas, peso seco, diámetro de raíz y bulbo), defensas físicas (grosor foliar y dureza foliar) y fenoles totales foliares. En el experimental uno, el largo de raíz, indico un mayor tamaño en plantas con comunicación, no hubo diferencias en altura y numero. de hojas. Las plántulas emisoras, presentaron promedios de 6 Hz/s, el registro de Hz de las plántulas 48 h posteriores, fue mayor con un promedio de 11 Hz/s. El experimental dos, el factor tiempo tuvo efectos significativos en el peso seco, mayor a los 45 dde pero disminuye progresivamente. En cuanto las defensas físicas, la dureza y el grosor presentaron un efecto inverso proporcional entre sí y en el tiempo, donde la dureza foliar (mm) fue mayor a los 95 dde, mientras que mayor grosor foliar (mm) se registró a los 45 dde. Los fenoles totales foliares (mg EAG/g bs) fueron mayores en T2 en plantas emisoras a los 65 dde y en plantas receptoras a los 65 dde. La comunicación sonora es más eficaz en medios aéreos, siendo más rápida en la transmisión de señales de alerta a plantas vecinas.

Palabras clave: Alertamiento, frecuencia sonoras, herbivoría, vibración.

Estudiante: Jorge Osmar López Ek Correo: osmarlopez04@gmail.com

Director: Dr. Horacio Salomón Ballina Gómez Correo: horacio.bg@conkal.tecnm.mx