

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



Utilización de la técnica de ultrasonidos para la detección, bajo simulación en laboratorio, de galerías producidas por el picudo rojo en palmeras *Phoenix* sp.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL
MEDIO RURAL

ALUMNO: David Jorge García

TUTORA: Prof. Dña. Constanza Rubio Michavila

COTUTOR: Prof. D. José M. Bravo Plana-Sala

Curso Académico: 2014/2015

VALENCIA, Julio de 2015

UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS PARA LA DETECCIÓN, BAJO SIMULACIÓN EN LABORATORIO, DE GALERÍAS PRODUCIDAS POR EL PICUDO ROJO EN PALMERAS *PHOENIX* SP.

RESUMEN:

En los últimos años, la aparición de *Rhynchophorus ferrugineus* Oliver (picudo rojo) está afectando a las palmeras del arco Mediterráneo y en particular a las de la zona levantina. Sus efectos son visibles en los jardines, así como en las zonas productoras de dátiles y palmas. La lucha contra la plaga de estos insectos está prevista en la etapa temprana de la infección o como método preventivo. En esta línea, este trabajo proporciona una metodología, basada en ensayos no destructivos, para la detección de galerías realizadas por las larvas de picudo rojo mediante señales de ultrasonido. Se han aplicado dos técnicas de estudio diferentes ampliamente utilizadas en otros ámbitos como son el retardo de fase y el eco-impulso. Se han analizado ambas técnicas a fin de determinar el método más apropiado. Debido a su gran interés agronómico y la alta incidencia de la plaga en esta familia, el estudio se ha planificado en palmáceas del género *Phoenix*. Se ha establecido un protocolo que permite detectar las galerías, provocadas artificialmente, en el material vegetal. Bien por la disminución de la amplitud de la señal respecto de la establecida como control, bien por la existencia de ecos producidos por cambios de impedancia en el medio, podemos localizar galerías en estadios tempranos, lo que favorece el tratamiento de la plaga.

PALABRAS CLAVE: Palmera, *Phoenix*, ultrasonidos, galerías, *Rhynchophorus ferrugineus*, picudo rojo, técnicas no destructivas,

ALUMNO: David Jorge García

TUTORA: Prof. Dña. Constanza Rubio Michavila

COTUTOR: Prof. D. José M. Bravo Plana-Sala

VALENCIA, JULIO DEL 2015

UTILITZACIÓ DE LA TÈCNICA D'ULTRASONS PER A LA DETECCIÓ, BAIX SIMULACIÓ EN LABORATORI, DE GALERIES PRODUÏDES DE MORRUT ROIG EN PALMERES *PHOENIX* SP.

RESUM:

Els últims anys, l'aparició de *Rhynchophorus ferrugineus* Oliver (morrut roig) està afectant a les palmeres de l'arc mediterrani i en particular a les de la zona llewantina. Els seus efectes són visibles als jardins, així com a les zones productores de dàtils y palmes. La lluita contra la plaga d'aquests insectes està prevista en la etapa primerenca de la infecció o com a mètode preventiu. En esta línia, aquest treball proporciona una metodologia, basada en assajos no destructius, per a la detecció de galeries produïdes per les larves de morrut roig mitjançant senyals d'ultrasons. S'han aplicat dos tècniques d'estudi diferents àmpliament utilitzades en altres àmbits, com són el retard de fase i l'eco-impuls. S'han analitzat ambdues tècniques amb la finalitat de determinar el mètode més adient. A causa del seu gran interès agronòmic i l'alta incidència de la plaga en esta família, l'estudi s'ha planificat en palmeres del gènere *Phoenix*. S'ha establert un protocol que permet detectar les galeries, provocades artificialment, en el material vegetal. Bé per la disminució de l'amplitud de la senyal respecte de la establerta com a control, bé per la existència d'ecos produïts per canvis d'impedància en el medi, es pot localitzar galeries en estadis primerencs, la qual cosa afavoreix el tractament de la plaga.

PARAULES CLAU: Palmera, *Phoenix*, ultrasons, galeries, *Rhynchophorus ferrugineus*, morrut roig, tècniques no destructives.

ALUMNE: David Jorge García

TUTORA: Prof. D. Constanza Rubio Michavila

COTUTOR: Prof. D. José M. Bravo Plana-Sala

VALÈNCIA, JULIOL DEL 2015

USE OF ULTRASOUND TECHNIQUE FOR DETECTION, UNDER LABORATORY SIMULATION, OF RED PALM WEEVIL GALLERIES OF *PHOENIX* SP. PALMS.

ABSTRACT:

In recent years, the emergence of *Rhynchophorus ferrugineus* Oliver (red palm weevil) is affecting the palms of the Mediterranean area and particularly in the Levantine one. Its effects are visible in gardens as well as in production of dates and palms. The fight against the insect plague is planned in early stage of infection or as a preventive method. In this line, this work provides a methodology based on non-destructive testing for the detection of bore by red palm weevil larvae. Ultrasonic signals are used for this purpose. Two different study techniques widely used in other areas, such as the phase delay and the eco-impulse have been applied. Both techniques have been analysed in order to determine the most appropriate method. Because of its great agronomic interest and the high incidence of the plague on this gender, the study has been planned on genus *Phoenix* palms. It has been established a protocol that allows the detection of the galleries, artificially induced in vegetal material. Either by reducing the signal amplitude with respect to one prescribed as control, or by the existence of echoes due to impedance changes in the medium, we can locate galleries in early stages, which favors the plague treatment.

KEYWORDS: Palm, *Phoenix*, ultrasounds, non-destructive techniques, gallery, *Rhynchophorus ferrugineus*, red palm weevil.

STUDENT: David Jorge García

TUTORESS: Mrs. Constanza Rubio Michavila

COTUTOR: Mr. José M. Bravo Plana-Sala

VALENCIA, JULY OF 2015

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de fin de grado supone el fin de una etapa y el inicio de otra. Es por ello, que es importante tener en mente a todas las personas que han contribuido de una forma u otra a que esta etapa haya sido posible.

En primer lugar, me gustaría resaltar el papel fundamental que mis padres han tenido en la etapa universitaria. No solamente han sido los que económicamente han hecho un esfuerzo increíble con el sudor de su frente, sino que han sido el pilar fundamental en los momentos en los que más lo he necesitado.

En esta corta mención no podía olvidar a José M. Bravo Plana-Sala, Marcelino Ferri García y a Constanza Rubio Michavila, por brindarme la oportunidad de poder realizar el trabajo de final de grado con ellos y haberme otorgado su ayuda en cualquier momento que la he necesitado.

Por último, agradecer también a todos mis amigos, profesores y personal de la escuela que durante estos cuatro años han hecho que mi estancia en la universidad haya sido muy agradable viviendo momentos magníficos que jamás olvidaré, así como a todos mis compañeros de la Delegación de Alumnos con los cuales he compartido muchos momentos, la mayor parte de ellos muy positivos.

ÍNDICE

I.	Introducción	1
I.1.	Motivación del estudio	1
I.2.	Biología y ecología del picudo rojo	3
I.3.	Métodos de control del picudo rojo	6
II.	Objetivos	10
III.	Materiales y métodos	11
III.1.	Fundamentos teóricos	11
III.2.	Método	13
III.3.	Set-up experimental	15
III.3.1.	Material vegetal	15
III.3.2.	Equipo de medida	16
III.3.3.	Toma de medidas y métodos de análisis	18
IV.	Resultados y discusiones	24
V.	Conclusiones	34
VI.	Líneas futuras	35
VII.	Bibliografía	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Serie histórica de superficie y producción del cultivo de la palmera datilera en España. (Avance del Anuario de Estadísticas del MAGRAMA, 2015)	2
Figura 2. <i>Phoenix canariensis</i> afectada por el picudo rojo en el núcleo urbano de Catarroja (Valencia)	4
Figura 3. Larva de picudo y picudos adultos	5
Figura 4. Trampa cónica con difusor de feromonas (López, 2013)	8
Figura 5. Características de una onda sinusoidal	12
Figura 6. Efecto piezoeléctrico. Adaptado de Martínez et al. (2006)	14
Figura 7. Señal emitida representada en el osciloscopio	14
Figura 8. Esquema del equipo de medición	16
Figura 9. Sistema de sujeción de transductores	17
Figura 10. Señales recibidas con y sin obstáculo en el medio de propagación de la onda.	20
Figura 11. Diferencia en amplitud en función del efecto “sombra”	21
Figura 12. Taladro y brocas utilizadas en el estudio	22
Figura 13. Esquema experimental	22
Figura 14. Comparación señales recibidas en un fragmento de palmera con y sin orificio.	25
Figura 15. Señales defectuosas.	28
Figura 16. Intervalo LSD de la Directividad respecto a la presencia o no de orificio en la palmera.	29
Figura 17. Ecos producidos en fragmentos 1 y 2 de palmera con orificio	30
Figura 18. Ecos producidos en fragmento de palmera 3 con orificio	31
Figura 19. Señal recibida en fragmento de palmera sin y con orificio de 1 mm de diámetro.	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relaciones térmicas del picudo rojo. (Martin y Cabello, 2005)	6
Tabla 2. Resultados de la Directividad (D) de las medidas experimentales	27
Tabla 3. ANOVA de la Directividad respecto a las variables orificio y punto.	29

I. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Este apartado se divide en tres partes diferenciadas, tratando en la primera la motivación que ha llevado a la realización de este trabajo, en la segunda la biología y ecología del picudo rojo y, por último, en la tercera parte, se realiza un breve resumen de los métodos de control de la plaga más empleados en la actualidad.

1.1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

El presente proyecto nace de la necesidad de controlar la plaga de *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (picudo rojo o gorgojo de las palmeras) que está causando la muerte de muchas especies vegetales de la familia de las palmáceas especialmente del género *Phoenix* como son *P. dactylifera* o *P. canariensis*, ambas de gran valor como planta ornamental para jardinería, empleándose la primera, asimismo, como cultivo en muchas zonas de clima mediterráneo por sus frutos.

Actualmente, se producen más de seis millones de toneladas de dátiles en todo el mundo siendo Irán y Egipto los países más productores, con un 35% de la producción mundial entre ambos. A nivel nacional, España también es un país muy vinculado a este cultivo en todas las provincias de la cuenca mediterránea, siendo la Comunidad Valenciana con más de 500 ha cultivadas y una producción de 8.000 toneladas anuales, una de las regiones con mayor importancia. De modo más concreto, el término municipal de Elche es uno de los principales referentes en este ámbito debido a su cultura histórica tan ligada a la palmera datilera habiendo más de 180.000 palmeras allí plantadas y destacándose la existencia de más de 160.000 plantas en viveros en esta ciudad (Agustí, 2010). Cabe destacar también la importancia comercial que, así mismo, presenta el cultivo de la palmera datilera en esta comarca para la obtención de la palma blanca, un producto único en el mundo obtenido por el encaperuzamiento de las hojas más nuevas de la palmera para conseguir esta coloración. Estas palmas son muy utilizadas para las celebraciones de Semana Santa de la ciudad de Elche, así como exportadas a otras ciudades de España teniendo un gran valor comercial, a nivel local, por su importancia artesanal y patrimonial. En jardinería, durante muchos años, han sido las palmeras *Phoenix* sp. unas de las especies con mayor importancia sobre todo en zonas del litoral mediterráneo, llegando a tener en 2006 cada palmera un valor aproximado de 15.000 € de media según los datos facilitados en el Avance del Anuario de Estadísticas del 2014 del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA)

Sin embargo, a partir de 2009, tanto la superficie cultivada de palmeras datileras como su producción en España han bajado de forma considerable como se muestra en la Figura 1, pasando de obtener 4.500 toneladas de dátiles en 2008 a las 3.000 en el año 2013 siendo éstos los últimos datos registrados (MAGRAMA, 2015). Estos años de bajada de producción coinciden con la introducción de la plaga del picudo rojo en la península.

La importancia de estas dos especies en la cuenca mediterránea y especialmente en el este peninsular hace que sea de vital importancia encontrar un método tanto de detección como de control de la plaga. Debido, por tanto, al gran interés agronómico de estas especies, el estudio se planificará en las palmáceas de este género.

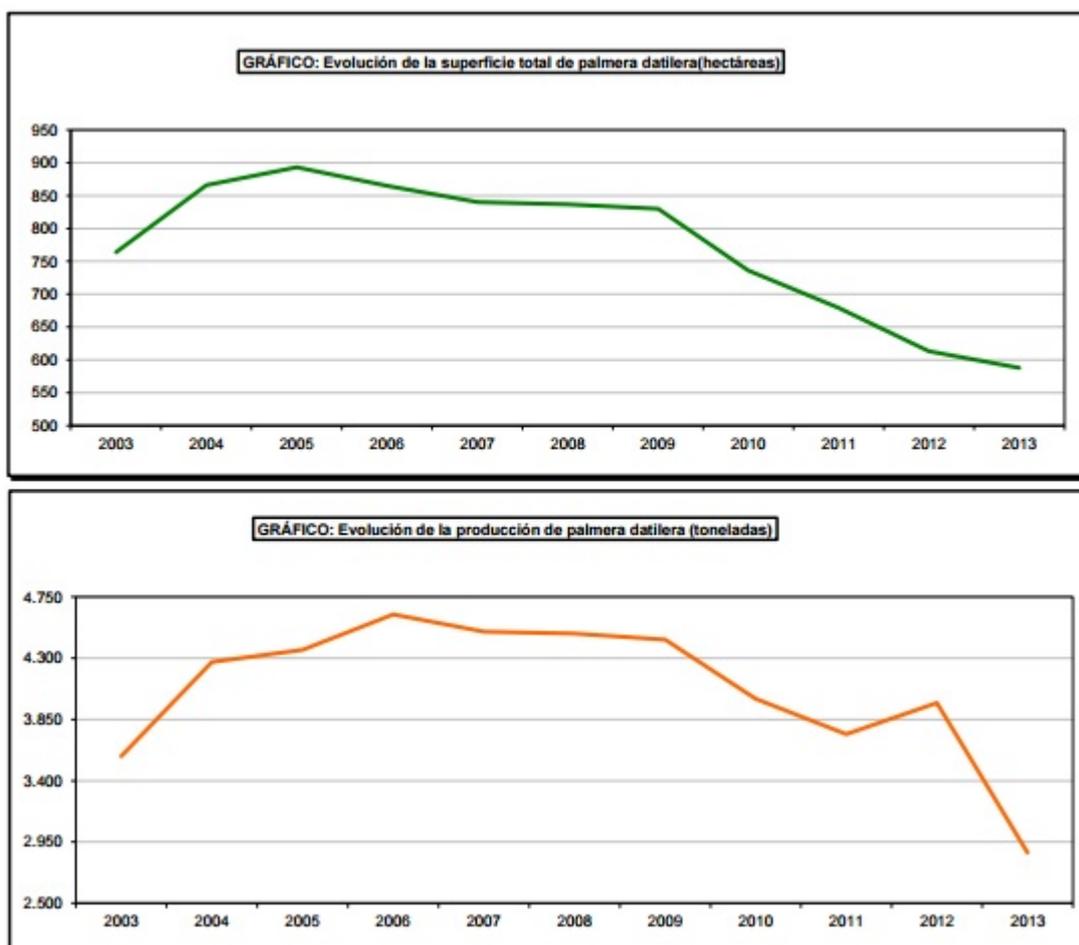


Figura 1. Serie histórica de superficie y producción del cultivo de la palmera datilera en España. (Avance del Anuario de Estadísticas del MAGRAMA, 2015)

El picudo rojo fue introducido en la península Ibérica por las masivas importaciones desde distintos países asiáticos de palmeras, a bajo coste y sin control sanitario, por la

elevada demanda de estas especies para jardines y la urbanización masiva, sobre todo en zonas de costa (MAGRAMA, 2015). Poco a poco la plaga fue distribuyéndose por una gran cantidad de territorios siendo una clara amenaza en toda el área mediterránea donde el picudo encuentra unas condiciones climáticas óptimas para su desarrollo. En la actualidad, el picudo rojo supone una seria amenaza no sólo para las zonas de cultivo y jardines como se ha citado anteriormente, sino también por el ataque de la plaga a especies de palmáceas autóctonas del mediterráneo como el palmito, o el riesgo que supone sobre zonas de gran valor natural como por ejemplo el Palmeral de Elche, declarado Patrimonio de la Humanidad en el año 2000.

La grave amenaza que está suponiendo esta plaga ha provocado un gran interés por estudiar diferentes métodos para controlar el ataque de estos insectos y evitar los enormes daños producidos en las palmeras atacadas. Aunque se han encontrado diferentes formas de reducir los daños causados e, incluso, algunas técnicas que permiten prevenir el ataque de los picudos, resulta de vital importancia actuar en los estados tempranos de afección para cumplir con éxito el objetivo de salvar a las palmeras afectadas.

Por todo ello, el presente trabajo aborda el estudio del uso de la técnica de ultrasonidos como método de detección de galerías internas en el tronco de especies del genero *Phoenix* para detectar la presencia de la plaga del picudo rojo en su interior y, de esta forma, poder actuar de forma más eficaz sobre las palmeras afectadas, en estadíos tempranos.

En su inicio, esta técnica puede presentar una gran utilidad sobretodo en viveros dedicados al cultivo de planta ornamental, especializados en palmeras, por la mayor facilidad de adaptación.

1.2. BIOLOGÍA Y ECOLOGÍA DEL PICUDO ROJO

El picudo rojo es una especie de coleóptero perteneciente a la familia de los curculiónidos, dentro de la subfamilia *Dryophthorinae*. Como todos los coleópteros, son insectos holometábolos, es decir, presentan una metamorfosis completa. Empezando el ciclo biológico por la puesta, cada hembra suele poner unos 300 huevos de unos 2 mm de diámetro en cada ciclo llegando a desarrollarse cuatro generaciones anuales en nuestras condiciones. Tras la eclosión, las larvas se convierten en el estado más letal para la palmera al disponer de mandíbulas potentes con las que perforan el interior del tronco para alimentarse de los tejidos vivos del córtex descartando todo tejido fibroso que utilizará posteriormente para realizar la envoltura que les protegerá durante la metamorfosis en su estado de pupa.

La actividad de las larvas causa graves trastornos en la planta como se puede observar en la Figura 2, llegando a acabar con ella si las galerías afectan al ojo (yema terminal) de la misma, al no disponer las palmeras de yemas laterales por donde rebrotar. El diámetro de las galerías efectuadas por las larvas del picudo se sitúa entre 1 y 2 cm de diámetro aproximadamente (Cabello, 2006), si bien es muy difícil diferenciar estos orificios cuando el ataque de la plaga es muy intenso al tener la zona dañada una textura más hueca y pastosa de lo normal y con una humedad por encima de los parámetros habituales.



Figura 2. *Phoenix canariensis* afectada por el picudo rojo en el núcleo urbano de Catarroja (Valencia)

Las larvas pueden llegar a medir hasta 5 cm, son de color crema aunque van adquiriendo un color más oscuro a medida que van desarrollándose y la cabeza presenta un color amarronado. La cápsula cefálica tiene unas dimensiones de 8-9 mm de longitud y 7-8 mm de anchura (Faleiro, 2006)

Tras su transformación, aproximadamente un mes después, los picudos adultos salen de los capullos para acabar de completar su ciclo de vida y reproducirse. Suelen encontrarse en la parte alta de la palmera en la zona de percas. Muchas hembras atraídas por las kairomonas, sustancias químicas que segregan las palmeras o por las feromonas sexuales que emiten otros picudos, salen a colonizar otras palmáceas del alrededor pudiendo llegar a recorrer hasta 5 km en contra del viento (Cabello, 2006) debido a su gran capacidad de vuelo. Estos insectos poseen unas potentes alas traseras que se encuentran bajo los élitros, primer par de alas endurecidas que no sirven para el vuelo sino para proteger la parte posterior del tórax. El cuerpo el picudo adulto presenta un color rojo intenso con manchas negras con un rostro donde predomina su pico alargado, de ahí que este coleóptero sea conocido como picudo rojo. El tamaño medio

de los picudos adultos se sitúa entre los 2 y 5 cm (Cabello, 2006). En la Figura 3 se puede observar una fotografía del picudo adulto.



Figura 3. Larva de picudo y picudos adultos.

Tras el apareamiento, las hembras realizan algunos agujeros en la base de las hojas, brotes, cicatrices o herida de la palmera para realizar allí la puesta de los huevos ya sea en la misma palmera o en otras cercanas reiniciándose así el ciclo de nuevo y propagándose la plaga en la zona.

Los picudos rojos tienen actividad diurna. Según los estudios realizados por Martín y Cabello (2005), el estado de larva del picudo rojo presenta unos límites térmicos inferior y superior letales de 5°C y 40°C respectivamente. En el estado de pupa, la temperatura umbral mínima se sitúa en -2,3°C (Salama *et al.*, 2002). Estos datos muestran la gran adaptabilidad térmica de esta especie existiendo una gran capacidad de supervivencia ante bajas temperaturas. Además, cabe destacar que la fermentación producida por estos insectos durante su alimentación y su ubicación en el interior del tronco de las palmeras hace que la temperatura se vea incrementada respecto a las condiciones ambientales.

En la Tabla 1 se muestran, en detalle, todos los parámetros térmicos de esta especie, así como la duración media de cada estado (huevo, larva y pupa) medida en GDA (Grados Día Acumulados), parámetro que indica la temperatura acumulada que necesita un insecto para su desarrollo.

$$GDA = \sum_{i=1}^n t_m$$

t_m = temperatura media diaria – temperatura límite inferior experimental

Tabla 1. Relaciones térmicas del picudo rojo. (Martín y Cabello, 2005)

ESTADO	PARÁMETRO	VALOR (°C)
Huevo	T letal inferior	10
Larva	T letal inferior	5
Larva	T umbral mínima	15
Larva	T umbral máxima	38
Larva	T letal superior	40
Larva	Duración estado (GDA)	1.106
Pupa	T letal inferior	0
Pupa	T umbral mínima	13
Pupa	T umbral máxima	45
Pupa	Duración estado (GDA)	328

La elevada tasa de afección supone un aumento de la capacidad de supervivencia del picudo. La media de la temperatura en palmeras con un mínimo en número de larvas entre 500 y 100, incluso puede llegar a los 31,5°C en pleno invierno en nuestras condiciones climáticas (Martín y Cabello, 2005). Además, la supervivencia del picudo rojo a las condiciones desfavorables se ve incrementada gracias al fenómeno de la diapausa, mediante el cual el insecto es capaz de sobrevivir en un estado casi de letargo a las condiciones más desfavorables que puedan ocurrir.

Siguiendo los estudios de Martín y Cabello (2005), los resultados concluyen que en condiciones de baja afección, los picudos rojos presentan un desarrollo asincrónico de sus larvas pudiendo parte de la población realizar su ciclo de vida completo en menos de un año, una segunda parte en un año y, por último, otra en menos de dos años.

1.3. MÉTODOS DE CONTROL DEL PICUDO ROJO

Al ser la actividad alimenticia de las larvas la causa fundamental de los daños y, encontrarse éstas en la parte superior de las palmeras, en el interior del tronco, se dificulta bastante el control de la plaga. Así mismo, se añade el hecho de que los síntomas en la palmera son difíciles de detectar si una persona no está habituada, hecho que ocasiona el problema de que, frecuentemente, cuando los síntomas son muy visibles, es demasiado tarde para poder salvar la palmera afectada.

La gravedad de los daños ocasionados por esta plaga ha incrementado el interés por encontrar una correcta solución y que sean muchos los estudios que se pueden encontrar actualmente por lo que se proponen diversos métodos de control como solución a este problema, siendo muchos de ellos complementarios entre sí:

- Control cultural: Una de las vías de entrada del picudo rojo en las palmeras son las heridas de poda. En jardinería urbana, las palmeras son sometidas a grandes labores de poda para eliminar todas las hojas secas que de forma natural irían acumulándose, para mejorar así la estética de las mismas. Para reducir la posible entrada de la plaga, es necesario tener en cuenta el ciclo de vida del picudo rojo evitando podar en los meses de vuelo potenciales de los picudos adultos (de principios de abril a finales de noviembre). De diciembre a febrero sería la fecha ideal para realizar esta técnica, aprovechando para sanear la palmera y proteger los focos posibles de entrada de los coleópteros.
- Control biológico: Tras múltiples experimentos, se han encontrado varios organismos capaces de reducir considerablemente el número de picudos en una palmera afectada. Este método resulta muy útil, sobre todo, como método de prevención, evitando de esta forma emplear masivamente el control químico teniendo en cuenta que la mayor parte de las palmeras se encuentran en zonas urbanas muy transitadas y cerca de zonas de juego infantiles, en la que se debe tener mucha precaución en el uso de fitosanitarios. El uso de nematodos como *Steinernema carpocapsae* ha resultado muy positivo, aplicándose pulverizados directamente en la corona de la palmera (Gómez *et al.*, 2008). También con el uso de hongos entomopatógenos como *Beauveria bassiana* se han obtenido muy buenos resultados al destruir las estructuras internas del picudo gracias a la labor de las hifas del hongo tras la germinación de las esporas que se adhieren a la cutícula del insecto (Martínez y Fernández, 2011). Aunque las dos técnicas tienen un buen carácter preventivo, la primera resulta bastante más barata al ser la aplicación cada cinco meses aproximadamente, mientras que la segunda se

debe realizar quincenalmente como recomendación para una buena actuación. En ambos casos, es importante no complementar este método con fungicidas y nematicidas puesto que éstas acabarían con los organismos introducidos, dejando así sin efecto el tratamiento.

- Control biotécnico a través del uso de trampas cubo o cónicas para disminuir la población de picudos (Vacas et al, 2013). Aunque no se considera una solución a la plaga, sí que resulta eficaz como complemento a otros métodos, así como para la obtención de información constante de la presencia o no de la plaga y la evolución del ataque en su caso del picudo en una zona determinada. Los componentes principales de todas estas trampas son los siguientes: difusor de feromonas de agregación, difusor de kairomonas sintéticas, agua y un retardante de la evaporación (López, 2013). De esta forma los picudos son atraídos a la trampa y capturados, siendo eficaz también el uso de hongos en su interior de forma que los insectos sean atacados. No es recomendable la colocación de las trampas de forma aislada, pues se perdería su efecto. En la Figura 4 se puede observar una trampa cónica, una de las que mejor resultado han dado en los distintos estudios realizados por Vacas *et al.* (2013)



Figura 4. Trampa cónica con difusor de feromonas (López, 2013)

- Control químico: Se debe intentar reservar este método para palmeras afectadas y no usarlo como método preventivo. Son muchas las sustancias activas estudiadas con las que se obtienen buenos resultados. Tras realizar una búsqueda actualizada de las mismas en el Registro de Productos Fitosanitarios del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; una de las materias permitidas es Imidacloprid 20% (inyección 0'8 % o pulverización 0'05 %. 3-5 litros caldo/palmera). Estos últimos años, la aplicación de Clorpirifos se ha utilizado como método químico de control de los los picudos rojos, pero el 1 de Julio de 2015, este producto fue eliminado de la lista de productos

fitosanitarios permitidos. Una cuestión importante en el control químico es tener en cuenta el difícil acceso de la materia activa a la zona afectada por la plaga. Por ello, el uso directo del producto fitosanitario sistémico al suelo ocasiona una baja mortalidad de picudos. Las alternativas serían las aplicaciones foliares, la inyección directa al tronco o la combinación de ambas. Con este último caso, la eficacia del tratamiento roza el 100 % en cuanto a la mortalidad de las larvas, pudiendo evitar los adultos el efecto del insecticida y siendo las pupas resistentes. La inyección al tronco como método único presenta dificultad de acceso a algunas zonas de las percas de la palmera.

A través del uso de estos métodos de control, se puede llegar a un óptimo control de la plaga que permita salvar a las palmeras de su ataque. No obstante, es necesario actuar de forma preventiva o cuando la plaga no ha causado daños excesivos de forma que la planta atacada pueda recuperarse tras el control del picudo.

Para ello, es necesaria una correcta detección precoz con el fin de poder actuar. Además del control visual de los síntomas producidos en las palmeras, distintos métodos están siendo ensayados como el uso de distintas trampas, la detección del olor generado por la fermentación que se produce al alimentarse las larvas de los insectos gracias al uso de perros entrenados para ello así como por el sonido que realizan al alimentarse. Además de estas técnicas, el uso de ultrasonidos puede resultar una de las herramientas más eficaces para la detección de la plaga en sus primeros estados de desarrollo para poder actuar en los primeros estadíos de la afección.

II. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

Atendiendo a las conclusiones del Primer Congreso Internacional del *Rhynchophorus ferrugineus* Oliver, celebrado en Valencia en Noviembre del 2005, se recogió el elevado riesgo de transportar palmeras de zonas afectadas a zonas no afectadas por el peligro de introducir la plaga en nuevos lugares, al ser muy difícil garantizar que una planta está sana con un simple examen visual.

El presente trabajo muestra un primer paso en el desarrollo de una técnica no-destructiva basada en la emisión y recepción de ultrasonidos que permita detectar la presencia de galerías internas provocadas por los picudos rojos en el tronco de las palmeras de las especies del género *Phoenix*.

Este trabajo constituye un primer paso, desarrollándose los ensayos de estudio en condiciones de laboratorio, con el objetivo de establecer una metodología clara, eficiente y robusta a la hora de extrapolar los resultados hacia condiciones reales, teniendo en cuenta tanto los factores económicos como los técnicos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Este tercer apartado se divide en tres sub-aptados empezando por los fundamentos teóricos en los cuales se basa el estudio para seguir con la explicación del método utilizado y pasar, por último a la descripción del set-up experimental.

3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los ultrasonidos son ondas mecánicas cuya frecuencia de vibración es superior a los 20 kHz, motivo por el cual el oído humano no puede percibirlo. Algunos animales como los delfines o los murciélagos utilizan este tipo de ondas sonoras para orientarse. Gracias a sus características, el uso de ultrasonidos resulta una técnica que ofrece un amplio abanico de aplicaciones: control de procesos industriales (Lopez-Alba et al., 2013), estudio de propiedades mecánicas en distintos materiales como calizas o mármoles (Martínez, 2010), localización y clasificación arqueológica de piezas arqueológicas (Parra et al., 2007), medición de distancias a través de distintos sensores en robótica móvil (Navarro et al., 2004) o evaluación no invasiva en diferentes campos de la medicina como la ginecología siendo una técnica muy importante en los embarazos entre otros casos (Casas et al., 2012). Dentro del ámbito agroforestal, esta técnica también es utilizada en muchos países para estimar la calidad de la madera de distintas especies, así como la detección de imperfecciones causadas por distintos agentes físicos como daños provocados por insectos xilófagos (Acuña et al., 2006). Además, recientemente, un estudio manifestó que los ultrasonidos son capaces de detener el crecimiento de microalgas y macroalgas en balsas de riego evitando problemas de obturación en los goteros de riego (Maestre et al., 2015)

Para el estudio de los principios fundamentales en que se basa la generación, transmisión y recepción de los ultrasonidos, es necesario introducir previamente algunos conceptos fundamentales de las ondas puesto que los ultrasonidos se pueden definir como ondas mecánicas, originadas por la vibración de un cuerpo, el cristal piezoeléctrico del transductor en este caso, y que se propagan por un medio material como el tejido vegetal en el presente ensayo.

Así, los ultrasonidos son vibraciones que se propagan en un medio en forma de onda pudiéndose expresar como una función periódica en el espacio y en el tiempo, y representada gráficamente, en su forma armónica, como una función sinusoidal (Figura 5).

Las ondas pueden caracterizarse por los siguientes parámetros: estado de perturbación (y), la amplitud (A) que es el valor máximo que alcanza la elongación de la perturbación. En nuestro caso, al ser detectada la señal con un osciloscopio, su valor se medirá en voltios (V). En la mayor parte de las ocasiones, la amplitud de una onda no es constante con el tiempo sino que va variando, definiéndose la envolvente de la onda como la forma que se obtiene al unir las amplitudes de los distintos ciclos de onda registrados. La longitud de onda (λ) se define como la distancia que recorre una perturbación en un intervalo de tiempo determinado que se conoce como periodo (T) siendo su inversa la frecuencia (f) o número de perturbaciones por unidad de tiempo midiéndose en Hertzios (Hz), en el Sistema Internacional. Estos parámetros se muestran gráficamente en la Figura 5. Matemáticamente, una onda armónica sinusoidal se puede expresar por la siguiente función:

$$y = A \text{ sen } (kx - \omega t + \varphi)$$

El término encerrado entre paréntesis recibe el nombre de función de fase. Así, otro parámetro importante es la variación de fase de una onda respecto de una situación de referencia, es decir, el cambio de la función de fase producido en la propagación de la señal.

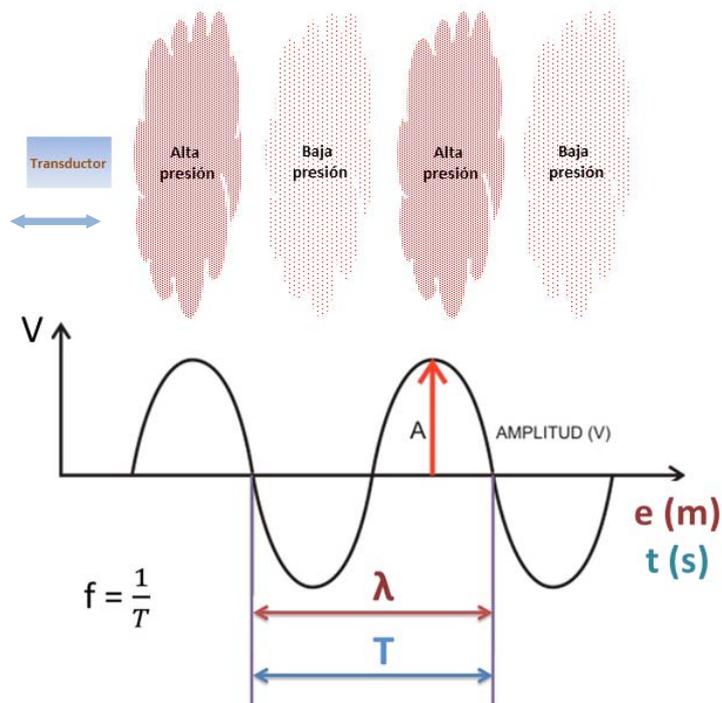


Figura 5. Características de una onda sinusoidal

Cuando la onda de ultrasonido atraviesa un medio, en este caso el tejido vegetal de la palmera, pueden producirse distintos fenómenos físicos, entre ellos, la reflexión de los haces de ultrasonido que el transductor emite, fenómeno comúnmente conocido como eco. La reflexión se produce en la interfase entre dos medios y proporcionan, por tanto, una evidencia de que se está ante dos medios distintos.

Las reflexiones y la interferencia de las señales derivadas de éstas, se producen generalmente por cambios drásticos en la impedancia del medio de propagación. Así, resulta importante definir la impedancia acústica (Z), propiedad linealmente dependiente a la densidad del material o medio por el cual se propaga la onda y la velocidad de propagación de la onda en dicho medio. En definitiva, este parámetro mide la resistencia que opone el medio a la propagación de las ondas sobre él, concepto similar al de la impedancia eléctrica.

La impedancia de un material se puede calcular como el producto entre su densidad y la velocidad del sonido.

$$Z = \rho \cdot v$$

La disminución en amplitud, por ejemplo, es la base para el estudio de diferentes propiedades de la madera. Algunos estudios han permitido determinar distintas propiedades elásticas de la madera gracias a la propagación de ondas ultrasónicas al medir su atenuación en el medio (Acuña et al., 2006). En nuestro caso, esta técnica permite detectar y posicionar desperfectos, o galerías gracias al retardo de la señal y a los cambios en la amplitud.

3.2. MÉTODO

La parte experimental del estudio se ha realizado siguiendo el método de eco-impulso, método muy utilizado para la detección de cualquier fallo en materiales (fisuras, perforaciones, defectos o cambios en la naturaleza del medio). En nuestro caso el fallo que se pretende detectar es debido a la aparición de las galerías producidas por las larvas del picudo rojo en las palmeras.

Lo primero que se debe hacer es generar la señal de ultrasonidos. Esto se consigue gracias al transductor. Al excitar un material piezoeléctrico mediante una corriente eléctrica, de tensión y frecuencia elegida, éste experimenta cambios mecánicos (compresión-expansión), transformando esta señal eléctrica en ondas mecánicas como se puede observar en la Figura 6.

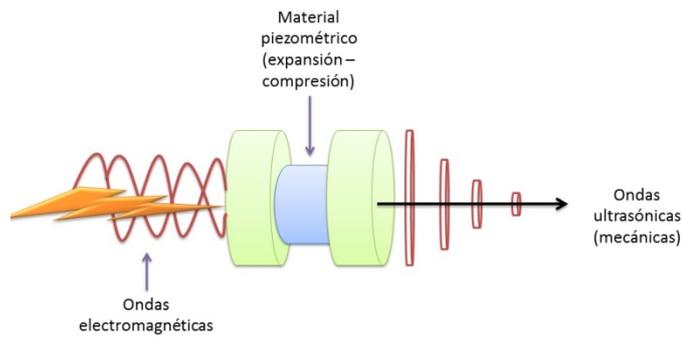


Figura 6. Efecto piezoeléctrico. Adaptado de Martínez et al. (2006)

En los ensayos de eco-impulso y transmisión, normalmente la señal útil recibida es de muy baja amplitud en comparación con la emitida por el transductor, lo que lleva a un enmascaramiento de la señal. Para evitar esto, se opta por generar una ráfaga de señales con las mismas características (misma forma de onda y frecuencia). Esta ráfaga, que consiste en una sucesión de 8 ciclos como se aprecia en la Figura 7, se denomina BURST y presenta la ventaja de que permite conocer el tiempo transcurrido entre la señal emitida y la recibida ya que se conoce el número de ciclos emitidos y el hecho de dejar tiempos muertos entre los paquetes de ondas, permitirá detectar sólo la señal atenuada, sin solapamientos ni enmascaramientos.

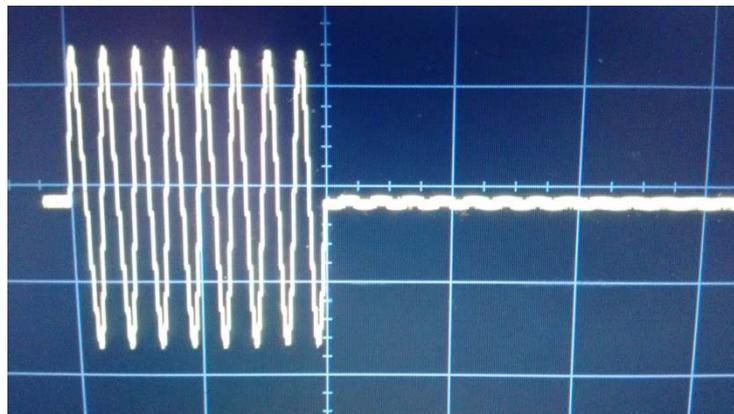


Figura 7. Señal emitida representada en el osciloscopio

Conociendo los fenómenos mencionados que pueden presentar las ondas, cabe esperar que al emitir un impulso de señales ultrasónicas en una palmera sana, la señal recibida presente diferencias respecto a una palmera que exhiba galerías efectuadas por las larvas de picudo rojo, al encontrar la onda un hueco de aire durante su

propagación por el medio. A partir de esta hipótesis, se trabajará para estudiar la posible detección de daños provocados por esta plaga dentro del tronco de la palmera.

La variación de fase y amplitud son los dos parámetros en los que se basa este estudio, tratando de encontrar algún parámetro que permita discernir una palmera sana de otra afectada por picudo. La hipótesis con la que se trabaja se basa en la diferencia de amplitud en la señal, que cabe esperar, entre las palmeras que presentan orificio y las que no, esperándose una disminución de la amplitud de la señal en el primer caso. Con esta hipótesis, la detección puede basarse en esta disminución (efecto sombra) o en cambios en aspectos temporales de la señal como ecos, desfases o retardos o, en general, interferencias de la señal consigo misma al ser reflejada por el cambio de impedancia (galería).

Siendo éste el primer paso ensayado bajo condiciones de laboratorio, se ha establecido la parte experimental de forma artificial para poder controlar todos los parámetros, realizando un modelo lo más similar posible a la realidad y utilizando fragmentos de palmeras con tejido vegetal totalmente seco por ser éste el medio más desfavorable, ya que la propagación de las ondas se ve favorecido por la humedad del medio. Además, los orificios se han realizado de forma artificial con un taladro en el laboratorio teniendo en cuenta los diámetros medios de las galerías realizadas por los picudos rojos en la realidad, siguiendo los datos bibliográficos mencionados anteriormente.

3.3. SET-UP EXPERIMENTAL

La experimentación se ha realizado en un laboratorio de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural (ETSEAMN) situada en el Campus de Vera de la Universitat Politècnica de València (UPV)

3.3.1. Material vegetal

Los fragmentos de palmeras sobre los cuales se ha realizado el estudio se recogieron de la base de distintas palmeras datileras muertas del núcleo urbano de Catarroja (Valencia). Al presentar la madera interna de estas palmeras y la de las canarias unas características similares en cuanto a medio de propagación de las ondas mecánicas, los resultados obtenidos serán totalmente extrapolables a la otra especie del mismo género.

Las ondas se propagan mejor a través de medios húmedos por su mayor estabilidad por lo que los fragmentos de palmeras se han mantenido en condiciones de total sequedad bajo las condiciones más desfavorables posibles. El espesor de todos los fragmentos ha sido de 15 cm, distancia óptima para la correcta llegada de señal a los transductores que actúan como receptores, ya que espesores mayores necesitan una mayor potencia de generación para que la señal pueda ser recibida nítidamente.

Respecto a las medidas, se han realizado sobre varios fragmentos de palmeras. En todos ellos, se tomaron los datos con y sin orificio.

Todos los orificios se realizaron de forma paralela a la disposición de las fibras internas de las palmeras de forma que al emitir la señal de ultrasonidos, ésta se encuentra con el obstáculo de la galería.

3.3.2. Equipo de medida

El equipo experimental con el que se han realizado las medidas está formado por distintas partes, bien diferenciadas, como se puede observar en la Figura 8.

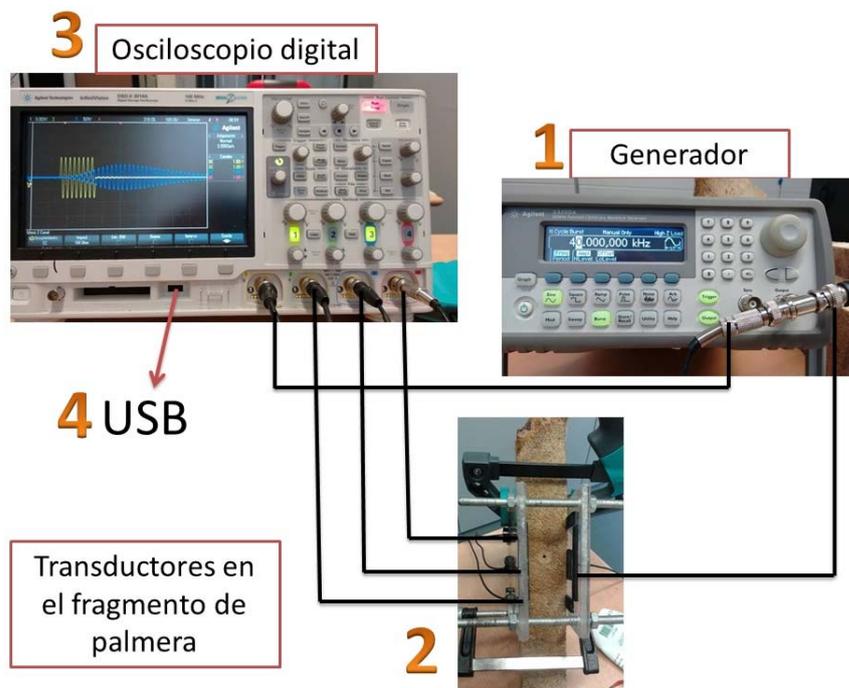


Figura 8. Esquema del equipo de medición

El generador (Modelo Agilent) emite una señal eléctrica con una frecuencia de 40.000 Hz y una tensión de 10 V.

En este experimento se utilizarán cuatro transductores; uno de los cuales estará conectado al generador, de forma que transformará la energía eléctrica en energía mecánica emitiendo 8 pulsos ultrasónicos que se propagarán a través de la palmera. Por otro lado, los otros tres transductores actuarán como receptores recogiendo la señal recibida al otro lado de la palmera. Para un correcto funcionamiento del dispositivo, y por tanto que el resultado del experimento sea satisfactorio, se debe garantizar que el transductor que actúa como emisor y el central de los tres que actúan como receptores estén colocados de forma enfrentada a cada lado de la palmera y garantizado su correcta sujeción.

Para la sujeción de los transductores se ha ideado un sistema de sujeción, esquematizado en la Figura 9, formado por dos planchas de metacrilato sujetadas por unos tornillos de 1 cm de diámetro de forma que siempre se encuentran paralelas y a la misma altura, permitiendo cambiar la distancia entre ambas placas según convenga pero sin que una pueda moverse verticalmente respecto a la otra. Tal y como se observa en la Figura 9, una de las placas lleva incorporado un único transductor que actuará como emisor mientras que en la otra plancha se encuentran los tres transductores que actúan como receptores.

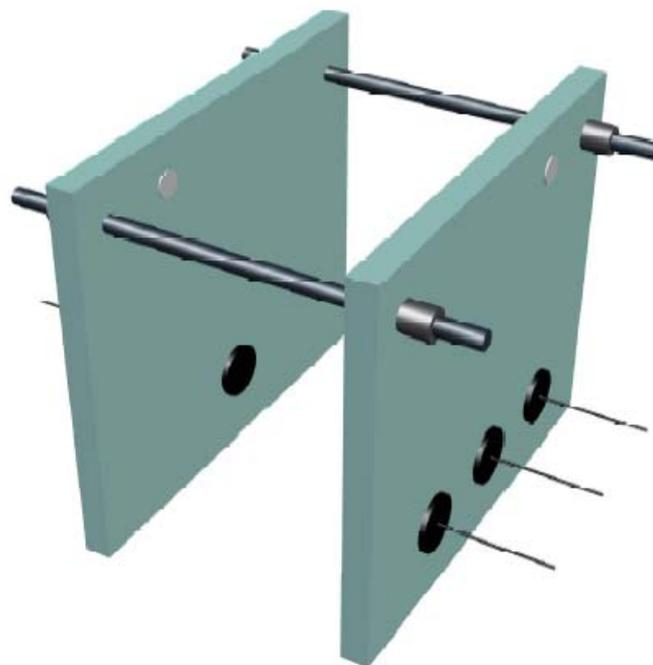


Figura 9. Sistema de sujeción de transductores

Las planchas pueden presentar dos disposiciones según cual sea la colocación de los tornillos: en la primera las dos planchas están completamente alineadas, estando el transductor de emisión encarado al transductor de recepción, estando ambos situados en el centro de la plancha. En la segunda disposición, una de las planchas está 1,5 cm desplazada horizontalmente respecto a la otra, de forma que, usando las dos disposiciones y colocando siempre el emisor en el mismo punto, se permite realizar un barrido completo de la palmera respecto a la altura establecida con el punto de emisión al estar todos los transductores en todo momento en el mismo eje. Para evitar posibles roturas de los transductores, en ambas planchas se han colocado pequeños fragmentos de un material elástico, ya que se evitan las uniones rígidas y por tanto la transmisión de esfuerzos.

Para favorecer la adaptación de impedancias entre el transductor y el medio a analizar es habitual la utilización de geles de ultrasonidos. En nuestro caso, para asegurar el buen contacto de los transductores con la palmera, se coloca una capa de gel (Transonic Gel) en cada uno de los transductores de forma previa a la colocación del dispositivo de sujeción en la palmera, cada vez que se necesita emitir una nueva señal. Además, para asegurar que la presión de los transductores sobre las palmeras sea lo más homogénea y estable posible, en cada medida se utilizan dos gatos de sujeción a cada lado de las planchas.

Todas las señales son representadas en el osciloscopio digital (Agilent Technologies, DSO-X-3014A) a través de sus cuatro canales. La señal emitida se presenta en una escala de 5 V en la pantalla mientras que las de recepción se encuentran a 5 mV.

3.3.3. Toma de medidas y métodos de análisis

Se comenta tanto el diseño general del experimento como el proceso seguido con cada medida singular.

Registro y tratamiento de la señal ultrasónica

La señal emitida por el generador y las 3 señales recibidas son registradas por el osciloscopio digital que registra 2.000 puntos de medida que, con la configuración temporal programada tras la realización de varias pruebas iniciales, equivalen a la obtención de 1.000 puntos por ciclo. Toda esta información es guardada en una memoria externa con un formato “.csv”. Posteriormente, estos datos son tratados a

través del software MATLAB para calcular la envolvente de todas las señales que se reciban, uno de los parámetros en los cuales este ensayo se fija para cumplir los objetivos propuestos.

Para la determinación sobre la aparición de galerías, se estudiarán tres fenómenos:

- La variación de forma de la envolvente.
- La variación de la amplitud emisión/recepción.
- La variación de fase.

A continuación se comentará cada una de estas situaciones.

El cálculo de la función de la envolvente, $e(t_0)$, se realizará a través del siguiente algoritmo, basado en la suma diferencial de todas las amplitudes de la función de la onda, $y(t)$, expresada al cuadrado para que no sea nula, en función del tiempo para cada periodo:

$$e(t_0) = \frac{1}{T} \sqrt{\int_{t=t_0}^{t=t_0+T} y^2(t) dt}$$

Por la propia respuesta de los transductores, la señal se filtra de modo que pasa de una señal cuadrática eléctrica en el canal 1 a una señal a la entrada de cada transductor de recepción, visualizada en los canales 2, 3 y 4. Se mide un patrón, aproximado, de referencia. Al atravesar un medio más o menos homogéneo, como la palmera cuando no hay presencia de orificio, no hay diferencias significativas respecto al patrón, manteniéndose la forma de la señal (forma de la envolvente), aunque descendiendo la amplitud bruscamente en torno a 10^4 veces.

En el momento en que se producen ecos concretos por la presencia de un obstáculo, como por ejemplo la presencia de galerías, la señal tiende a cambiar su forma visualizándose dos picos en la envolvente fruto de la llegada retardada de los ecos.

En la Figura 10 se muestran ejemplos de las envolventes de las ondas propagadas por un medio homogéneo y en otro con ecos concretos.

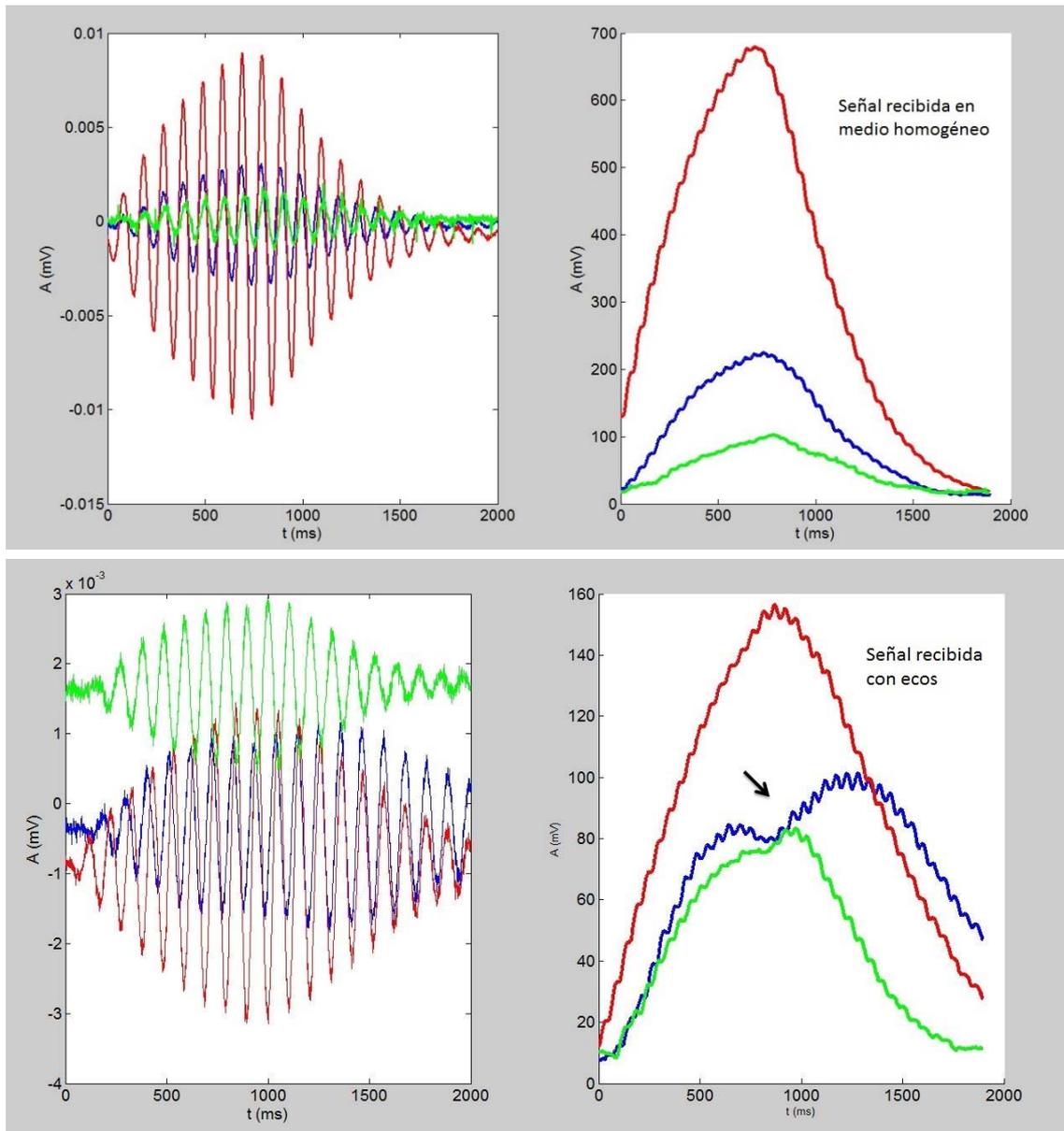


Figura 10. Señales recibidas con y sin obstáculo en el medio de propagación de la onda.

Por otro lado, la detección de las galerías se basará también en la disminución del nivel (amplitud) de la señal recibida. La recepción de esta señal se realizará por medio de tres transductores simultáneos, tal y como se ha descrito en el equipo de medida y puede observarse en la Figura 9, de forma que se espera que en tejidos sanos, la amplitud del transductor central sea mayor que los otros dos al estar enfrentado al transductor emisor llegando la perturbación a través del camino más corto y siendo por tanto, la atenuación a través del medio menor. Sin embargo, con presencia de orificio, el efecto debería ser totalmente opuesto, siendo la amplitud de los transductores laterales mayor que el central, debido a las reflexiones y el efecto sombra de la galería en el transductor central. Esta hipótesis teórica de partida se muestra de manera esquemática en la Figura 11.

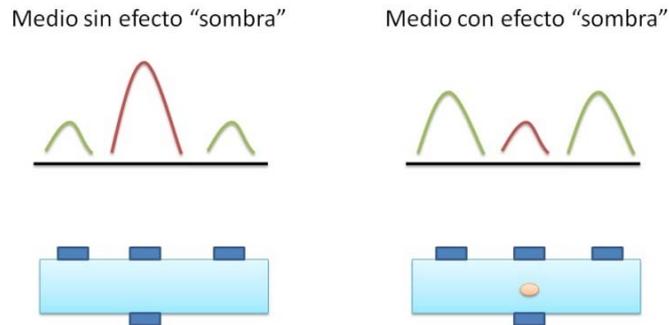


Figura 11. Diferencia en amplitud en función del efecto “sombra”

El resultado del estudio de los cambios de fase ha dado resultados inestables por lo que este parámetro no se tendrá en cuenta para la determinación de la existencia de galerías en este primer estudio.

Por último, se realizará un análisis estadístico a través del software STATGRAPHICS Centurion XVI, de los distintos resultados gracias a las diferentes repeticiones realizadas, con el fin de poder comprobar su significación y extraer las distintas conclusiones a los ensayos.

Diseño experimental

El ensayo se ha estructurado en varias pruebas. En un primer lugar, se ha caracterizado el material vegetal a través de distintas medidas, todo ello, en condiciones de total sequedad de la palmera y midiendo en todo momento dentro del tejido interno de la palmera evitando los tejidos de la corteza, asemejando el ensayo a las condiciones con la mayor homogeneidad posible de los tejidos de la palmera, medio por el cual se propagarán las ondas. Para ello, se han tomado dos puntos situados a distinta altura, uno a 3 cm y otro a 6 cm del borde, de forma que también se puede comprobar la transmisión de los ultrasonidos en ambos casos y observar la importancia de la cercanía del borde cercano en el primer caso. Es importante determinar si esta distancia es suficiente para evitar que las ondas se transmitan por la superficie de la palmera debido al cambio de impedancia que puede suponer la cercanía al borde. Además, se han usado las dos disposiciones posibles del aparato de medida en ambos puntos realizando, por tanto, un barrido lo más amplio posible de la zona, realizando desplazamientos tanto en el eje horizontal (dos disposiciones de las planchas) como en el vertical (los dos puntos a distinta altura). Se han realizado, por tanto, 4 tipos de

medidas a través estas dos variables. Una vez realizada esta caracterización se han repetido las distintas mediciones, pero con la presencia de un orificio de 10 mm centrado respecto al transductor emisor para comprobar el efecto en los distintos parámetros a analizar en las señales recibidas al encontrarse con un obstáculo (aire) entre el tejido de la palmera, respecto a las medidas realizadas sin el mismo. Las galerías se realizaron de forma artificial con un taladro automático como se muestra en la Figura 12 utilizando distintas brocas según la prueba.

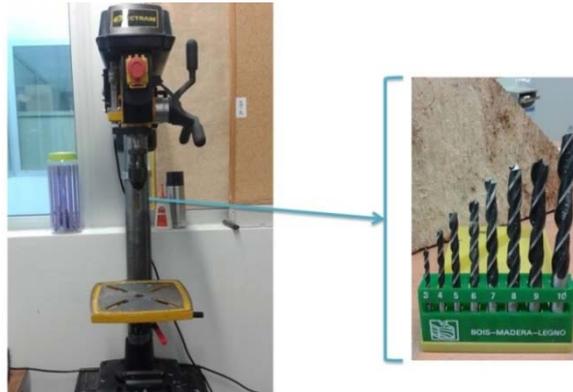


Figura 12. Taladro y brocas utilizadas en el estudio

Así mismo, todas estas medidas se han hecho de forma idéntica en varios fragmentos de diferentes palmeras realizando muchas repeticiones de cada una de las medidas para poder corroborar los resultados. En total se realizaron aproximadamente 100 medidas, de las cuales se han tomado 3 por cada bloque como válidas. En la Figura 13 se esquematiza el procedimiento realizado en esta prueba.

Por otra parte, también se han realizado las mismas medidas, pero sólo sin orificio, en un fragmento de doble espesor que las anteriores, 30 cm para poder comprobar si la potencia del generador es suficiente para recibir una señal de buena calidad con este mayor espesor.

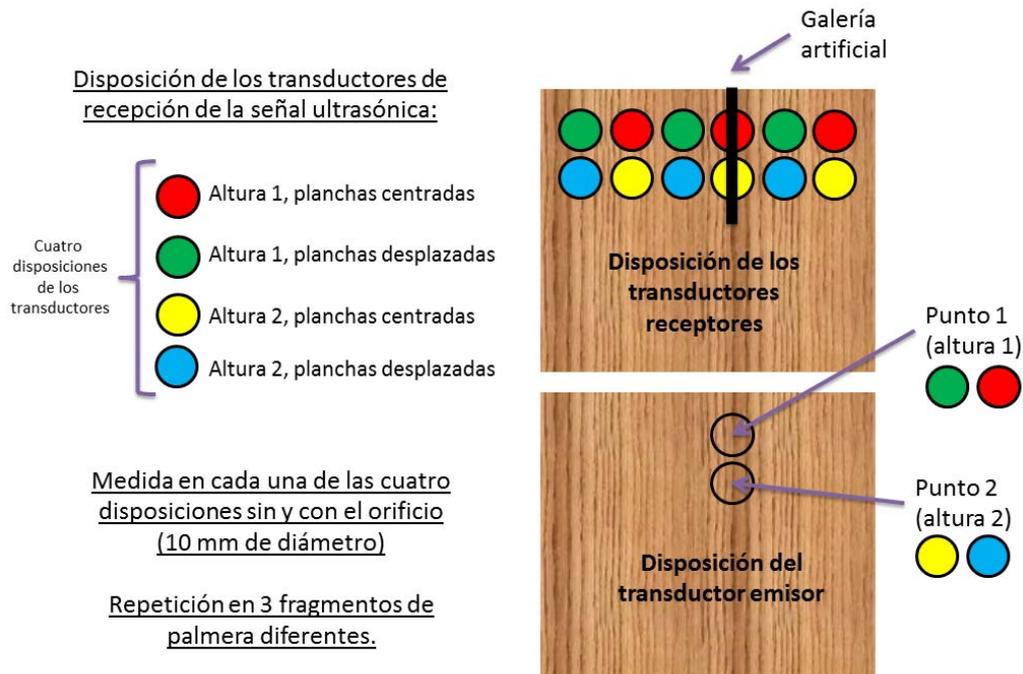


Figura 13. Esquema experimental

Una vez realizada esta prueba, y determinando si esta técnica es capaz de detectar la presencia de las galerías, se ha realizado otro estudio para comprobar la relación que presenta el diámetro del orificio respecto a la eficacia de la técnica. Para ello, se ha cogido otros fragmentos de palmera con las mismas características que los anteriores y siguiendo el mismo protocolo que en los ensayos anteriores en cuanto a la disposición de los puntos y repeticiones a realizar, pero, en este caso, siempre con la misma disposición de las planchas del aparato de medida, manteniendo el transductor emisor enfrente al transductor receptor central de la otra plancha. Con estas premisas, se han realizado las medidas sin orificio y con orificio de 1, 5 y 10 mm realizando 10 repeticiones en cada uno de los casos, cogiendo los más precisos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Previo a la realización de las primeras medidas y la programación del diseño experimental fueron realizadas distintas medidas, 100 aproximadamente, en varios fragmentos de palmeras con las condiciones citadas en el apartado anterior, con la finalidad de calibrar el aparato de medida al ser el primer ensayo de esta técnica aplicado a este material vegetal. En un principio, las medidas se realizaron con un único transductor, pero la enorme variabilidad registrada en las medidas por diversos factores como la cantidad de gel o la presión de sujeción repercutió en la necesidad de utilizar la disposición de 3 transductores, empleada finalmente, disminuyendo considerablemente la influencia de estos factores en el resultado obtenido, al estar los tres con la misma calibración. Para ello, se ideó el aparato de sujeción descrito en el apartado de Material y Métodos asegurando la correcta sujeción y presión en cada una de las tandas de medida, evitando así que estos factores enmascarasen el resultado obtenido.

En este calibrado, fue necesario realizar una gran cantidad de medidas realizando orificios desde 1 hasta los 10 mm con distintas configuraciones del osciloscopio, hasta llegar a la conclusión que el número de ciclos óptimos de señal a emitir, para una correcta recepción, era de 8 siendo un tiempo suficientemente corto como para ser tratado como un transitorio y suficientemente largo como para introducir una cantidad de energía mensurable y con una adecuada relación señal-ruido. Así mismo, fue necesario crear una rutina de guardado de los resultados de las medidas obtenidas, de forma que el proceso estos ficheros se registraran registrados en el osciloscopio fueran compatibles con los tratamientos matemáticos y estadísticos posteriores realizadas con el software MATLAB.

Tras la realización de estas primeras pruebas y una vez conocidos los parámetros y escalas óptimos con los que poder trabajar correctamente, se iniciaron las medidas experimentales emitiendo las señales ultrasónicas en los distintos fragmentos de palmera preparados para ello comparando luego a través del tratamiento matemático realizado las diferencias visibles gráficamente entre las medidas realizadas sin presencia de orificio y las que sí lo tenían con el diámetro de 10 mm establecido con anterioridad.

Los resultados se han basado en la comparación de las amplitudes de las señales recibidas y en la forma de las envolventes.

Comparando las medidas del mismo fragmento de palmera en el mismo punto de medida, se puede comprobar, en prácticamente el 100% de los casos, que la amplitud máxima de la envolvente de la señal registrada por el transductor central

(gráficamente expresado de color rojo) disminuye de forma considerable cuando hay presencia de orificio en la palmera respecto a la medida con medio homogéneo (sin galería).

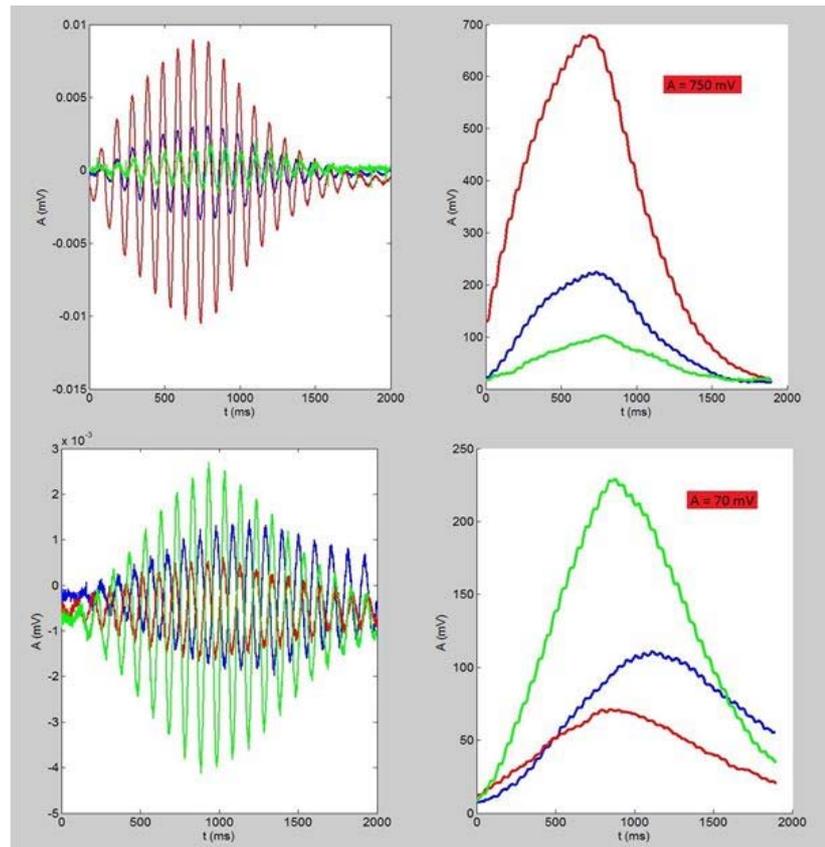
Esta disminución en la amplitud se visualiza más en unas medidas que en otras, variando la proporción en la disminución detectada. Esta variación, se debe, por un lado a la dificultad en lograr en todos los ensayos la exactitud en la posición del transductor emisor respecto de la situación de la galería de forma que puede existir siempre un cierto error experimental, y por otro, a la variación de presión a la que están sometidas las placas y por tanto los transductores. No obstante, a mayor o menor escala, la disminución de la amplitud ocurre en la totalidad de los casos. Para evitar esta aleatoriedad, no se utilizará esta disminución, sino un parámetro que se introducirá más adelante.

La amplitud registrada en el transductor centrado (rojo) es MAYOR que la detectada en los transductores verde y azul (transductores laterales) en la mayoría de puntos cuando se mide –a modo de control- en la madera sin orificios. Sin embargo dicha amplitud registrada en el transductor centrado (rojo) es comparable o menor que la detectada en los transductores verde y azul (transductores laterales) en la mayoría de puntos una vez se practica el orificio. Esto informa de la existencia de una “sombra” que impide que llegue la señal por el canal centrado. En efecto, en las medidas efectuadas en los mismos puntos pero sin orificio, se aprecia que la amplitud de señal centrada es mayor a las laterales por un factor de un valor de entre 2’5 y 3’5. En la Figura 14 se muestra esta comparación en un punto y fragmento de palmera concreto.

Analizando las señales recibidas en el transductor receptor central en los 3 fragmentos de palmeras, se comprueba que esta disminución de la amplitud ocurre en todos los casos.

Tras la visualización de los resultados tanto gráficos como numéricos se puede comprobar como los valores de amplitud para cada medida presentan una variación muy grande debida entre otras causas a la dificultad en controlar los diversos factores que pueden influir en la calidad de la recepción de las señales como pueden ser la cantidad de gel en cada transductor, la presión ejercida en cada medida o la precisión en la colocación del aparato de medida.

Medida sin orificio



Medida con orificio
(10 mm)

Figura 14. Comparación señales recibidas en un fragmento de palmera con y sin orificio.

Para disminuir el efecto de estos factores, se valorará el parámetro de la directividad (D) expresado como la relación entre la amplitud de la envolvente registrada por el transductor central y la media de las amplitudes de las envolventes de los transductores laterales. Esta medida es relativa a partir de registros efectuados con una misma configuración, de modo que es independiente en gran medida de la configuración del dispositivo de medida.

$$D = \frac{A_{t. \text{ central}}}{\left(\frac{A_{t. \text{ lateral 1}} + A_{t. \text{ lateral 2}}}{2} \right)}$$

siendo:

D= directividad

A_{ti} = amplitud del transductor i

En la Tabla 3, se recogen los distintos resultados obtenidos y la directividad para cada una de las medidas efectuadas en la sección de palmera “3” correspondientes a 3 repeticiones de cada tipo de medida, siendo los orificios en todas las medidas de 10 mm. Se ha escogido esta palmera por tener el mejor estado de conservación.

Tabla 2. Resultados de la Directividad (D) de las medidas experimentales

PUNTO	ORIFICIO	Experimento	A (t. central)	A (t. lateral 1)	A (t. lateral 2)	A (media t. laterales)	D
1	SI	1	71,1	111	229	170	0,418235294
1	SI	2	314	235	136	185,5	1,692722372
1	SI	3	143	144	269	206,5	0,692493947
1	NO	1	450	212	120	166	2,710843373
1	NO	2	300	122	46	84	3,571428571
1	NO	3	680	220	98	159	4,27672956
2	SI	1	122	90	78	84	1,452380952
2	SI	2	156	101	78	89,5	1,74301676
2	SI	3	110	130	160	145	0,75862069
2	NO	1	136	55	37	46	2,956521739
2	NO	2	92	43	25	34	2,705882353
2	NO	3	23	12	10	11	2,090909091
3	SI	1	400	170	25	97,5	4,102564103
3	SI	2	220	250	10	130	1,692307692
3	SI	3	167	166	20	93	1,795698925
3	NO	1	510	1050	20	535	0,953271028
3	NO	2	580	472	20	246	2,357723577
3	NO	3	300	610	20	315	0,952380952
4	SI	1	55	50	46	48	1,145833333
4	SI	2	100	190	175	182,5	0,547945205
4	SI	3	150	190	210	171,2	0,63456788
4	NO	1	500	210	220	215	2,325581395
4	NO	2	490	210	210	213	2,546849235
4	NO	3	380	90	103	96,5	3,937823834

Como se observa en la tabla anterior, la directividad en las medidas efectuadas con presencia del orificio en la palmera siempre es menor respecto a las medidas sin él. En algunos casos, además, la directividad llega a ser menor que 1 en las medidas con presencia de orificio lo que significa que la amplitud de la señal del

transductor central disminuye de forma que llega a ser menor que la recibida por los transductores laterales, fenómeno que muestra la viabilidad de la técnica de ultrasonidos, bajo las condiciones establecidas en este ensayo, para la detección de las galerías aunque sólo en el caso de que ésta se encuentre situada justo delante del transductor emisor.

En la Figura 15 se muestran, a modo de ejemplo, algunas de estas medidas donde se puede observar la baja señal e inestabilidad de la medida.

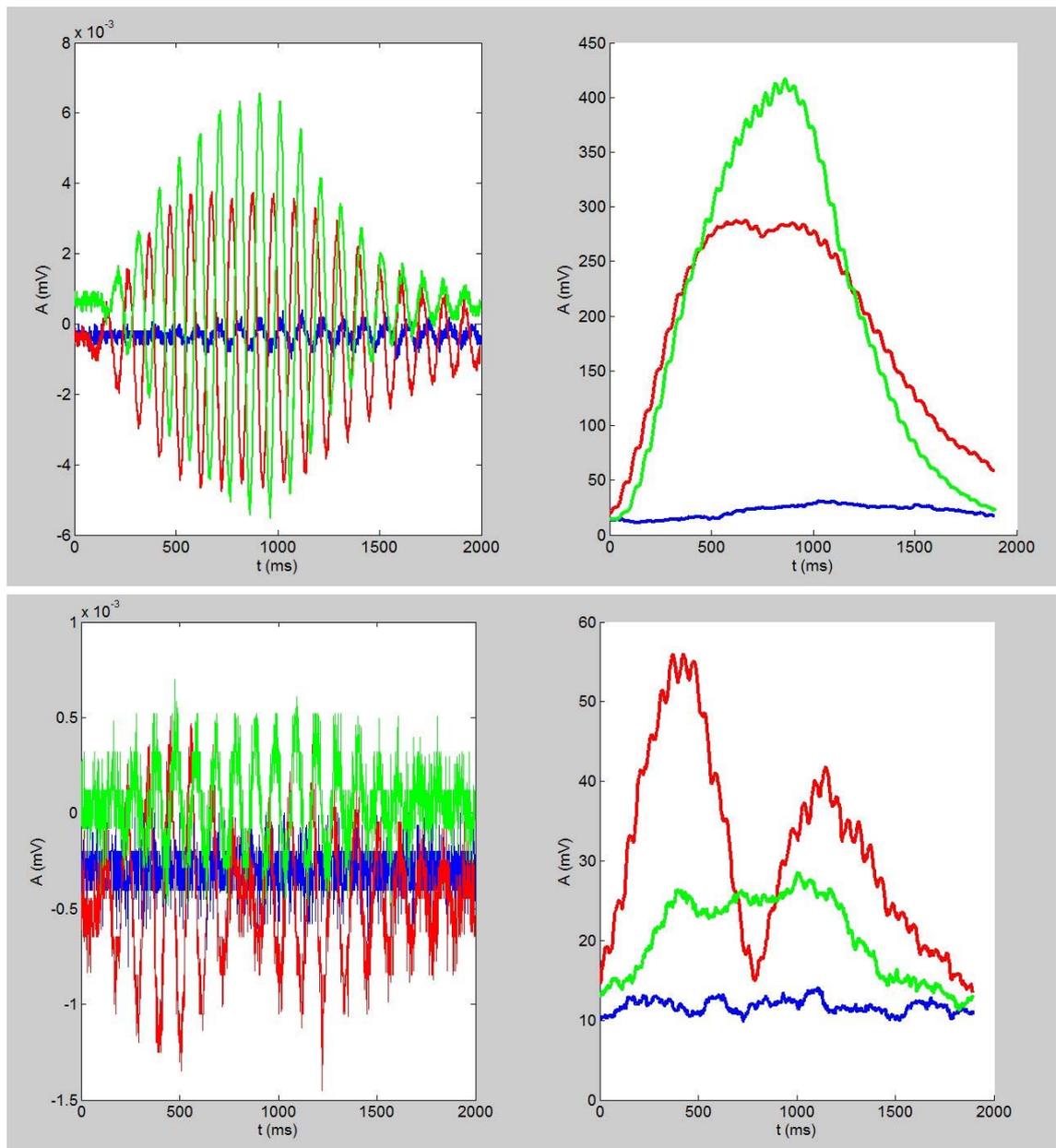


Figura 15. Señales defectuosas.

Esta inestabilidad en estas medidas pueden deberse a un exceso de sequedad en algunos fragmentos de palmera o la colocación de los transductores en zonas próximas al borde o a la corteza de la misma.

Para evaluar la significación estadística de estos resultados, se ha realizado un Análisis de la Varianza multifactorial (ANOVA) cogiendo como variable dependiente la directividad (D) respecto al tipo de medida realizado como variable PUNTO (altura del punto y disposición de los transductores) y a la presencia o no del orificio como variable ORIFICIO, ambas tomadas como variables no numéricas. Para la realización de este análisis se ha tomado un nivel de confianza del 95 % (K=0,95), por lo que se ha considerado un error máximo (riesgo de primera especie) aceptable del 5 %.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del Análisis de la Varianza.

Tabla 3. ANOVA de la Directividad respecto a las variables orificio y punto.

Análisis de la Varianza para D - Sumas de Cuadrados de Tipo III					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:ORIFICIO	7,4441	1	7,4441	5,86	0,0270
B:PUNTO	0,292396	3	0,0974653	0,08	0,9717
RESIDUOS	21,5983	17	1,27049		
TOTAL (CORREGIDO)	29,3348	21			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

A la vista del análisis, se puede concluir que con un p-value del 0,027 (p-value < 5 %), las diferencias entre los resultados de las medidas con y sin orificio son estadísticamente significativas por lo que la directividad si es un parámetro válido para la detección de los orificios efectuados en los fragmentos de palmera. Sin embargo, respecto al tipo de medida realizado (variable PUNTO), las diferencias obtenidas no son estadísticamente significativas por lo que la directividad no depende de la altura de medida y la disposición de los transductores.

En la Figura 16 se muestran los intervalos LSD de la directividad respecto a la presencia o no de orificios en la palmera pudiéndose ver de forma clara como los intervalos no se solapan corroborando el análisis anterior.

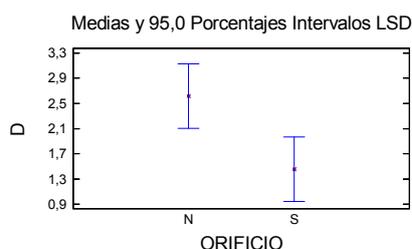


Figura 16. Intervalo LSD de la Directividad respecto a la presencia o no de orificio en la palmera.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la presencia de ecos debidos a que la energía traza distintos caminos, con distintos tiempos. Cuando hay un cambio de medio –que conlleve asimismo un cambio de impedancia acústica- (orificios) se producen reflexiones en las superficies frontera, que dan lugar a que parte de la energía llegue retrasada respecto a la señal directa, llegando parte de la señal (energía) en un tiempo determinado (señal directa) y otra unos segundos después (señal reflejada). Este fenómeno se puede comprobar gráficamente a través de al forma de la envolvente con la visualización de dos picos de señal debido a dicho retardo.

En la Figura 17 se muestran las envolventes de las señales recibidas en dos de las medidas realizadas con presencia de orificio en la palmera donde se puede observar claramente de la presencia de los dos picos producidos por los ecos.

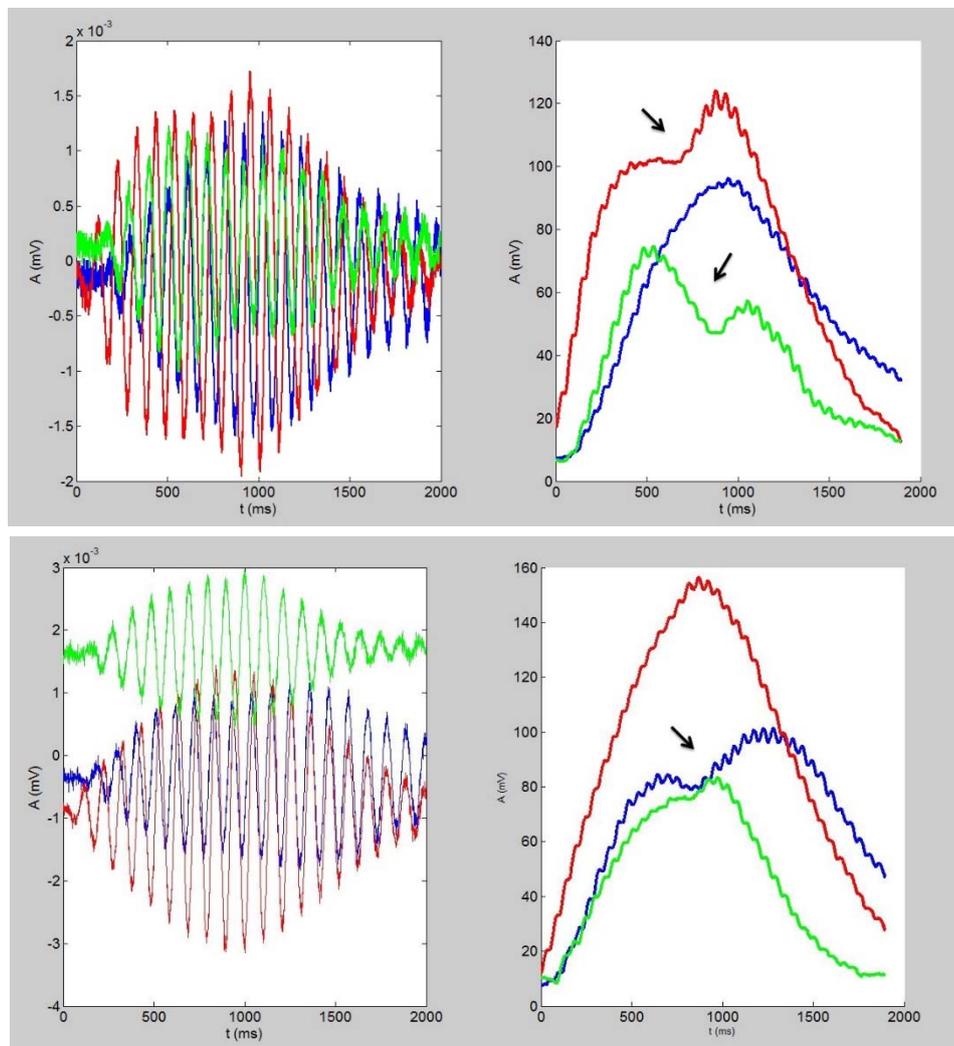


Figura 17. Ecos producidos en fragmentos 1 y 2 de palmera con orificio

En otras medidas en la que la precisión de medida ha sido más baja, aunque no de forma tan clara como las anteriores también se pueden observar estas reflexiones a pequeña escala como se muestra en la Figura 18.

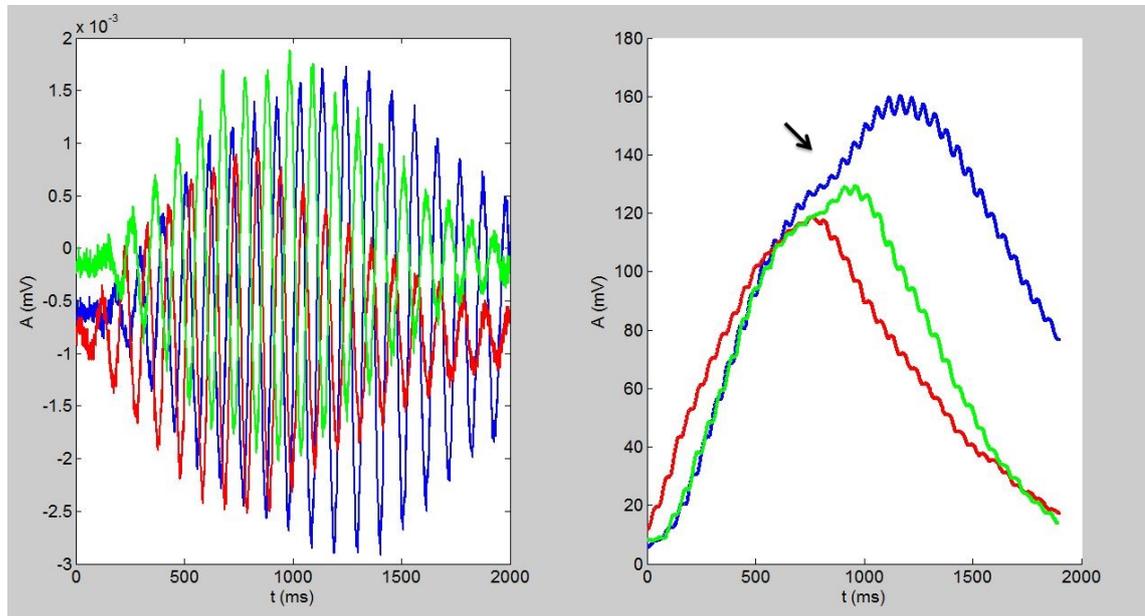


Figura 18. Ecos producidos en fragmento de palmera 3 con orificio

A la vista de estos resultados, por tanto, se puede afirmar que la técnica de ultrasonidos si es capaz de detectar la presencia de las galerías en los fragmentos de palmeras utilizados a través de los dos fenómenos: la disminución de la amplitud y los ecos producidos.

Cuando la galería se encuentra justo en el centro de la trayectoria de propagación de la señal emitida, debido al efecto sombra que genera el obstáculo, se puede detectar su presencia a través de la disminución de la amplitud que, en el caso de tapan el orificio completamente la trayectoria de la perturbación, además, la señal recibida por el transductor central será, incluso, menor a las señales laterales. Sin embargo, si la galería no está completamente centrada y sólo obstaculiza de forma parcial, aunque sigue habiendo una disminución de la amplitud, el parámetro en el cual mejor se aprecia la presencia de la galería es en la forma de la envolvente a través de los ecos.

En el caso de galerías más pequeñas, simulando los primeros estados de ataque de la plaga del picudo rojo en las palmeras, momento más adecuado para su control, las condiciones no son tan favorables como las de las pruebas anteriores al no producirse en ningún momento la obstaculización total de las ondas. Para ello, con la segunda prueba, se han realizado varias pruebas con el mismo fragmento de

palmera realizando medidas con y sin orificio, siendo en este caso, el diámetro de las galerías de 1 mm. Los resultados obtenidos son los siguientes:

En cuanto a la amplitud, se comprueba que, en este caso, se mantiene dentro del mismo rango no modificándose la directividad como si ocurría con la presencia de los orificios de diámetro de 10 mm. Esto ocurre por el fenómeno de difracción puesto que al ser el tamaño del obstáculo, la galería en este caso, inferior a la longitud de onda de la señal emitida, la onda bordea parcialmente el obstáculo en vez de atravesarlo de forma que no se produce tan nítidamente el efecto sombra.

No obstante, a través del otro fenómeno estudiado, si se ha podido detectar la galería por los ecos debidos al retardo de la energía reflejada como se observa en la Figura 19 asemejándose al caso de “obstaculización parcial” de la prueba anterior. En este caso, no hay que fijarse en la señal azul puesto que la baja amplitud de la señal es debida a la presencia cercana del borde de la palmera que provoca que se pierda la señal.

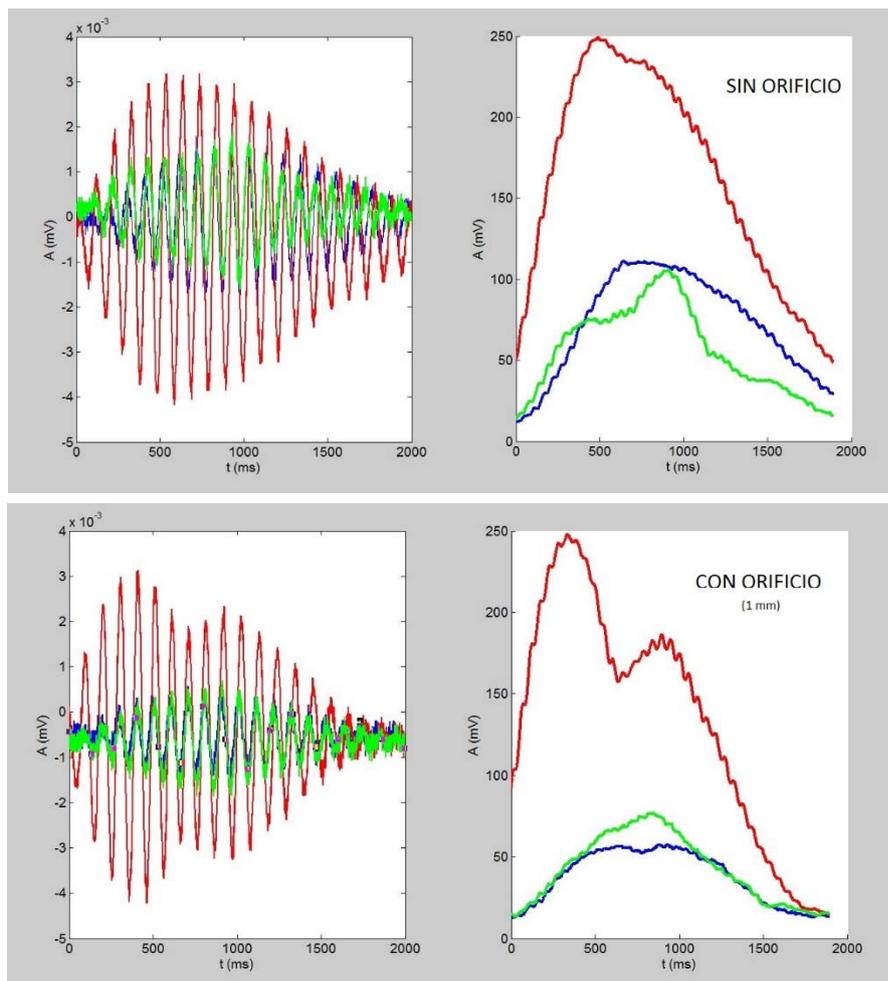


Figura 19. Señal recibida en fragmento de palmera sin y con orificio de 1 mm de diámetro.

Hay que tener en cuenta que el método es muy sensible a las características del transductor, y si cambia su factor de calidad o su frecuencia de resonancia hay cambios significativos que podrían malinterpretarse. También es muy sensible a parámetros de montaje, presión, punto exacto de contacto, cantidad de gel, etc

Queda claro, por tanto, que la posibilidad de detectar las galerías mediante este método es correcto. Queda ahora, definir un protocolo que permita detectarlas in situ, este último paso es el que posibilitará llevar el método al éxito.

Por último, en las medidas realizadas con fragmentos de palmeras de 30 cm de espesor, el doble que en las pruebas anteriores, no se ha podido obtener ninguna conclusión puesto que la señal recibida ha sido prácticamente nula al haber demasiada atenuación en el medio. Para la correcta realización de estas medidas será necesario, por tanto, disponer de un amplificador de potencia conectado al generador para que se pueda recibir una correcta señal que se pueda trabajar con ella. En el presente estudio no se han podido realizar estas medidas con éxito al no disponer de un dispositivo de amplificación válido para el ensayo experimental.

V. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Tras todas las pruebas efectuadas en el presente estudio se puede concluir que:

1. La técnica de ultrasonidos permite detectar galerías internas en el tejido vegetal de las palmeras del género *Phoenix*, en condiciones de laboratorio con total sequedad del material vegetal y propagación de las ondas emitidas por un medio bastante homogéneo. Esta afirmación se puede dar como válida para los espesores de palmera ensayados de 15 cm necesitando de una mayor potencia del generador a través del uso de un amplificador para poder medir a espesores mayores.
2. La detección de las galerías se puede conseguir a través de dos fenómenos:
 - a) La disminución de la amplitud de la señal recibida por el transductor receptor, cuando éste se encuentra centrado con la galería, siendo ésta de un tamaño mayor que la longitud de onda de la frecuencia utilizada, de forma que ocurra el llamado efecto sombra por la obstaculización total de la señal emitida
 - b) La forma de la envolvente, al producirse dos picos en la señal recibida por el retardo producido por parte de la energía emitida a causa del efecto de la reflexión o eco por diferencia de impedancias acústicas.

VI. LINEAS FUTURAS

6. LINEAS FUTURAS

Tras la visualización de los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio y sabiendo los dos fenómenos en los cuales se debe basar la detección de las galerías en las palmeras y los parámetros ajustados al tejido vegetal estudiado, es necesario mejorar el dispositivo de forma que se pueda aumentar la precisión de las medidas y la obtención de señales más limpias y con menor variabilidad.

En primer lugar, será necesario en futuros estudios seguir las mediciones con parámetros más semejantes a la realidad con el material vegetal con una humedad más cercana a la real de las palmeras, así como espesores mayores por lo que será necesario el uso de amplificadores para obtener con éxito los resultados deseados siendo el objetivo final el poder llevar a la realidad esta técnica y poder finalmente ensayar en palmeras en invernadero.

De esta forma, queda mucho camino por recorrer, siendo este trabajo la primera fase para poder seguir poniendo a punto esta técnica cara a futuros trabajos, tanto en la detección de galerías producidas por picudo rojo, como en la detección de otros tipos de defectos producidos por diferentes tipos de plagas y enfermedades.

VII. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

ACUÑA, L., DÍEZ, M.R., CASADO, M., 2006. Los ultrasonidos y la calidad de la madera estructural. Aplicación a *Pinus pinaster*. *Universidad de Huelva*. 7-26

AGUSTÍ, M., 2010. *Fruticultura*. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 507 pp.

CABELLO, T., 2006. Biología y dinámica de población del picudo rojo de la palmera, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier, 1790) (Coleoptera: Dryophthoridae) en España. *I Jornada Internacional sobre el Picudo Rojo de las Palmeras. Fund. Agroalimed/Gen. Valenciana. Valencia.*, 1: 19-34.

CASAS, P., RODRÍGUEZ, A., GALEANA, C., QUIROZ, I., RESÉNDIZ, S., 2012. Ultrasonido en el primer trimestre del embarazo. 10 consideraciones básicas. *Revista médica del Instituto Mexicano de Seguridad Social*, 50: 497-504

FALEIRO, J.R. 2006. Insight into the management of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier: Based on experiences on coconut in India and date palm in Saudi Arabia. In: Fundación Agroalimed (Ed.). *I Jornada Internacional sobre el Picudo Rojo de las Palmeras (November, 2005)*. Fundación Agroalimed. Valencia. Spain, pp. 35-57.

GÓMEZ, S., MUÑOZ, C., FERRY, M., MARTÍNEZ, M.M., 2008. Bol. San. Veg. Plagas, 34: 147-149.

HERNÁNDEZ-MARANTE, D., FOLK, F., SÁNCHEZ, A., FERNÁNDEZ-ESCOBAR, R., 2003. Bol. San. Veg. Plagas, 29: 563-573.

LOPEZ-ALBA, E., SESE, L.F., VASCO-OLMO, J.M., DIAZ-GARRIDO, F.A., 2013. Industrial application of full field optical techniques to measure stress and strain in machine element. *Dyna rev.fac.nac.minas [online]*.80: 98-108, viewed on July 25th, 2015.

LÓPEZ, J.J., 2013. Feromonas, atrayentes y otros métodos tecnológicos para el control de picudo rojo de las palmeras. *Actas de las III Jornadas Técnicas Internacionales sobre feromonas, atrayentes, trampas y control biológico: herramientas para la gestión integrada*.

- MAESTRE, J.F., SALCEDO, F., ALARCÓN, J.J., SOTO-GARCÍA, M., 2015.** Aplicación de ultrasonidos para el control de algas en aguas regeneradas almacenadas en balsas de riego. *Actas del XXXVIII Congreso Nacional de Riegos*.
- MAGRAMA, 2015.** *Avance del Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del 2014*, visto el 1 de Julio del 2015.
<http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica>
- MARTÍNEZ, J., 2010.** Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles: evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos). *Macla*, 12: 54-55
- MARTÍNEZ, J.A., VITOLA, J., SANDOVAL, S., 2006.** Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido. *Tecnura*, 20: 4 -18.
- MARTÍN, M.M.; CABELLO, T., 2005.** Relaciones térmicas en la biología de *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Dryophthoridae). *IV Congreso Nacional de Entomología Aplicada*. Bragança (Portugal).
- MARTÍNEZ, T., FERNÁNDEZ, C., 2011.** Botanigard SC bioinsecticida comercial. Aplicaciones para el control del Picudo Rojo. *Phytoma España.*, 226: 51-55
- NAVARRO, D., HERNANDO, L., PARRA, H., 2004.** Sensores de ultrasonido usados en robótica móvil para la medición de distancias. *Scientia et Technica.*, 25: 35-40.
- PARRA, A., SALAZAR, A., DOMÉNECH, T., VERGARA, L., 2007.** Clasificación cronológica de cerámicas arqueológicas aplicando análisis ultrasónico. *Instituto universitario de restauración del patrimonio de la UPV.*, 2: 53-62
- SALAMA, H.S.; HARNDY, M.K.; MAGD EL-DIN, M., 2002.** The termal constant for timing the emergente of the red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus*(Oliv.) (Col.: Curculionidae). *AnzeigerfürSchändlingskunde*, 75: 26-29.
- 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(4)

Material de consulta:

KUTTRUFF, H., 1991. *Ultrasonics: Fundamentals and applications*. Elsevier science publisher LTD. England. 452 pp.

LLINARES, J., LLOPIS, A., SANCHO, J., 1991. *Acústica arquitectónica y urbanística*. Editorial UPV. España. 387 pp.