



---

Programa de doctorado de Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y  
de Desarrollo Rural Sostenible

**TESIS DOCTORAL**

**Caracterización de la respuesta del árbol a la  
recolección mecanizada con sacudidores de  
copa en sistemas de plantación en seto de  
cítricos y olivar**

*Characterization of tree response to mechanical harvesting with  
canopy shakers in citrus and olive hedgerow orchards*



**Autor**

Fernando Aragón Rodríguez

**Directores**

Sergio Castro García

Rafael Rubén Sola Guirado

Fecha de depósito en el Idep: 02/06/2021

TITULO: *Caracterización de la respuesta del árbol a la recolección mecanizada con sacudidores de copa en sistemas de plantación en seto de cítricos y olivar*

AUTOR: *Fernando Aragón Rodríguez*

---

© Edita: UCOPress. 2021  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es>

---



## TÍTULO DE LA TESIS:

CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DEL ÁRBOL A LA RECOLECCIÓN MECANIZADA CON SACUDIDORES DE COPA EN SISTEMAS DE PLANTACIÓN EN SETO DE CÍTRICOS Y OLIVAR.

## DOCTORANDO:

FERNANDO ARAGÓN RODRÍGUEZ

## INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

El transcurso del trabajo enmarcado dentro de esta tesis doctoral ha sido fluido y eficiente. Se han obtenido destacables avances a lo largo del desarrollo de este, cubriéndose los objetivos específicos perseguidos. Las actividades relacionadas con la investigación científica y exposición de esta, tales como artículos y congresos/jornadas, han sido bastantes prolíficas e incluso se han obtenido algunos premios por dichas comunicaciones.

Los trabajos publicados en forma de artículo científico con relación a los resultados de esta tesis doctoral son los siguiente:

**Aragon-Rodriguez, F.,** Castro-Garcia, S., Sola-Guirado, R. R., & Gil-Ribes, J.A. (2019). Fruit abscission pattern of 'Valencia' orange with canopy shaker system. *Scientia Horticulturae*, 246, 916-920. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.087>

Castro-Garcia, S., **Aragon-Rodriguez F.,** Sola-Guirado, R.R., Serrano, A.J., Soria-Olivas, E., & Gil-Ribes, J.A. (2019). Vibration Monitoring of the Mechanical Harvesting of Citrus to Improve Fruit Detachment Efficiency. *Sensors*, 19(8), 1760. <https://doi.org/10.3390/s19081760>

Castro-Garcia, S., **Aragon-Rodriguez, F.,** Arias-Calderón, R., Sola-Guirado, R. R., & Gil-Ribes, J.A. (2020). The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees. *Biosystems Engineering*, 193, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.019>

Sola-Guirado, R. R., **Aragon-Rodriguez, F.,** Castro-Garcia, S., & Gil-Ribes, J. (2019). The vibration behaviour of hedgerow olive trees in response to mechanical harvesting with straddle harvester. *Biosystems Engineering*, 184, 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.009>

Los artículos anteriormente mencionados se han publicado en las siguientes revistas científicas, todas ellas indexadas en el *Journal Citation Report (JCR)*.

	ISSN	Año de revisión	Categoría	Factor de impacto	Ranking categoría	Cuartil	Nº Artículos
<b>Biosystems Engineering</b>	1537-5110	2019	AGRICULTURE, MULTIDISCIPLINARY	3,215	6/58	Q1	2
<b>Scientia Horticulturae</b>	0304-4238	2019	HORTICULTURE	2,769	5/36	Q1	1
<b>Sensors</b>	1424-8220	2019	INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION	3,275	15/64	Q1	1

La participación en congresos, conferencias y simposios con relación a los resultados de esta tesis doctoral son los siguientes:

**Aragon-Rodriguez, F.,** Castro-Garcia, S., Sola-Guirado, R.R., Blanco-Roldan G., González-Sánchez, E. J., Bayano-Tejero, S., Gil-Ribes, J. A. (2019). Comportamiento dinámico de las ramas para la mejora de la recolección mecanizada de cítricos. XI Jornada Fruticultura SECH, Sevilla.

**Aragon-Rodriguez, F.,** Castro-Garcia, S., Sola-Guirado, R.R., Gil-Ribes, J. A. (2018). Tecnología aplicada para la recolección mecanizada de cítricos con sistemas sacudidores de copa. I Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias, Almería.

**Aragon-Rodriguez, F.,** Sola-Guirado, R.R., Castro-Garcia, S., Gil-Ribes, J. A. (2019). Patrones de desprendimiento de cítricos y respuesta del árbol bajo recolección mecanizada con sistemas sacudidores de copa. X Congreso Ibérico de Agroingeniería, Huesca. DOI: [http://dx.doi.org/10.26754/c\\_agroing.2019.com.3417](http://dx.doi.org/10.26754/c_agroing.2019.com.3417)

**Aragon-Rodriguez, F.,** Sola-Guirado, R.R., Castro-Garcia, S., Gil-Ribes, J. A. (2019). Respuesta dinámica del olivo en plantación en alta densidad a su recolección con cosechadora cabalgante. II Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias, Almería.

Castro-Garcia, S., Sola-Guirado, R.R., **Aragon-Rodriguez, F.,** Gil-Ribes, J. A. (2018). Vibration olive tree response to mechanical harvesting in narrow hedgerow orchard. 6<sup>th</sup> International Conference on Olive Tree and Olive Products (OLIVEBIOTEQ), Sevilla.

Los premios derivados del desarrollo de esta tesis doctoral se exponen a continuación:

1. Mejor comunicación en formato póster en el área temática “Agronomía, producción vegetal, ingeniería y sostenibilidad agrícola” en el I Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias, Almería, España, 2018 (Congreso Nacional).
2. Mejor comunicación oral en el área temática de “Mecanización” en el X Congreso de Agroingeniería, Huesca, España, 2019 (Congreso Internacional).

Además de los trabajos derivados del desarrollo de la tesis se han generado otros trabajos vinculados a la actividad investigadora, siendo estos los que siguen:

- Artículos científicos indexados en JCR:
  - Sola-Guirado, R. R., Bayano-Tejero, S., **Aragón-Rodríguez, F.,** Bernardi, B., Benalia, S., Castro-García, S. (2020). A smart system for the automatic evaluation of green olives visual quality in the field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105858>. JCR, 2019. Categoría: Agriculture, Multidisciplinary, Factor Impacto: 3,858, Posición 5/58, Q1.
- Congresos científicos:
  - Bayano-Tejero, S., Sola-Guirado, R. R., **Aragon-Rodriguez, F.,** Castro-García, S., Blanco-Roldan G., Gil-Ribes, J. A. (2019). Evaluación de la calidad de aceitunas exterior mediante algoritmo de aprendizaje. XIX Simposio Científico-Técnico de EXPOLIVA, Jaén.
  - Bayano-Tejero, S., **Aragón-Rodríguez, F.,** Pérez-Moya, J., Sola-Guirado, R.R., Blanco-Roldán, G., Castro-García, S., Gil-Ribes, J.A. (2021). Tecnologías para la postcosecha de la aceituna de mesa y su trazabilidad. Congreso en red de Olivicultura, Citricultura y Fruticultura de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, on-line.
  - Sola-Guirado, R. R., Romero, P. E., González-Sánchez, E. J., **Aragon-Rodriguez, F.,** Castro-García, S. (2019). Gamificación como instrumento para mejorar los indicadores docentes en asignaturas de ingeniería agroforestal. X Congreso Ibérico de Agroingeniería, Huesca.

- Revistas de divulgación:
  - Gil-Ribes, J. A., Blanco-Roldan G., Sola-Guirado, R. R., Bayano-Tejero, S., Pérez-Moya, J., **Aragon-Rodriguez, F.** (2021). CPP INNOLIVAR: Mecanización 4.0 en el Olivar. Sistema de trazabilidad IOLIVETRACK. Óleo Revista, 184, 20-23.
  - Gil-Ribes, J. A., Blanco-Roldan G., Sola-Guirado, R. R., Castro-García, S., González-Sánchez, E. J., Bayano-Tejero, S., Nieto-Godoy, A., Márquez-García, F., Pérez-Moya, J., **Aragon-Rodriguez, F.**, Lara, F. (2020). CPP INNOLIVAR: Mecanización 4.0 en el olivar. Mercacei Magazine, 104, 46-47. <https://www.mercacei.com/noticia/53051/mercacei-magazine---hemeroteca/sumario-n104.html>

Esta tesis doctoral ha sido desarrollada dentro de los siguientes proyectos:

- “Aplicación de nuevas tecnologías para una estrategia integral de la recolección mecanizada de cítricos (CITRUSREC)” RTA2014-00025-C05-03 del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA, España) financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).
- Proyecto Innolivar, - Compra Pública de Innovación en su modalidad de Compra Pública Precomercial, de acuerdo con lo establecido en el Convenio entre el antiguo Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (actual Ministerio de Ciencia, Innovación) y la Universidad de Córdoba, cofinanciado en un 80% por fondos FEDER, dentro del Programa Operativo Pluriregional de España 2014-2020.

Por las aportaciones mostradas anteriormente se valora que este trabajo reúne los condicionantes necesarios establecidos por la Universidad de Córdoba para la presentación de esta Tesis Doctoral, como compendio de artículos, por parte de D. Fernando Aragón Rodríguez, emitiéndose un juicio positivo.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 31 de Mayo de 2021

Firma de los directores

Fdo.: Sergio Castro García

Fdo.: Rafael Rubén Sola Guirado

# Agradecimientos

## Agradecimientos

Agradecer a mis directores de la tesis doctoral, Dr. Sergio Castro García y Dr. Rafael Rubén Sola Guirado, por su profesionalidad, trabajo, dedicación y gran trato humano. Gracias por cada momento dedicado a aclarar cualquier tipo de duda y facilitar mi aprendizaje, enriqueciéndolo con sus conocimientos, guiándome y orientándome a lo largo de este camino posibilitando el desarrollo de este trabajo.

Deseo reconocer también mi gratitud al resto de autores por su contribución a los artículos que han conformado esta tesis, el Catedrático Jesús Antonio Gil Ribes, perteneciente al Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Córdoba, el Catedrático Emilio Soria Olivas y el Dr. Antonio José Serrano López, del Departamento de Ingeniería Electrónica, dentro del IDAL (*Intelligent Data Analysis Laboratory*) perteneciente a la Universidad de Valencia y la Dra. Rocío Arias Calderón del Instituto Nacional de Investigación Agraria y Veterinaria, INIAV de Portugal.

Quiero extender mi agradecimiento a mis compañeros de laboratorio, Sergio Bayano Tejero y Juan Pérez Moya, con los cuales he compartido mis inquietudes y divagaciones en las pausas del café y han hecho más amenos mis días de trabajo, demostrando una gran calidad humana.

Dar las gracias al Departamento de Ingeniería Rural, Construcciones Civiles y Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Córdoba y a los dos proyectos de investigación que han permitido el desarrollo de esta tesis. En primer lugar, el proyecto de investigación “Aplicación de nuevas tecnologías para una estrategia integral de la recolección mecanizada de cítricos (CITRUSREC)” RTA2014-00025-C05-03 del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA, España) financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). En segundo lugar, el Proyecto Innolivar, - Compra Pública de Innovación en su modalidad de Compra Pública Precomercial, de acuerdo con lo establecido en el Convenio entre el antiguo Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (actual Ministerio de Ciencia, Innovación) y la Universidad de Córdoba, cofinanciado en un 80% por fondos FEDER, dentro del Programa Operativo Pluriregional de España 2014-2020.

Y, por último, gracias a mi familia que me han prestado apoyo moral, paciencia, amor y comprensión, estando dispuesta a acompañarme en este camino.

# Caracterización de la respuesta del árbol a la recolección mecanizada con sacudidores de copa en sistemas de plantación en seto de cítricos y olivar

Fernando Aragón Rodríguez



## Índice de contenido

Capítulo 1 Introducción .....	15
1.1 Introducción .....	16
1.2 Plantaciones en seto .....	17
1.3 Sistemas de recolección basados en sacudidores de copa .....	21
1.3.1 Sacudidor de copa para seto ancho .....	21
1.3.2 Sacudidor de copa para seto estrecho .....	25
1.4 Justificación de la tesis .....	30
Capítulo 2 Hipótesis y objetivos .....	32
2.1 Hipótesis inicial.....	33
2.2 Objetivos .....	33
2.2.1 Objetivo general .....	33
2.2.2 Objetivos específicos.....	33
Capítulo 3 La contribución de los frutos y las hojas a la respuesta dinámica de las ramas secundarias de los naranjos .....	35
3.1 Resumen/Abstract.....	36
3.2 Introducción .....	36
3.3 Materiales y métodos.....	38
3.4 Resultados .....	40
3.5 Discusión .....	42
3.5.1 La contribución de los frutos a la respuesta dinámica de la rama .....	43
3.5.2 La contribución de las hojas a la respuesta dinámica de la rama .....	44
3.5.3 Implicaciones para los sistemas de recolección mecanizada de frutos .....	45
3.6 Conclusiones.....	45
Capítulo 4 Monitorización de las señales de vibración en la recolección mecanizada de cítricos para mejorar la eficiencia del desprendimiento de los frutos .....	46
4.1 Resumen/Abstract.....	47
4.2 Introducción .....	47
4.3 Materiales y métodos.....	49
4.4 Resultados y discusión.....	53
4.5 Conclusiones.....	57
Capítulo 5 Patrón de abscisión de naranja variedad "Valencia" con sistema sacudidor de copa .....	59
5.1 Resumen/Abstract.....	60
5.2 Introducción .....	60

5.3 Materiales y métodos.....	62
5.4 Resultados .....	64
5.5 Discusión .....	66
5.6 Conclusiones.....	68
Capítulo 6 El comportamiento vibratorio de los olivos en seto en respuesta a la recolección mecanizada con cosechadora cabalgante.....	69
6.1 Resumen/Abstract.....	70
6.2 Introducción .....	70
6.3 Materiales y métodos.....	72
6.4 Resultados y discusión.....	74
6.5 Conclusiones.....	80
Capítulo 7 Conclusiones .....	82
Referencias .....	85
Anexos .....	102
<i>Anexo I. Vibration Monitoring of the Mechanical Harvesting of Citrus to Improve Fruit Detachment Efficiency</i> .....	103

## Índice de figuras

Figura 1.1. Plantación de seto estrecho (izq.) y seto ancho (dcha.) de olivar	17
Figura 1.2. Plantación de seto estrecho (izq.) y seto ancho (dcha.) de cítricos	18
Figura 1.3. Sistemas de recolección mecanizada comerciales basadas en sacudidores de copa para plantaciones en seto ancho. Izquierda: sacudidor lateral de un lado (OXBO 3210), central: sacudidor lateral en tándem (OXBO 3220), derecha: cosechadora cabalgante de seto ancho (MAQTEC Colossus).	21
Figura 1.4. Sistemas de recolección mecanizada comerciales basadas en sacudidores de copa para plantaciones en seto estrecho comerciales. Izquierda: cosechadora cabalgante arrastrada PELLENC CV5045 (PELLENC, s. f.), central: cosechadora cabalgante autopropulsada Gregoire G10.330 (GREGOIRE, s. f.), derecha: cosechadora cabalgante autopropulsada New Holland Braud 9090X (New Holland, s. f.).	21
Figura 1.5. Prototipos de sacudidores de copa para olivar tradicional realizados en el CPP MECAOLIVAR	22
Figura 1.6. Prototipos de sacudidores de copa realizados en el CPP MECAOLIVAR empleados con distinta regulación y modificaciones menores para la recolección de cítricos en seto ancho	22
Figura 1.7. Disposición de las varas en el interior de la copa en un sacudidor de copa lateral arrastrado (OXBO 3210).	23
Figura 1.8. Prototipo de estructura de recogida de fruto acoplado al sacudidor de copa lateral arrastrado OXBO 3210	24
Figura 1.9. Cosechadora cabalgante en seto estrecho New Holland Braud VX7090	26
Figura 1.10. Detalle de los diversos sistemas de recogida de los frutos derribados en las cosechadoras para seto estrecho	26
Figura 1.11. Detalle del sistema de elevación en cangilones y limpieza de ramas	27
Figura 1.12. Descarga de aceituna en remolque por medio de la tolva basculante de una cosechadora cabalgante para seto estrecho (Agroinformación, 2020)	28
Figura 1.13. Descarga continua en remolque de café recolectado con cosechadora cabalgante para seto estrecho (Aerial coffee harvesting, s. f.)	28
Figura 1.14. Detalle del sistema de maniobrabilidad (izq.) y nivelación longitudinal (dcha.) (CANAL OFICIAL DE TODOLIVO «Pioneros y expertos en Olivar en Seto», 2016) de la cosechadora de seto estrecho	29
Figura 1.15. Poda mecanizada en altura (izq.) y en anchura (dcha.) en cítricos de seto estrecho	29
Figura 1.16. Poda mecanizada de las ramas bajas en un olivar en seto estrecho (Gil-Sierra, 2015)	30
Figura 3.1. Disposición del ensayo de la respuesta dinámica de la rama fructífera de naranja que se ramifica con una sola entrada del vibrador electromagnético y múltiples salidas a lo largo de tres rutas de vibración según la presencia de frutos maduros.	38

Figura 3.2. Respuesta de la rama fructífera de naranjo a la vibración forzada, ensayada en tres etapas: (a) rama completa, (b) rama sin frutos, (c) rama sin frutos y sin hojas.	39
Figura 3.3. Valores de la mediana y rango intercuartílico de la transmisibilidad de la aceleración para los caminos de vibración (n = 53) desde la base de la rama hasta el fruto para cada etapa	41
Figura 4.1. Ejemplo de una fila de árboles en seto ancho para la recolección mecanizada.	50
Figura 4.2. Sistema sacudidor de copa lateral continuo arrastrado por tractor (Oxbo, 3210) utilizado en los ensayos de recolección de cítricos. Izquierda: Vista frontal antes del proceso de recolección; Derecha: Vista posterior después del proceso de recolección.	50
Figura 4.3. Sección transversal del seto de árboles y áreas de estudio con y sin contacto directo con las varas del sistema sacudidor de copa	51
Figura 4.4. Ubicación del sensor de aceleración en una rama fructífera en la parte más externa de la copa.	52
Figura 4.5. Ejemplo de aceleración resultante ( $A_r$ ) en el dominio del tiempo medido en las ramas fructíferas. $T_{vib\_300}$ : tiempo transcurrido entre el primer y el último evento con un valor de $A_r$ de $300 \text{ ms}^{-2}$ . $A_{pk\_n}$ : número de valores pico máximos de $A_r$ .	52
Figura 4.6. Derribo del fruto producido con el sistema sacudidor de copa medido en ramas fructíferas en la sección transversal de la copa del árbol (izquierda); Distribución de los valores $A_{RMS}$ (derecha).	55
Figura 4.7. Distribución de valores del porcentaje de derribo de los frutos según $A_{RMS}$ ( $\text{ms}^{-2}$ ) y $T_{vib\_300}$ (s).	57
Figura 5.1. Recolección mecanizada de cítricos con un sistema sacudidor de copa lateral continuo (Oxbo, 3210) arrastrado por un tractor.	62
Figura 5.2. Medición de la fuerza de desprendimiento de las naranjas con mediante la prueba a tracción.	63
Figura 5.3. Esquema de las zonas de abscisión de los cítricos (AZ) con diferentes métodos de separación.	64
Figura 5.4. Esquema de las zonas de abscisión de los cítricos (AZ) con diferentes métodos de recolección.	65
Figura 5.5. Fuerza necesaria para desprender el fruto en la copa del árbol antes y después de la recolección mecanizada con sacudidor de copa según la zona de abscisión del fruto (AZ).	66
Figura 6.1. Ubicación de los acelerómetros en el árbol y la cosechadora cabalgante (Z: dirección vertical del árbol, X: dirección de avance de la máquina, Y: dirección de movimiento de las varas).	73
Figura 6.2. Señal de aceleración en el dominio del tiempo (izquierda) y parámetros de vibración analizados en cada árbol para un ejemplo con un rango de aceleración de $500 \text{ ms}^{-2}$ (derecha).	74
Figura 6.3. Aceleración medida en los olivos realizada con la cosechadora cabalgante. Izquierda: Análisis en el dominio del tiempo de los valores de aceleración resultantes para un promedio de 44 valores con $0,0025 \text{ s}$ de resolución. A la derecha: Espectro medio de la vibración de la copa con la una resolución de $0,39 \text{ Hz}$ .	76

- Figura 6.4. Histograma de la aceleración resultante de la vibración medida en los árboles en el dominio del tiempo (N = 44). 77
- Figura 6.5. Relaciones lineales entre los valores de aceleración y la altura en la copa del árbol: Aceleración RMS ( $A_{RMS}$ ) y Aceleración pico o máxima ( $A_p$ ). 78
- Figura 6.6. Relaciones lineales entre los valores de aceleración y el diámetro de la rama del árbol: Aceleración RMS ( $A_{RMS}$ ) y Aceleración pico o máxima ( $A_p$ ). 78
- Figura 6.7. Distribución del tiempo de vibración dentro de los diferentes rangos de aceleración medidos a lo largo del tiempo total de vibrado (N = 44). 80

## Índice de tablas

Tabla 2.1. Descripción de la asociación entre artículos publicados, capítulos de la tesis y objetivos desarrollados	34
Tabla 3.1. Características de las ramas ensayadas según la campaña de cosecha.	40
Tabla 3.2. Valores de frecuencia natural (Hz) y de transmisibilidad de la aceleración identificados en la respuesta de los caminos de vibración para cada estado de la rama ensayada durante las campañas de recolección de 2015 (n=17) y 2019 (n=36).	42
Tabla 4.1. Características de las plantaciones de cítricos cosechados mecánicamente con sistema sacudidor de copa.	50
Tabla 4.2. Parámetros de vibración medidos en las ramas con y sin contacto directo con las varas durante la recolección mecanizada con sacudidor de copa.	53
Tabla 5.1. Características de las plantaciones de cítricos ensayadas	63
Tabla 6.1. Parámetros de vibración en las parcelas ensayadas, separados en dos grupos de acuerdo con el modelo de agrupación	79

## Índice de abreviaturas

$A_p/A_{pk}$ : aceleración máxima o pico

ARMS: valor eficaz o raíz de la media cuadrática de la aceleración.

$A_r$ : aceleración resultante.

AZ: zona de abscisión.

AZ-A: zona de abscisión situada entre el pedúnculo y la rama.

AZ-C: zona de abscisión situada entre el cáliz y el fruto.

CPP: Compra Pública Precomercial.

CPI: Compra Pública Innovadora.

FDF: fuerza de desprendimiento del fruto.

HD: High Density.

IAS: Intensificación Agrícola Sostenible

JCR: *Journal Citation Reports*

MEMS: sistemas microelectromecánicos.

RMS: raíz de la media cuadrática o valor cuadrático medio

ROC: característica operativa del receptor.

SHD: Super High Density.

SIA: *Sustainable Intensification of Agriculture*

$T_{Ar}$ : tiempo de vibración en un rango de aceleración resultante.

$T_{vib}$ : tiempo de vibración o vibrado.

# Capítulo 1

## Introducción



## 1.1 Introducción

La agricultura ha ido evolucionando desde su nacimiento hace más de 10.000 años. En su continua evolución se han alcanzado hitos que han dado lugar a cambios de periodos denominados revoluciones agrícolas. Las diversas revoluciones acontecidas han sido: la Revolución Neolítica (VIII milenio a.C.), la Revolución Agrícola Árabe o Revolución Verde Medieval (siglo VIII), la Revolución Agrícola Británica (siglo XVIII – XIX), la Revolución Verde y la Revolución Genética (ambas en el siglo XX) (Mazoyer & Roudart, 2006). Estas revoluciones se han producido en intervalos de tiempo cada vez menores. Gracias a la investigación científica y al desarrollo tecnológico se ha originado un gran avance en los últimos 160 años, generando un elevado crecimiento de la productividad marcado por la intensificación agrícola (Thirtle et al., 2002; Evans, 2003).

La intensificación de la agricultura ha posibilitado la alimentación de gran parte de la población mundial y ha reducido drásticamente la necesidad de deforestación, por lo que no debe considerarse enfrentada con la sostenibilidad ambiental (Evans, 2003). En la actualidad la agricultura afronta una serie de nuevos retos que deben ser abordados: la mejora de la productividad agrícola para satisfacer la futura demanda de alimentos, garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y la mejora de la eficiencia de los sistemas alimentarios (FAO, 2017). Como consecuencia han surgido nuevos paradigmas, como la llamada intensificación agrícola sostenible (IAS o SIA, por sus siglas en inglés). Este paradigma comprende las técnicas, tecnologías o procesos que incrementan las producciones respetando o minimizando el coste ambiental, buscando un equilibrio entre el rendimiento del sistema agrícola y la conservación de los ecosistemas (Pretty, 2018). Para lograrla es necesario el desarrollo y transferencia de tecnología que incremente la eficiencia en el uso de los insumos, minimizando los impactos medioambientales (Tilman et al., 2011). El éxito de este desarrollo y transferencia tecnológica está condicionado a la generación e integración de conocimientos de diversas ramas de la ciencia y la ingeniería a través de la investigación académica con un enfoque práctico que redunde en un resultado tangible (Rockström et al., 2017).

En este sentido la Unión Europea ha impulsado el llamado Pacto Verde Europeo, formando parte de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ONU, s. f.). Dentro de los elementos que constituyen el Pacto Verde se puede destacar, en el ámbito agrícola, el denominado “De la granja a la mesa” (*Farm to Fork*) y la “Agricultura Sostenible”. Esta sostenibilidad posee tres vertientes: económica, ambiental y social. Si integramos esta sostenibilidad en una idea podemos decir que el objetivo es que las explotaciones agrícolas sean rentables, empleando los recursos naturales de manera eficiente y responsable. Asimismo, que la agricultura pueda suministrar productos o bienes y servicios a la sociedad actuando como eje económico y social de las zonas rurales (UE, s. f.).

La investigación y la innovación se tornan en instrumentos y herramientas muy importantes para tal fin, ya que proporcionan nuevos conocimientos, prácticas, técnicas y tecnologías para aumentar la rentabilidad económica sin ejercer una mayor presión sobre el medio ambiente. Esto puede permitir la transición hacia sistemas agrícolas y comunidades rurales más sostenibles. Sin embargo, se requieren soluciones adaptadas a cada zona geográfica concreta para mejorar la viabilidad económica y las condiciones sociales de la agricultura, permitir la

renovación generacional y contribuir al desarrollo de las zonas rurales (European Commission, s. f.).

Estos nuevos paradigmas y la visión de la sostenibilidad formada por sus tres vertientes, económica, social y medioambiental, están estimulando un cambio en los sistemas de plantación de las especies arbóreas. Estos sistemas avanzan hacia una integración de los diversos procesos o etapas que forman las distintas labores del cultivo (Rallo et al., 2013).

En este aspecto, la mecanización agrícola tiene un papel relevante como integradora de dichas labores, haciendo hincapié en la operación de recolección, la cual es la más compleja y la que tiene un mayor coste, pudiendo comprometer la rentabilidad de las explotaciones. Por lo tanto, se torna fundamental estudiar las interacciones y relaciones entre la maquinaria y la plantación.

## 1.2 Plantaciones en seto

La unidad fundamental de una plantación frutícola es el árbol, siendo este una “planta perenne, de tronco leñoso y elevado, que se ramifica a cierta altura del suelo” (Real Academia Española, s.f., definición 1). A su vez, se puede definir la copa como el conjunto de brotes, hojas y frutos que se sustentan sobre la estructura leñosa del árbol, en relación con el tronco y las ramas principales. Las características de la copa están referidas a su densidad de área foliar, la posición, tamaño y forma de las hojas y su porosidad respecto a los rayos del sol (Connor et al., 2014). Si atendemos a la copa del árbol, podemos distinguir dos tipologías de plantaciones leñosas. En primer lugar, las plantaciones con copa discontinua (esférica o cónica), en las que se sitúa el sistema tradicional y el intensivo. El sistema tradicional se caracteriza por una baja densidad de árboles (aprox. hasta 200 árboles ha<sup>-1</sup>), orografía variable y generalmente de secano. Mientras que el sistema intensivo suele disponer de una mayor densidad de árboles (aprox. hasta 400 árboles ha<sup>-1</sup>), generalmente en regadío, mayor producción, con algunas tareas mecanizadas y de menor longevidad. En segundo lugar, las plantaciones con copa continua, en las cuales la copa de los árboles contiguos se unifica formando un seto, pudiendo distinguir de seto ancho (450-800 árboles ha<sup>-1</sup>) (Fig. 1.1) o de seto estrecho (800-2000 árboles ha<sup>-1</sup>) (Fig. 1.2) (Rallo et al., 2013; Fernandez-Escobar et al., 2013). Las plantaciones con setos estrechos se suelen denominar de alta densidad o superintensivas (SHD) mientras que los setos anchos se asocian con plantaciones intensivas (HD).



Figura 1.1. Plantación de seto estrecho (izq.) y seto ancho (dcha.) de olivar.



Figura 1.2. Plantación de seto estrecho (izq.) y seto ancho (dcha.) de cítricos.

Las plantaciones en seto disponen los árboles siguiendo una estructura geométrica formada por la consecución de árboles con un espaciamiento equidistante y una altura y anchura preestablecida, representando al conjunto como un ente y no como árboles individuales, perdiendo su identidad propia (Rieger, 2006). Los parámetros que definen el seto son la altura, anchura, separación, orientación, profundidad y forma de la fila de árboles (Connor et al., 2014). Las plantaciones basadas en una copa continua o seto tienen una serie de ventajas en comparación con las discontinuas. Entre estas ventajas se encuentran una mayor precocidad en la producción (De la Rosa et al., 2007), una menor necesidad y dependencia de la mano de obra debido a la mecanización de las tareas y, por tanto, una reducción de los costes (Ferguson et al., 2010). Sin embargo, la inversión inicial de la plantación, la necesidad de poda y los tratamientos fitosanitarios son más elevados y, a su vez, están limitadas a una serie de cultivares, con una vida útil de la plantación menor que las plantaciones tradicionales (Fernandez-Escobar et al., 2013).

El aumento de la densidad de árboles y la formación de copas continuas en seto ha originado cambios en el microclima y patrón de crecimiento de los árboles en comparación a los sistemas tradicionales con copa discontinua. Esto afecta a la interceptación de la luz y su composición espectral, la temperatura, la humedad y el movimiento de aire (Connor et al., 2014). En plantaciones de alta densidad los árboles son más pequeños, con una menor sección transversal del tronco, menor volumen de copa por árbol, con un crecimiento más vertical y mayores limitaciones en el volumen de las raíces (Tous et al., 2005; Msallem et al., 2008; Pastor et al., 2007; Policarpo et al., 2006). El microclima en las plantaciones en seto es diferente al de las plantaciones tradicionales, modificando el crecimiento y desarrollo del cultivo, la producción de frutos y su demanda de agua (Connor et al., 2014). El principal factor que define el microclima es la radiación solar, la cual posee una variación diaria y también estacional. Esta puede ser determinada según las características del seto, la latitud, la orientación, la orografía y el día del año (Connor, 2006; Oyarzun et al., 2007; Tovar-Pescador et al., 2006).

Si atendemos a las características del seto, la distancia entre filas junto con la dimensión del seto, con relación a su altura y anchura, condicionan la interceptación de la radiación solar. Disponer de amplias separaciones entre filas de árboles con setos más bajos y estrechos favorecen la insolación mientras que filas menos separadas y setos más altos y anchos la disminuyen (Olesen et al., 2007; Gómez-del-Campo & García, 2011). Dentro de la copa, la

radiación está determinada por su porosidad, que define la fotosíntesis y el flujo de aire, afectando a la temperatura y humedad. Una alta porosidad facilitará el acceso de la radiación solar en la copa (Connor et al., 2014).

Por otro lado, la interceptación anual de la radiación sigue una tendencia inversa a la latitud, disminuyendo cuando ésta aumenta. Sin embargo, no ocurre en la misma cuantía para todas las orientaciones de las filas de árboles. En los setos orientados en dirección Norte-Sur la radiación disminuye en mayor medida al aumentar la latitud que los orientados Noreste-Suroeste/Noroeste-Sureste o Este-Oeste. Dentro de la misma latitud, la interceptación de la radiación es mayor en los setos orientados Norte-Sur y Noreste-Suroeste/Noroeste-Sureste que los orientados Este-Oeste (Trentacoste et al., 2015). Estas orientaciones también alteran la interceptación recibida en invierno y verano y el comportamiento del seto frente al viento. Aquellos setos orientados en la misma dirección que los vientos dominantes presentan un mayor flujo de aire tanto en el seto como entre las filas de árboles (Bergqvist et al., 2001). Por consiguiente, la orientación del seto es un factor estructural de la plantación que no puede modificarse y que define gran parte de las condiciones de irradiación, siendo muy importante establecerla correctamente antes del inicio del cultivo (Trentacoste et al., 2015). Otro factor estructural de la plantación que afecta a la radiación solar es el relieve. La inclinación y la variación de la topografía genera diferencias en la exposición a la radiación solar por parte del cultivo (Tovar-Pescador et al., 2006; Oliphant et al., 2006). Algunos otros elementos como las nubes, que influyen en la turbidez de la atmósfera, pueden modificar la transmisividad atmosférica y la calidad de la radiación fotosintéticamente activa (Oliphant et al., 2006; Bosch et al., 2009).

Las variaciones en los elementos anteriormente mencionadas son de gran importancia debido a que establecen la radiación solar y esta posee un papel fundamental en el tamaño, calidad, densidad, disposición, composición y maduración de los frutos en la copa relativa a las condiciones del microclima del seto (Connor et al., 2012; Cherbiy-Hoffmann et al., 2013; Rondanini et al., 2011), por lo que es un aspecto clave para el éxito y la rentabilidad de la explotación. En cultivo de la viña se observó que mayores niveles de radiación provocan una maduración más rápida de las bayas y un cambio en sus propiedades mecánicas y grados Brix (Giacosa et al., 2015; Naylor et al., 2000). Verreynne et al. (2004) describieron que las mandarinas que se encontraban en el interior del árbol, más sombreadas, poseían peor calidad. En aceituna se ha visto que el rendimiento graso, la composición química del aceite y su estabilidad frente a la oxidación puede cambiar según la cantidad de iluminación recibida (Gómez-del-Campo & García, 2011; Castillo-Ruiz et al., 2015). Sin embargo, no siempre una exposición máxima a la radiación es beneficiosa. En manzana se ha demostrado que la exposición a altos niveles de radiación producía efectos indeseables como quemaduras por el sol, entre otros (Fouché et al., 2010)

Otro factor que condiciona el microclima del seto es la humedad del aire. La humedad se ve afectada por el movimiento del aire dentro de la plantación, la temperatura, debida principalmente a la radiación solar, la cubierta del suelo, las hojas y la lluvia o el riego. Al incrementarse la densidad de árboles y su copa formando el seto, se acentúa el microclima de la plantación y se aísla más del ambiente exterior, aumentando la humedad (Connor et al., 2014). Asimismo, se pueden establecer diseños de seto según su orientación, dimensión y

morfología que faciliten la ventilación para evitar las condiciones favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades y que puedan incrementar la eficacia en la aplicación de fitosanitarios (Lazzaro et al., 2008). Los setos más estrechos y con menor densidad de copa facilitan la aireación disminuyendo la humedad que, junto con la temperatura, son factores clave en el desarrollo de plagas y enfermedades en el árbol (Tous et al., 2010).

Se han realizado trabajos para evaluar las necesidades hídricas del seto, buscando una solución óptima entre la producción y el aporte de agua (Fernández et al., 2013; Padilla-Díaz et al., 2016; Egea et al., 2016; Millán et al., 2020). Entre las estrategias más empleadas destacan el riego deficitario, en el cual se mantiene en el tiempo la reducción en el aporte de las necesidades hídricas, y el riego deficitario regulado, en este caso se aporta agua sólo durante las épocas de más estrés del cultivo y el resto del tiempo se reduce o se elimina por completo el riego (Goldhamer et al., 2005). Se ha podido comprobar que estas estrategias pueden ser convenientes para los setos, si el cultivo no sufre un grave estrés hídrico (Ferreira & Evans 2005). Al limitar el aporte de agua podemos controlar el vigor y el tamaño del árbol, facilitando el mantenimiento y mecanización de la plantación (Fernández et al., 2013; León et al., 2007), ahorrando agua y sin perjudicar al rendimiento (Tognetti et al., 2006). No obstante, es importante elegir la fracción de agua a emplear y el estado fenológico más adecuado (Tognetti et al., 2009; Fregapane et al., 2010). Además, el margen de error en la planificación y aplicación del riego en el seto es menor, debido a que su sistema radicular es más pequeño, pudiendo ser crítico para la producción final del cultivo (Díaz-Espejo et al., 2012).

La formación de los árboles en seto facilita la mecanización de la recolección de cultivo, pero es importante que para obtener un resultado adecuado exista una mutua interacción entre el seto y la maquinaria a emplear (Ravetti & Robb, 2010). Las dimensiones del seto y su morfología deben ajustarse a la maquinaria de recolección, así como las características del árbol relacionadas con la densidad y rigidez de las ramas, la distribución de la fruta y su vigor o actividad vegetativa (Connor et al., 2014). Sin embargo, la maquinaria también debe regularse y modificarse para adaptarse al cultivo (Gupta et al., 2016). El tipo de plantación de copa continua o seto dependerá de este ajuste gradual hacia una adaptación mayor de la máquina o del árbol. En plantaciones intensivas con seto ancho se pueden emplear sacudidores de copa que trabajen en un lado del árbol, ambos lados (en tándem) o cosechadoras cabalgantes de seto ancho, las cuales trabajan encima de la fila de árboles (Fig. 1.3). Estas máquinas se diseñan para adaptarse, en mayor medida, a la plantación. Por otro lado, en las plantaciones en seto estrecho se diseñan las plantaciones específicamente para ser recolectadas empleando cosechadoras cabalgantes donde la adaptación se realiza, del árbol a la máquina (Fig. 1.4). No obstante, los avances en el conocimiento y la tecnología deben ir desarrollándose entre ambas partes, tanto de parte de la maquinaria como del seto y que la elección del ajuste máquina-seto dependa de la situación particular o caso a estudiar. En consecuencia, ambos tipos de plantaciones coexistirán en el tiempo (Connor et al., 2014).



Figura 1.3. Sistemas de recolección mecanizada comerciales basadas en sacudidores de copa para plantaciones en seto ancho. Izquierda: sacudidor lateral de un lado (OXBO 3210), central: sacudidor lateral en tándem (OXBO 3220), derecha: cosechadora cabalgante de seto ancho (MAQTEC Colossus).



Figura 1.4. Sistemas de recolección mecanizada comerciales basadas en sacudidores de copa para plantaciones en seto estrecho. Izquierda: cosechadora cabalgante arrastrada Pellenc CV5045 (Pellenc, s. f.), central: cosechadora cabalgante autopropulsada Gregoire G10.330 (Gregoire, s. f.), derecha: cosechadora cabalgante autopropulsada New Holland Braud 9090X (New Holland, s. f.).

### 1.3 Sistemas de recolección basados en sacudidores de copa

El sistema de sacudida de la copa se plantea como una alternativa al sistema de sacudida o vibración del tronco, el cual puede ser muy efectivo en plantaciones de copa discontinua. Sin embargo, en plantaciones de copa continua plantea problemas de rendimiento al incrementar la densidad de árboles (en torno a los 400 árboles  $ha^{-1}$ ) (Rallo et al., 2013). El principio de funcionamiento de los sistemas sacudidores de copa se basa en la aplicación de una vibración forzada de la copa del árbol a través de unas varas que provoca el desprendimiento del fruto. Bajo este principio se emplean dos tipos de maquinaria: los sacudidores de copa para seto ancho y los de seto estrecho. Ambos tipos de máquinas pueden ser autopropulsadas o arrastradas y accionadas por un tractor.

#### 1.3.1 Sacudidor de copa para seto ancho

Los sacudidores de copa se originaron en el cultivo de los cítricos hace unos 50 años como respuesta a los crecientes costes de la mano de obra y la disminución de su disponibilidad en EE.UU. (Whitney et al., 1974). La tecnología actual es plenamente comercial y se emplea fundamentalmente en Florida (Roka et al., 2014). En olivar se han realizado algunos prototipos

y estudios resultantes del Convenio de Compra Pública Precomercial (CPP) MECAOLIVAR (Fig. 1.5), en la Universidad de Córdoba, enfocados a utilizar este tipo de maquinaria en plantaciones de olivar tradicional para mejorar su rentabilidad y sostenibilidad (Sola-Guirado et al., 2014, 2016, 2018). Los resultados muestran la complejidad de alcanzar una gran eficiencia técnica y económica sin ejecutar apenas adaptaciones en el árbol. Durante el proyecto CITRUSREC estas máquinas fueron empleadas en cítricos de seto ancho, realizando una adaptación al cultivo mediante un ajuste de sus parámetros de funcionamiento según las características morfológicas del fruto (Fig. 1.6). Actualmente, mediante el Convenio de Compra Pública Innovadora (CPI) INNOLIVAR, se están desarrollando sacudidores de copa lateral que puedan emplearse en plantaciones intensivas de olivar con una formación y una poda adecuadas.



Figura 1.5. Prototipos de sacudidores de copa para olivar tradicional realizados en el CPP MECAOLIVAR.



Figura 1.6. Prototipos de sacudidores de copa realizados en el CPP MECAOLIVAR empleados con distinta regulación y modificaciones menores para la recolección de cítricos en seto ancho.

Las varas de los sacudidores de copa laterales (Fig. 1.7) están montadas radial o tangencialmente en un tambor que genera un movimiento oscilatorio a través de una rotación libre o controlada. La inclinación de las varas facilita el contacto de estas con la copa, incrementando la transmisión de la vibración (Gupta et al., 2016). Las varas suelen ser de metal, pero pueden ser de otros materiales como plásticos especiales o nylon, afectando este aspecto al comportamiento de la vara (Liu et al., 2018). Su geometría y material está condicionado por los parámetros de trabajo relativos a la frecuencia y amplitud de la vibración que transmiten a

la copa, ya que deben trabajar bajo condiciones exigentes soportando fatiga mecánica sin romperse, alejarse de las frecuencias de resonancia y provocar el menor daño a los árboles y frutos (Pu et al., 2018; Gupta et al., 2016). En los sacudidores de copa los valores de frecuencias habituales varían entre 4 y 8 Hz y entre los 50 y 200 mm de amplitud (Sola-Guirado et al., 2016; Castro-García et al., 2009, 2017; Liu et al., 2017; Savary et al., 2010). La longitud de la vara es un factor importante en el resultado del sistema sacudidor, ya que se necesita que las varas exploren la copa para alcanzar altos niveles de derribo de frutos debido a la baja transmisibilidad de la aceleración en el interior de la copa. Actualmente, la longitud de las varas suele oscilar entre 0,8 y 1,4 m y con diámetros comprendidos entre 5 y 30 mm.



Figura 1.7. Disposición de las varas en el interior de la copa en un sacudidor de copa lateral arrastrado (OXBO 3210).

El empleo de estructuras de recogida de los frutos, junto con los sistemas sacudidores de copa, permiten completar el proceso de recolección mecanizada. El proceso de interceptar el fruto desprendido se ve favorecido por la baja transmisibilidad de la vibración en el interior de la copa, que produce que los frutos, generalmente, se desprendan en las zonas de la copa que exploran las varas. En el proceso de sacudida, las varas mueven la copa del árbol y provoca la caída de los frutos, principalmente de forma vertical, al ser desprendidos (Sola-Guirado et al., 2016). Sin embargo, el contacto de los frutos con las varas puede ocurrir, y ser la causa de una proyección de los frutos en dirección no vertical (Castro-García et al., 2009). Los sistemas sacudidores de copa que poseen superficies o estructuras de recogida y la gestión del fruto, transporte, limpieza y almacenamiento, pueden considerarse cosechadoras (Fig. 1.8). Este almacenamiento puede ser en tolvas que realicen una posterior descarga, sistemas paletizables rígidos (big-box) o flexibles (big-bags), que se dejen en el campo para su posterior gestión, y remolques en paralelo.





Figura 1.8. Prototipo de estructura de recogida, limpieza y almacenamiento de fruto acoplado al sacudidor de copa lateral arrastrado OXBO 3210.

El proceso de recolección mecanizada con sistemas sacudidores de copa suele requerir que la máquina se desplace a la vez que sacude la copa. De esa forma, la velocidad a la que se desplaza la máquina está limitada por el tiempo necesario de vibración que necesita el fruto para su desprendimiento. Los valores de velocidad de avance de los sacudidores de copa se sitúan entre los  $0,5-2 \text{ km h}^{-1}$ , requiriendo calles para su transitabilidad de al menos  $5,5 \text{ m}$  (Ferguson et al., 2010), siendo recomendable entre  $6 \text{ y } 7 \text{ m}$  para facilitar la maniobrabilidad de la maquinaria en los giros y cabeceras. Estos sistemas de recolección tienen una capacidad de trabajo que oscila entre las  $0,25-0,5 \text{ ha h}^{-1}$  (Agüera-Vega et al., 2013; Vieri & Sarri, 2010; Dias et al., 2020).

La formación y la poda del seto son muy importantes para adaptar la morfología del árbol al sistema de recolección. Con ello se pueden lograr altos valores de desprendimiento del fruto y mejorar la eficiencia del proceso (Du et al., 2012). La formación del seto para ser cosechado con sistemas sacudidores de copa de seto ancho es menos severa que en el caso de emplear cosechadoras cabalgantes para seto estrecho. Generalmente, se basa en: conseguir un cerramiento de la copa para facilitar la formación de un seto continuo, limitar la anchura y altura del seto, con valores orientativos de  $1,5-3,6 \text{ m}$  y  $3,6-4 \text{ m}$ , respectivamente (Ferguson et al., 2010; Dias et al., 2020), eliminar las ramas bajas para que pueda trabajar el sistema de recogida del fruto, suprimir las ramas interiores donde no se produce la acción de las varas (Castillo-Ruiz et al., 2017) y dotar mediante la formación de un ángulo adecuado entre las varas y las ramas que favorezca su contacto (Gupta et al., 2016). Se puede emplear una poda manual para establecer la arquitectura del árbol, eliminando aquellas ramas principales que dificulten la entrada y salida de las varas durante la sacudida, y una poda mecanizada para el mantenimiento de la plantación, con el objetivo de reducir la mano de obra necesaria (Dias et al., 2020).

Los sistemas sacudidores de copa en plantaciones en seto ancho pueden alcanzar altos niveles de desprendimiento del fruto si la máquina está regulada adecuadamente y los árboles están formados correctamente para facilitar la acción de las varas (Bernardi et al., 2016; Ferguson & Castro-Garcia, 2014). Varios autores han obtenido valores elevados de derribo de

frutos del orden del 77,3% (Sola-Guirado et al., 2016), 70-80% (Dias et al., 2020), 92% (Ferguson & Castro-Garcia, 2014), 86-96% (Ravetti & Robb, 2010) y 90-95% (Roka et al., 2014). Los daños originados al fruto durante el desprendimiento están condicionados a varios factores, siendo el principal el causado por el impacto con las varas (Castro-Garcia et al., 2009), que está directamente influenciado por la densidad de éstas (Sola-Guirado et al., 2016). Castro-Garcia et al. (2009) obtuvo valores más elevados de daño en fruto recolectado mecánicamente frente a la recolección manual. Otros autores exponen que los daños a los frutos no afectaron a su posterior transformación o procesamiento (Famiani et al., 2014). Sin embargo, estos daños pueden ser reducidos empleando recubrimientos o sistemas de acolchado en las varas (Castro-Garcia et al., 2009). Si atendemos a los daños producidos a la copa del árbol, estos sistemas de recolección producen daños ligeramente superiores a los vibradores de troncos (Ravetti & Robb, 2010) o incluso menores a otros sistemas de recolección mecanizada con equipos auxiliares de vareo, siendo del orden del 3% del peso del fruto cosechado (Sola-Guirado et al., 2014).

En el cultivo de cítricos se ha desarrollado un importante esfuerzo investigador y tecnológico en este tipo de sistema de recolección mecanizada. No obstante, esta tecnología se traslada al olivar y en otros cultivos como nueces (Zhenzhen et al., 2016), jatrofa (Hong et al., 2012) o incluso en aclareo mecánico de melocotones, nectarinas o manzanas (Schupp et al., 2008).

### 1.3.2 Sacudidor de copa para seto estrecho

El origen de las cosechadoras cabalgantes para seto estrecho proviene de la viña, que se han adaptado y regulado para trabajar en otros cultivos. En el caso de olivar están disponibles desde el año 1994 (Rius & Lacarte, 2010). Uno de los principales obstáculos que se ha solventado para su expansión, y que aún sigue en estudio, es el desarrollo de cultivares específicos para este tipo de plantaciones, con bajo vigor y de producción temprana. Actualmente la mayoría de las variedades empleadas son 'Arbequina', 'Arbosana' y 'Koroneiki', encontrándose bien establecidas en plantaciones de todo el mundo (De la Rosa et al. 2007; Camposeo et al. 2008; Maia et al., 2008; Allalout et al., 2011; Godini et al., 2011; Proietti et al., 2011). El desarrollo de este tipo de maquinaria para cítricos se encuentra en una fase experimental, aunque hay algunas experiencias mediante portainjertos enanizantes sobre diferentes variedades comerciales con resultados muy prometedores (Arenas-Arenas et al., 2016; Bordas et al., 2012).

Las cosechadoras cabalgantes para seto estrecho son sacudidores de copa que trabajan sobre una fila continua de árboles o seto (Fig. 1.9). La máquina avanza a través de la fila y las copas se van introduciendo al túnel de vibrado ayudadas por unos deflectores. Usualmente el túnel posee una altura de 2,4-2,8 m, pudiendo introducirse árboles con mayor porte (hasta 3,5 m) debido a la compresión que se origina en la copa. Una vez que la copa se sitúa dentro del túnel se comprime y se produce un movimiento oscilatorio ocasionado por unas varas horizontales en forma de arco o costilla (Fig. 1.10 izq.) o bien insertadas radialmente en rodillos verticales (Fig. 1.10 dcha.). Las varas en forma de arco o costilla permiten la compresión de la copa, disminuyendo hasta en un tercio su anchura, para mejorar el desprendimiento. El número de varas depende del cultivo que se vaya a recolectar, siendo de 20-22 varas para almendro u olivar (Godini et al., 2011) y 4-6 varas para viña (Vallone et al., 2017), estando enfrentadas y alternas para evitar impactos las unas con las otras, con una separación de unos 100-150 mm.

Las varas insertadas en rodillos verticales se sitúan a ambos lados del túnel, siendo el número de varas y su separación variable, dependiendo del cultivo. Tienen una longitud máxima de 500 mm y se utilizan, generalmente, en especies arbustivas con frutos pequeños, como café (Ferreira et al., 2015) o arándanos (Takeda et al., 2017). El material empleado en las varas suele ser un polímero técnico aditivado con coadyuvantes que mejoran la durabilidad, debido a los altos niveles de vibración a las que están sometidas. La regulación de la máquina se define principalmente por las dimensiones del túnel, la velocidad de avance y la frecuencia de sacudida. La frecuencia de trabajo suele oscilar entre 6,5 y 8 Hz (Pezzi & Caprara, 2009; Vallone et al., 2017) estando los dos laterales de varas alternas sincronizados en la vibración. El túnel se encuentra suspendido para evitar transmitir la vibración generada por las varas a toda la máquina.



Figura 1.9. Cosechadora cabalgante en seto estrecho New Holland Braud VX7090.

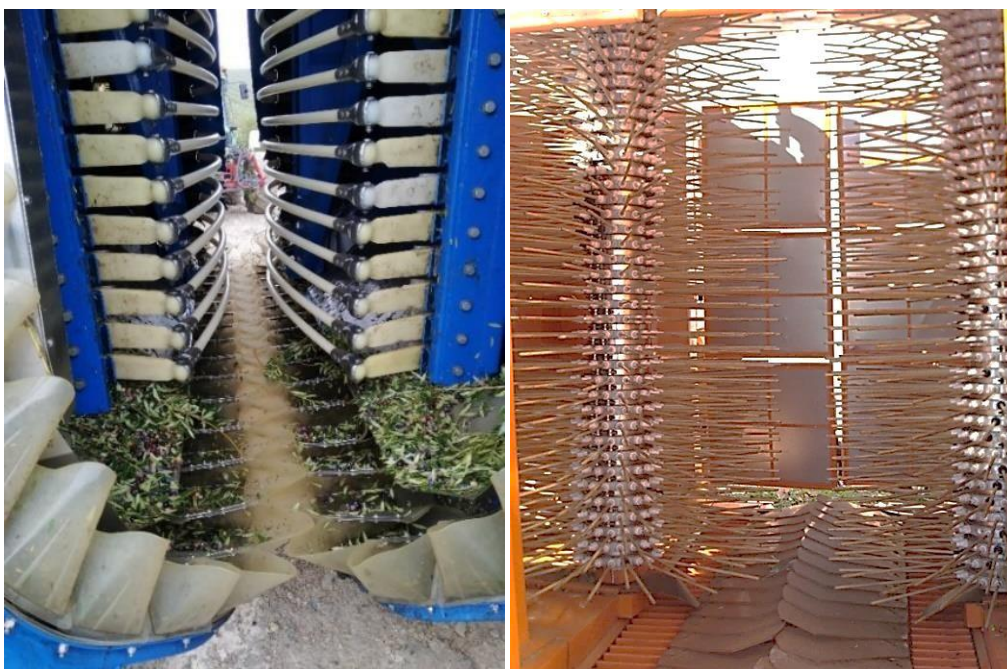


Figura 1.10. Detalle de los diversos sistemas de recogida de los frutos derribados en las cosechadoras para seto estrecho.

La gestión del fruto, al igual que ocurría con los sacudidores de copa de seto ancho, consiste en su interceptación, limpieza y almacenamiento. Los frutos que se desprenden al vibrar la copa dentro del túnel caen a la parte inferior de este y son recogidos por cintas transportadoras, cintas de cangilones o sistemas neumáticos según la tipología del fruto (Fig. 1.10 izq.). En algunos cultivos, como el café o los arándanos, para que el fruto no caiga al suelo, se dispone de escamas inclinadas que sellan el contacto con el tronco evitando pérdidas de fruto (Ferreira et al., 2015; Takeda et al., 2017) (Fig. 1.10 dcha.). Generalmente el movimiento de las cintas está coordinado con el movimiento de avance de la máquina, siendo la velocidad relativa cero con respecto al árbol.

Una vez que el fruto ha sido interceptado se transporta a la parte superior donde es limpiado de ramas, hojas y brotes. Las ramas de mayor tamaño son descartadas mediante tubos horizontales que impiden el avance de estas, desechándolas por la parte de atrás de la cosechadora (Fig. 1.11). Las hojas y los brotes son eliminados a través de sistemas neumáticos que las separan del fruto. Por último, se procede al almacenamiento del fruto, produciéndose en la propia máquina cosechadora o en otro contenedor, como un remolque en una fila de árbol contigua. Si se produce el almacenamiento en la máquina, este puede darse en uno o más depósitos de acero inoxidable, generalmente basculantes para facilitar la descarga (Fig. 1.12), pero deben estar repartidos de tal manera que faciliten la nivelación de la máquina. En este caso, la cantidad de fruta cosechada por la máquina está limitada al volumen que puede almacenar y deberá ser tenido en cuenta para definir la longitud del seto en base a su producción. Se han realizado estudios exponiendo que el 75% del tiempo correspondiente a los tiempos muertos, es decir, tiempo no aprovechable realizando la recolección, se debe a las descargas de la máquina cuando esta posee depósito propio (Giametta & Bernardi, 2010), por lo que se le debe prestar especial atención al diseño de la plantación. Cuando el fruto no se almacena en la propia máquina lo usual es descargarlo en continuo mediante un tubo o brazo de descarga hasta un remolque. El remolque debe circular paralelamente y con una velocidad solidaria a la cosechadora para que el fruto pueda ser descargado (Fig. 1.13).



Figura 1.11. Detalle del sistema de elevación en cangilones y limpieza de ramas en el interior de una cosechadora cabalgante para seto estrecho



Figura 1.12. Descarga de aceituna en remolque por medio de la tolva basculante de una cosechadora cabalgante para seto estrecho (Agroinformación, 2020).



Figura 1.13. Descarga continua en remolque de café recolectado con cosechadora cabalgante para seto estrecho (*Aerial coffee harvesting*, s. f.).

La velocidad de avance de las cosechadoras cabalgantes para seto estrecho puede variar entre los 2-3,5 km h<sup>-1</sup>, situándose la capacidad de trabajo en este tipo de sistemas de recolección entre 0,56-0,91 ha h<sup>-1</sup> (Agüera-Vega et al., 2013; Morales-Sillero et al., 2014; Pérez-Ruiz et al., 2018). Este rango de velocidad asociado a la capacidad de trabajo vendrá determinado por el volumen y producción del árbol. Para setos formados por árboles con un mayor volumen y producción la velocidad será menor y viceversa. Además de la morfología del árbol, dependerá del tipo de cultivo ya que, en especies arbustivas como la viña o los arándanos el volumen de copa y la producción es menor en comparación a otras, como el olivar. Este ajuste de la velocidad de desplazamiento de la máquina es necesario para mantener una alta eficiencia en el derribo, la cual suele ser superior al 95% (Farinelli & Tombesi, 2015; Pérez-Ruiz et al., 2018). Las filas de árboles frecuentemente se distancian entre 3,5 y 4 m cuando el olivar está en riego, siendo lo usual en estos sistemas de recolección para alcanzar altas producciones (10 t ha<sup>-1</sup>) (Rallo et al., 2013). La disposición de una transmisión hidrostática en las máquinas, y los reducidos anchos de vía, permiten que las cosechadoras tengan una elevada maniobrabilidad (Fig. 1.14 izq.). Además, las máquinas pueden autonivelarse lo que permite que trabajen en pendientes del terreno elevadas, mayores al 20%, siempre que la pendiente sea longitudinal (Fig. 1.14 dcha.). Sin embargo, presentan problemas con las pendientes transversales que limitan la estabilidad de la máquina, pudiendo dar lugar a vuelcos laterales.



Figura 1.14. Detalle del sistema de maniobrabilidad (izq.) y nivelación longitudinal (dcha.) (Todolivo, 2016) de la cosechadora de seto estrecho.

La poda de las plantaciones en seto estrecho se realiza, principalmente, de forma mecanizada. En unos primeros inicios de la plantación el objetivo es formar los árboles individuales como un seto. Una vez que el seto está formado, se debe obtener un equilibrio entre el mantenimiento y restricción del crecimiento de la sección transversal de la copa, para que se adapte a la geometría de la cosechadora cabalgante, y la sostenibilidad del rendimiento de la plantación en el tiempo (Caruso et al., 2014). Las podadoras pueden ser autopropulsadas o acopladas al tractor, aunque generalmente se utilizan estas últimas, empleando diferentes métodos de corte como barra de corte, discos o cuchillas rotativas. Las operaciones que realizan en el mantenimiento de plantación son poda en altura, en anchura (Fig. 1.15) y corte de ramas bajas (Fig. 1.16). La altura y anchura de corte del seto suele oscilar entre 2,5 y 2,7 m y entre 1 y 2 m, respectivamente, y las ramas bajas entre 0,5 y 0,7 m, limitadas por la zona de trabajo de la cosechadora (Connor et al., 2014; Tous et al., 2010). La poda es muy importante en este tipo de plantaciones y supone una gran partida económica dentro de las prácticas de manejo del cultivo (Rius & Lacarte, 2010). Godini et al. (2011) han determinado que el vigor del árbol es un factor clave con relación a la poda en seto. En variedades de vigor medio-bajo, como 'Arbosana' y 'Arbequina' no se han visto disminuciones de rendimiento al realizar la poda mecanizada (Vivaldi et al., 2015).



Figura 1.15. Poda mecanizada en altura (izq.) y en anchura (dcha.) en cítricos de seto estrecho.



Figura 1.16. Poda mecanizada de las ramas bajas en un olivar en seto estrecho (Gil-Sierra, 2015).

Se han realizado pocos estudios acerca de los daños ocasionados en el árbol y en los frutos por este tipo de maquinaria cuando realiza la recolección. Morales-Sillero et al. (2014) determinaron que más del 90% de los frutos cosechados por este tipo de sistemas presentaban daño mecánico y que mostraban una mayor cantidad de cortes y laceraciones que empleando recolección manual. Otros autores han expuesto que el incremento de la velocidad de avance y la frecuencia de trabajo aumentan los daños en los frutos y en la copa y que, por tanto, la regulación y ajuste del funcionamiento de la maquinaria es fundamental en la minimización de daños (Pérez-Ruiz et al., 2018). Para disminuir la proliferación de enfermedades a través de las heridas provocadas por los daños ocasionados a los árboles se suelen emplear tratamientos fúngicos después de la recolección (Tous et al., 2010).

En otros cultivos donde se emplean las cosechadoras cabalgantes es en viña (Vallone et al., 2017), donde tiene su origen, arándanos (Yu et al., 2014; Takeda et al., 2017), cerezas (Mika et al., 2011), ciruelas (Mika et al., 2012, 2015), o café (Cassia et al., 2012; Ferreira et al., 2015), entre otros.

#### 1.4 Justificación de la tesis

En España los cultivos predominantes son los cereales de grano, los árboles frutales y los cultivos forrajeros, representando el 56% del total de la superficie, excluyendo la superficie forestal, barbecho y pastos. En Andalucía destacan por su importancia económica, social y ambiental los cultivos leñosos, principalmente el olivar y los cítricos. De hecho, en Andalucía se concentra el 60% del olivar y el 28% de la superficie de cítricos de España (ESYRCE, 2017).

El cultivo de los cítricos y del olivar tiene una gran componente tradicional, siendo muchas explotaciones poco competitivas debido a los elevados costes de producción y el bajo precio percibido por el agricultor. El incremento constante de los costes de producción, de las materias primas y, sobre todo, de la mano de obra tanto en precio como en disponibilidad hacen que los productores tiendan hacia plantaciones más intensivas que permitan la mecanización de las operaciones, principalmente de su recolección (Brotons-Martínez et al., 2018).

El desarrollo del trabajo que sustenta esta tesis doctoral se enmarca en el contexto de la intensificación sostenible, la cual se está produciendo en los sistemas agrícolas para dar respuesta a los nuevos retos de la agricultura mundial, amparada en la sostenibilidad.

Esta tesis es el fruto de la investigación y desarrollo realizado en dos proyectos “Aplicación de nuevas tecnologías para una estrategia integral de la recolección mecanizada de cítricos (CITRUSREC)” y “Convenio de Compra Pública Innovadora INNOLIVAR” que responden a la necesidad de una mayor comprensión de este tipo de sistemas de recolección y su interacción con el árbol. En el proyecto CITRUSREC se definía como objetivo el desarrollo de diversos sistemas de recolección mecanizada para cítricos, siendo una de las opciones estudiadas los sistemas sacudidores de copa. Por otra parte, desde el proyecto INNOLIVAR se trabaja en diversas líneas de innovación en el sector del olivar. De las líneas planteadas, dos de ellas están basadas en el ensayo y ejecución de sistemas sacudidores de copa para la recolección de aceituna de mesa e industria para plantaciones intensivas. Por consiguiente, entre ambos proyectos aglutinan el estudio, comprensión, mejora y ejecución de sistemas de recolección basadas en sacudidores de copa que puedan dar soporte a los requerimientos actuales de sostenibilidad demandados por los organismos públicos y privados con el afán del progreso y avance de la agricultura.

El necesario comprender y analizar los sistemas agrícolas y su evolución hacia sistemas más sostenibles, teniendo en cuenta al árbol, unidad esencial de los sistemas frutícolas, y su interacción con la maquinaria. Es fundamental caracterizar el árbol y su conjunto, formando un nuevo ente como un seto, con el ambiente, la climatología y las prácticas agrícolas, siendo su eje principal la recolección, para lograr tal fin.

Esta tesis doctoral denominada “Caracterización de la respuesta del árbol a la recolección mecanizada con sacudidores de copa en sistemas de plantación en seto de cítricos y olivar” proporciona respuestas a determinadas preguntas tales como: qué sucede en la interacción de las varas con la copa durante el proceso de recolección, cuáles son las orientaciones de poda y formación para mejorar la eficiencia del proceso y cómo son los frutos que han sido derribados por los sacudidores de copa. Para ello es necesario el estudio del comportamiento del árbol respecto a la recolección mecanizada empleando sacudidores de copa, los cuales están siendo una pieza clave para el cambio hacia la sostenibilidad agrícola.



## Capítulo 2

### Hipótesis y objetivos

## 2.1 Hipótesis inicial

La intensificación de las plantaciones implica aumentar el número de árboles por superficie para facilitar la mecanización de las operaciones, principalmente para el empleo de cosechadoras. Además, se consigue una rápida entrada en producción y una menor dependencia de la mano de obra. Actualmente, las principales cosechadoras comerciales que existen para plantaciones intensivas se basan en sistemas sacudidores de copa. Estas máquinas requieren que las filas de árboles se formen en un seto, con unas dimensiones limitadas. Una recolección mecanizada eficiente requiere de la mutua adaptación de la máquina y del árbol, por lo tanto, está condicionada a la regulación del funcionamiento de la máquina y la configuración y manejo de la plantación.

La tesis doctoral tiene como hipótesis de partida que la adaptación mutua entre el diseño y regulación de los sistemas sacudidores de copa junto con la formación de los árboles en seto, mediante la caracterización de ambos, permite mejorar la eficacia y eficiencia de la recolección mecanizada en cítricos y olivar.

## 2.2 Objetivos

### 2.2.1 Objetivo general

El objetivo general de la tesis doctoral es la mejora del proceso de recolección mecanizada de los árboles en plantación en seto bajo recolección mecanizada con sistemas sacudidores de copa.

### 2.2.2 Objetivos específicos

La consecución del objetivo general se desglosa en tres objetivos específicos:

1. Analizar la interacción de las varas del sacudidor de copa con las ramas de los árboles durante el proceso de recolección mecanizada.
2. Establecer orientaciones de poda y formación de árboles para facilitar la transmisión de la vibración, reducir los daños y mejorar el desprendimiento de los frutos.
3. Definir el patrón de abscisión de los frutos con recolección mecanizada utilizando sistemas sacudidores de copa.

En los capítulos siguientes se detallará el contenido desarrollado en cada uno de los trabajos que componen la tesis doctoral, respondiendo a los objetivos específicos planteados. Cada objetivo específico ha sido desarrollado mediante uno o varios de dichos artículos de la siguiente forma:

Tabla 2.1. Descripción de la asociación entre artículos publicados, capítulos de la tesis y objetivos desarrollados

Artículo científico (JCR)	Capítulo	Objetivo específico
Castro-Garcia, S., Aragon-Rodriguez, F., Arias-Calderón, R., Sola-Guirado, R. R., & Gil-Ribes, J.A. (2020). The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees. <i>Biosystems Engineering</i> , 193, 149-156. <a href="https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.019">https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.019</a>	3. La contribución de los frutos y las hojas a la respuesta dinámica de las ramas secundarias de los naranjos.	1 y 2
Castro-Garcia, S., Aragon-Rodriguez F., Sola-Guirado, R.R., Serrano, A.J., Soria-Olivas, E., & Gil-Ribes, J.A. (2019). Vibration Monitoring of the Mechanical Harvesting of Citrus to Improve Fruit Detachment Efficiency. <i>Sensors</i> , 19(8), 1760. <a href="https://doi.org/10.3390/s19081760">https://doi.org/10.3390/s19081760</a>	4. Monitorización de las señales de vibración en la recolección mecanizada de cítricos para mejorar la eficiencia del desprendimiento de los frutos	1, 2 y 3
Aragon-Rodriguez, F., Castro-Garcia, S., Sola-Guirado, R. R., & Gil-Ribes, J.A. (2019). Fruit abscission pattern of 'Valencia' orange with canopy shaker system. <i>Scientia Horticulturae</i> , 246, 916-920. <a href="https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.087">https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.087</a>	5. Patrón de abscisión de naranja variedad "Valencia" con sistema sacudidor de copa	3
Sola-Guirado, R. R., Aragon-Rodriguez, F., Castro-Garcia, S., & Gil-Ribes, J. (2019). The vibration behaviour of hedgerow olive trees in response to mechanical harvesting with straddle harvester. <i>Biosystems Engineering</i> , 184, 81-89. <a href="https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.009">https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.009</a>	6. El comportamiento vibratorio de los olivos en seto en respuesta a la recolección mecanizada con cosechadora cabalgante	1

## Capítulo 3

# La contribución de los frutos y las hojas a la respuesta dinámica de las ramas secundarias de los naranjos\*

---

\* Basado en: Castro-García, S., Aragón-Rodríguez, F., Arias-Calderón, R., Sola-Guirado, R. R., & Gil-Ribes, J.A. (2020). The contribution of fruit and leaves to the dynamic response of secondary branches of orange trees. *Biosystems Engineering*, 193, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.019>

### 3.1 Resumen/Abstract

Las actuales tecnologías comerciales para la recolección mecanizada de frutos se basan en la aplicación de una vibración forzada al árbol, que se transmite a los frutos causando su desprendimiento. El comportamiento dinámico del árbol bajo vibración forzada es de especial interés para mejorar el diseño y el uso de la maquinaria. El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de los frutos y las hojas en la respuesta dinámica de la rama fructífera en cítricos. En este estudio, se probaron 22 ramas secundarias de un conjunto de naranjos variedad 'Valencia' aplicando vibración forzada y midiendo la respuesta de las ramas con acelerómetros triaxiales. Las ramas se ensayaron en tres etapas: rama completa, rama sin frutos y rama sin frutos y sin hojas. Se identificaron tres valores de frecuencia natural en las ramas, y se establecieron en valores de 2, 7 y 11 Hz. La transmisibilidad de la aceleración a lo largo de la rama disminuyó al aumentar la frecuencia de la vibración. Los valores de transmisión de la aceleración fueron más altos para la primera frecuencia natural, hasta 1,3 veces mayores en la rama sin frutos y hasta 4,6 veces mayores en la rama sin frutos y sin hojas. La presencia de frutos en la rama no modificó los valores de frecuencia natural de la rama, pero redujo ligeramente los valores de transmisión de la aceleración. Sin embargo, la presencia de hojas en las ramas tuvo un doble efecto, reduciendo la primera frecuencia natural y amortiguando drásticamente la transmisibilidad de la aceleración.

*The current commercial technologies for mass harvesting fruit are based on the application of forced vibration to the tree, which is transmitted to the fruits causing their detachment. The dynamic behaviour of the plant under forced vibration is of special interest to improve the design and use of the machinery. The objective of this work is to determine the effect of fruit and leaves on the dynamic response of the citrus branch. In this study, 22 secondary branches of 'Valencia' sweet orange trees were tested by applying forced vibration and measuring the response of the branches with triaxial accelerometers. The branches were tested in three stages: in-fruit branch, out-of-fruit branch and out-of-leaf branch. Three natural frequency values were identified in the branches, and were established as 2, 7 and 11 Hz. Acceleration transmissibility along the branch decreased as vibration frequency increased. The acceleration transmission values were highest for the first natural frequency, and were up to 1.3-fold greater in the out-of-fruit branch and up to 4.6-fold greater in the out-of-leaf branch. The presence of fruits on the branch did not modify the branch natural frequency values but did slightly reduce the values of acceleration transmissibility. However, the presence of leaves on the branches had a double effect, reducing the first natural frequency and drastically damping acceleration transmissibility.*

### 3.2 Introducción

Actualmente, la fruta destinada al mercado de productos frescos se recolecta principalmente a mano, mientras que la fruta que se va a someter a transformación industrial se puede cosechar con sistemas mecanizados. Sin embargo, en el caso de los cítricos, la cosecha para la industria sigue siendo principalmente manual, a pesar de la existencia de tecnología comercial (Roka & Hyman, 2012). Los principales obstáculos para la introducción de la cosecha mecánica son la falta de adaptación de las plantaciones existentes, los posibles daños causados por la maquinaria a los árboles y la baja eficiencia en el desprendimiento de los frutos (Spann & Danyluk, 2010). Las tecnologías comerciales disponibles para la recolección mecanizada de

frutos se basan en la aplicación de una vibración forzada en las ramas o el tronco del árbol, que se transmiten a los frutos causando su desprendimiento. Entre los sistemas de recolección mecanizada de cítricos más extendidos se encuentran los sacudidores de copa, con valores de frecuencia de vibración que suelen ser inferiores a 5-6 Hz (Liu et al., 2017; Pu et al., 2018); los vibradores de troncos, con valores de frecuencia que van desde 4,8 a 8 Hz (Burns et al., 2006) a los 14,1-15,5 Hz (Moreno et al., 2015) y vibradores de ramas, con valores de frecuencia hasta los 18-24 Hz (Torregrosa et al., 2009). El perfeccionamiento y la aplicación de estos sistemas de recolección de cítricos se ha basado en un doble objetivo: mejorar la eficiencia de la recolección de los frutos y reducir los posibles daños tanto en el árbol como en la fruta.

Las propiedades dinámicas de los árboles determinan su respuesta a la excitación externa (Spatz et al., 2007). En trabajos anteriores se han establecido las propiedades dinámicas de los árboles, principalmente de las especies forestales, con el fin de reducir el riesgo de que los árboles colapsen debido a la excitación del viento (Schindler et al., 2010), para su uso seguro en jardinería evitando la caída de árboles o ramas (Ciftci et al., 2013), para la recolección mecánica selectiva (Castro-García et al., 2011), para la modelización en sistemas de simulación (Jackson et al., 2019) o para el análisis de fracturas (Yang et al., 2019). Sin embargo, los estudios dinámicos sobre especies arbóreas de interés agrícola se centran en las aplicaciones en la recolección mecanizada. A diferencia de las especies forestales, las especies leñosas de interés agronómico se orientan a la producción de frutos, con una variación en el rendimiento entre las campañas según la especie y su gestión. En el caso de los cítricos, el rendimiento puede alcanzar (Speck & Spatz, 2004) valores de 25.000 a 45.000 kg ha<sup>-1</sup> (Burns et al., 2006). Además, los árboles frutales pueden estar sujetos a fuertes restricciones de crecimiento debido a las prácticas de formación y poda. La formación y la geometría de los árboles tienen repercusiones directas en la eficiencia de la recolección mecanizada (Du et al., 2012).

Durante el proceso de recolección mecanizada el árbol pasa de una situación con frutos a una situación sin frutos en un corto período de tiempo (Zhou et al., 2016). Este cambio implica una modificación de la masa del árbol que podría afectar a su respuesta a la vibración y, por lo tanto, al resultado de la operación. En el caso de las aceitunas de mesa, Castro-García et al. (2015) demostraron que, para lograr una alta eficiencia en la cosecha con vibradores de troncos, es necesario regular tanto la frecuencia como la aceleración durante la vibración. Aunque el aumento de los valores de aceleración aplicados al tronco mejoró la eficiencia de la recolección, también contribuyó a que se produjeran daños tanto en los frutos como en los árboles. En pruebas de campo con un vibrador de troncos en olivares intensivos, Tombesi et al. (2017) demostraron que la presencia de varetas durante la cosecha reducía la transmisión de la vibración a la copa y disminuía la eficiencia de la operación. La eficiencia de la recolección, así como los daños causados al árbol, están condicionados, entre otras variables, por la frecuencia de la vibración (Burns et al., 2006). De hecho, el establecimiento de la frecuencia de vibración en el rango de 4,5-5 Hz puede permitir que los sistemas sacudidores de copa discriminen entre los frutos maduros y los frutos inmaduros (Castro-García et al., 2017). El presente trabajo es una continuación de estas pruebas con el objetivo de mejorar la cosecha mecánica de los cítricos por vibración. La respuesta dinámica de los árboles y su variación durante el proceso de recolección mecanizada puede contribuir a mejorar el diseño y la utilización de las máquinas. Sin embargo, la respuesta de los órganos de una planta a la carga dinámica puede ser muy compleja y a veces inesperada (Niklas, 1992). Uno de los métodos para determinar la influencia de los diversos órganos de la planta en la dinámica de la planta es la eliminación gradual de los órganos de la planta (Speck & Spatz, 2004). El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de los frutos maduros y las hojas en la respuesta dinámica de las ramas fructíferas secundarias de los cítricos.

En este trabajo se realiza un análisis de la respuesta dinámica de la rama en función de la presencia de frutos y/u hojas, en un amplio rango de frecuencias que son de interés en el diseño y funcionamiento de la maquinaria de recolección mecanizada.

### 3.3 Materiales y métodos

Las ramas ensayadas se obtuvieron de dos plantaciones comerciales de naranja dulce (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck cv. Valencia) situados en el sur de España (Córdoba). La primera plantación se ensayó en 2015 y la segunda en 2019. Ambas plantaciones estaban en riego, en buenas condiciones fitosanitarias, tenían una distancia entre los árboles de 7 x 3 m, y una superficie de 17,6 y 22,3 ha, respectivamente. Se realizaron pruebas en condiciones de laboratorio durante la época de cosecha, en un total de 22 ramas, es decir, 11 ramas por plantación. Se tomaron muestras de tres filas de árboles en cada plantación y se eligieron ramas secundarias con frutos y diámetro de tallo similar, utilizando un muestreo aleatorio simple y excluyendo el primer y el último árbol de cada fila. Las ramas muestreadas tenían frutos maduros, sin presencia de estrés biótico o abiótico, sin flores y, en algunos casos, pequeños frutos inmaduros. Durante la prueba de laboratorio, que duró de 2 a 3 días, las ramas se almacenaron en una cámara frigorífica a una temperatura de 5°C y una humedad relativa del 95%, sin que se observaran cambios en la turgencia y sin indicios de marchitamiento.

La medición de la respuesta de la rama a la vibración forzada se realizó en el laboratorio, fijando la rama en su base (Fig. 3.1). El ensayo de la rama se realizó como un sistema de entrada simple y de salida múltiple. La entrada era una vibración unidireccional, perpendicular al tallo de la rama, aplicada cerca de su base con un vibrador electromagnético (LDS V406, Nærum, Dinamarca). Se utilizó un ruido blanco aleatorio en el rango de frecuencia de 0-60 Hz, con una duración de 1 min, para evitar posibles efectos de resonancia en la rama o la fijación. Se redujo la amplitud de la vibración para evitar que se desprendieran frutos u hojas durante el ensayo. Se consideró la respuesta de cada rama en múltiples salidas, correspondientes al camino recorrido por la vibración desde el punto de aplicación hasta la subrama que produce los frutos maduros. La salida de cada rama se designó como un camino de vibración.

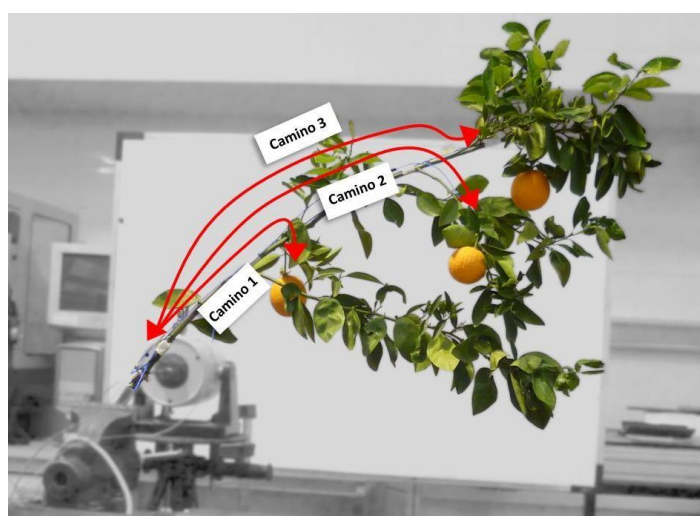


Figura 3.1. Disposición del ensayo de la respuesta dinámica de la rama fructífera de naranja que se ramifica con una sola entrada del vibrador electromagnético y múltiples salidas a lo largo de tres rutas de vibración según la presencia de frutos maduros.

La respuesta de la rama, tanto en su entrada como en sus múltiples salidas, se midió con un conjunto de cinco acelerómetros triaxiales piezoeléctricos (PCB 356A32, Depew, NY, EE. UU.) con un rango de medición de  $\pm 491 \text{ ms}^{-2}$ , una sensibilidad de  $10,2 \text{ mV (ms}^{-2})^{-1}$  y un rango de frecuencia de 1-4000 Hz. Por lo tanto, en una misma rama se podrían medir hasta cuatro caminos de vibración según la presencia y disposición de los frutos. Las ramas se ensayaron en tres etapas, como se muestra en la figura 3.2. Primero se ensayó la rama con los frutos, luego se quitaron los frutos y finalmente se quitaron las hojas. Los acelerómetros se colocaron en la rama al principio de la prueba y permanecieron en la misma posición durante todas las etapas del ensayo. La geometría de la rama y la masa de los diferentes órganos se determinaron durante el ensayo. La masa de cada camino de vibración se estimó en relación con la masa total de la rama según su distancia desde la base, el diámetro de la rama y el peso del fruto.

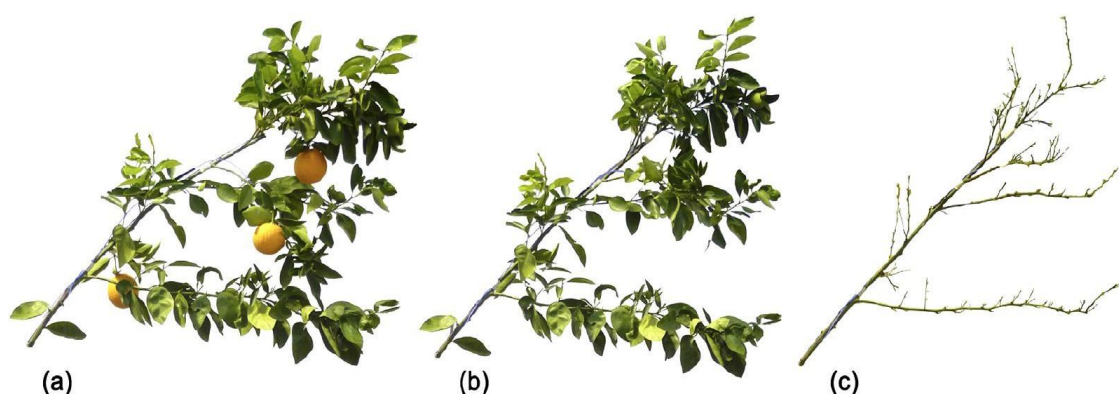


Figura 3.2. Respuesta de la rama fructífera de naranjo a la vibración forzada, ensayada en tres etapas: (a) rama completa, (b) rama sin frutos, (c) rama sin frutos y sin hojas.

Se utilizó un analizador de señales dinámicas de 16 canales (OROS 36 Mobi-Pack, Meylan, Francia) controlado por un software de análisis de señales (NVGate v.8, Meylan, Francia) para generar la señal de entrada, registrar y analizar las señales de aceleración. En total, se analizaron 234 señales de aceleración mediante una Transformada Rápida de Fourier, con 401 líneas de resolución en un rango de frecuencias de 0-60 Hz. Los resultados se promediaron para trabajar con una resolución espectral de 0,5 Hz. La respuesta de la rama a la vibración se expresó en las tres direcciones del espacio, por lo que se utilizaron acelerómetros triaxiales tanto para la entrada como para las salidas múltiples. Para cada sensor de aceleración, la aceleración resultante se determinó como la suma vectorial de cada señal de aceleración en los tres ejes de medición. Posteriormente, se calculó para cada camino de vibración la relación entre la aceleración resultante de salida y la aceleración resultante de entrada correspondiente a cada valor de frecuencia. Esta relación se denomina transmisibilidad de la aceleración (Castro-García et al., 2017). Los valores de transmisibilidad de la aceleración por encima de la unidad indicaban una amplificación de la vibración aplicada desde la base al exterior de la rama, mientras que los valores de transmisibilidad de la aceleración por debajo de la unidad indicaban una reducción de la vibración aplicada.

Los resultados obtenidos de las ramas y los caminos de vibración, tanto en parámetros físicos y geométricos como en respuesta a la vibración forzada, no tenían una distribución gaussiana en todos los casos. Por lo tanto, se utilizaron pruebas no paramétricas en el análisis de los resultados. Sin embargo, cuando se cumplieron las condiciones normales, los resultados se confirmaron con pruebas paramétricas. El software estadístico utilizado para el análisis de



datos fue IBM SPSS Statistics 25 (International Business Machines Corporation; SPSS Statistics 25, Nueva York, EE. UU.).

### 3.4 Resultados

Los datos de la señal del sensor de aceleración y la información sobre cada camino de vibración de este estudio están disponibles en Mendeley Data (<https://data.mendeley.com/datasets/j7h954vvzk/2>).

Las ramas ensayadas de las dos campañas y plantaciones fueron similares en masa, longitud y diámetro de la base de las ramas (Tabla 3.1). Sin embargo, en la primera campaña, las ramas tenían un volumen significativamente menor, con menos frutos y una mayor masa unitaria por fruto que en la segunda temporada (prueba U de Mann-Whitney,  $p < 0,05$ ). En ambas campañas, las ramas tenían una proporción de masa de frutos (69,4%), hojas (14,9%) y tallo (14,5%) que no mostraban diferencias significativas entre las temporadas (prueba U de Mann-Whitney,  $p > 0,05$ ).

Tabla 3.1. Características de las ramas ensayadas según la campaña de cosecha.

Campaña	2015	2019	Todas
Número de ramas	11	11	22
Masa (g)	1925 (670) a	1817 (555) a	1892 (631)
Longitud (cm)	120 (30) a	120 (30) a	120 (28)
Volumen (L)	91,6 (115,2) a	150,8 (99,6) b	117,5 (119,9)
Diámetro de la base de la rama (mm)	16,7 (5,0) a	16,1 (1,9) a	16,3 (3,0)
Número de frutos maduros por rama	4,0 (2,0) a	9,0 (4,0) b	6,0 (5,0)
Masa unitaria de los frutos (g)	252 (62) a	145 (62) b	203 (109)
Masa de los frutos (%)	69,9 (19,2) a	68,8 (9,4) a	69,4 (11,1)
Masa de las hojas (%)	14,6 (12,9) a	15,3 (7,7) a	14,9 (8,1)
Masa de la rama (%)	13,6 (8,4) a	16,0 (4,9) a	14,5 (5,4)

Los valores mostrados son la mediana y, entre paréntesis, el rango intercuartílico. Una letra diferente en la misma fila indica una diferencia significativa (prueba U de Mann-Whitney,  $p < 0,05$ ).

El estudio de la transmisión de vibraciones, desde la base de la rama hasta el fruto maduro, se llevó a cabo en 53 caminos de vibración: 17 y 36 caminos de vibración por campaña respectivamente. La segunda campaña tenía un mayor número de frutos maduros por rama y, por lo tanto, fue posible establecer un mayor número de caminos de vibración. Aunque la masa media del camino de vibración en la primera campaña fue mayor que en la segunda (prueba U de Mann-Whitney,  $p < 0,05$ ), la proporción entre la masa del fruto (76,4%), la masa de la hoja (11,9%) y la masa del tallo (10,9%) no presentó diferencias significativas entre campañas (prueba U de Mann-Whitney,  $p > 0,05$ ).

La figura 3.3 muestra la transmisibilidad de la aceleración en los caminos de vibración dentro del rango de frecuencia de 1-30 Hz para las tres etapas de las ramas estudiadas. La transmisibilidad de la aceleración varió considerablemente dependiendo de la frecuencia de vibración aplicada. Sin embargo, la respuesta de cada camino de vibración presentó un patrón similar para cada etapa de la rama. En el rango de frecuencias entre 30 y 60 Hz, la transmisibilidad de la aceleración mostró una tendencia decreciente, con valores similares para las tres etapas de las ramas.

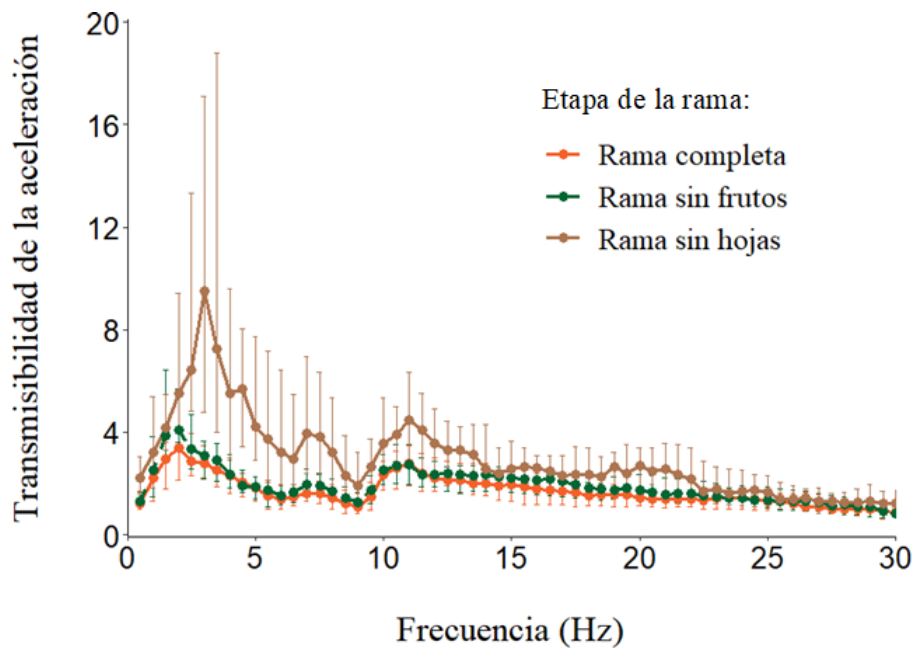


Figura 3.3. Valores de la mediana y rango intercuartílico de la transmisibilidad de la aceleración para los caminos de vibración ( $n = 53$ ) desde la base de la rama hasta el fruto para cada etapa ensayada.

La etapa de ramas sin hojas alcanzó los valores más altos de transmisibilidad de aceleración en comparación con las otras etapas de rama. En esta etapa se identificaron tres valores predominantes de frecuencia de vibración en los que se produjeron valores máximos de transmisibilidad de la aceleración. Estos valores de frecuencia con máxima transmisibilidad de aceleración se obtuvieron repetidamente en las etapas con la rama completa y con la rama sin frutos. Estos valores máximos se identificaron como las frecuencias naturales de los caminos de vibración, correspondientes a tres modos de vibración, en los que se generaron altos valores de amplificación de la vibración en relación con la vibración aplicada. A partir de un valor de frecuencia de 15 Hz, las diferencias entre la transmisibilidad de la aceleración en las diferentes etapas de la rama se redujeron y, a partir de 30 Hz, estos valores tuvieron un patrón similar.

En la tabla 3.2 se resumen los valores de frecuencia y aceleración de la transmisibilidad para cada camino de vibración correspondiente a las frecuencias naturales. La primera frecuencia natural se situó en 2,0 Hz para las etapas de rama completa y rama sin frutos. Sin embargo, al retirar las hojas de la rama, el primer valor de frecuencia natural aumentó significativamente a 3 Hz (prueba de Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ). En la primera frecuencia natural, la vibración se amplificó 4 veces desde la base de la rama hasta el pedúnculo de la fruta. Al quitar los frutos, la transmisión de aceleración se incrementó 1,3 veces, mientras que, al quitar las hojas, la transmisión de aceleración se incrementó 4,6 veces, con diferencias significativas entre las tres etapas de la rama (prueba U de Mann-Whitney,  $p < 0,05$ ). La segunda frecuencia natural mostró un valor de 7,0 Hz, donde la amplificación de la vibración fue de 1,9 veces. Eliminando los frutos y luego las hojas, el valor de la segunda frecuencia natural se mantuvo, pero los valores de la transmisibilidad de la aceleración para cada nueva etapa de la rama aumentaron. El valor de la tercera frecuencia natural se produjo a una frecuencia de 11 Hz, sin diferencias significativas entre los valores de transmisibilidad de la aceleración de las etapas de rama completa y sin frutos. La mayor diferencia entre los valores de transmisibilidad de la aceleración para los valores de frecuencia natural se obtuvo al quitar las hojas. En la rama sin hojas, los valores de

transmisibilidad de la aceleración disminuyeron significativamente (prueba de Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ) a medida que el valor de frecuencia natural aumentó.

Tabla 3.2. Valores de frecuencia natural (Hz) y de transmisibilidad de la aceleración identificados en la respuesta de los caminos de vibración para cada estado de la rama ensayada durante las campañas de recolección de 2015 (n=17) y 2019 (n=36).

Campaña	Estado rama	Frecuencia (Hz)			Transmisibilidad aceleración		
		2015	2019	Todas	2015	2019	Todas
1° Frecuencia natural	Completa	2.0 (2.3)	2.0 (1.0)	2.0 (1.3)a	2.8 (2.9)	4.2 (2.5)	4.0 (3.1)a
	Sin frutos	2.0 (0.8)	2.0 (1.4)	2.0 (1.0)a	6.4 (5.0)	5.1 (4.7)	5.3 (5.0)b
	Sin hojas	4.0 (0.8)	3.0 (1.5)	3.0 (1.0)b	18.3 (19.9)	19.5 (21.5)	18.3 (21.5)c
2° Frecuencia natural	Completa	7.0 (1.0)	7.0 (0.0)	7.0 (0.0)a	2.2 (0.9)	1.7 (1.1)	1.9 (1.1)a
	Sin frutos	7.0 (0.5)	7.0 (0.0)	7.0 (0.0)a	2.2 (0.7)	1.9 (1.3)	2.2 (1.0)b
	Sin hojas	7.5 (0.8)	7.0 (0.0)	7.0 (0.5)a	7.6 (6.6)	5.1 (6.5)	6.5 (5.7)c
3° Frecuencia natural	Completa	12.5 (3.0)	10.8 (1.0)	11.0 (2.0)a	2.2 (1.3)	3.1 (2.1)	2.8 (1.8)a
	Sin frutos	12.0 (4.0)	10.0 (1.0)	10.5 (1.0)a	2.5 (1.1)	3.2 (1.7)	2.9 (1.6)a
	Sin hojas	11.0 (2.0)	11.0 (1.0)	11.0 (1.5)a	4.2 (4.1)	5.8 (5.1)	5.2 (4.4)b

La resolución de la frecuencia es de 0,5 Hz. Los valores mostrados son la mediana y, entre paréntesis, el rango intercuartílico. Una letra diferente en la misma fila indica una diferencia significativa (Kruskal-Wallis test and Mann-Whitney U test,  $p < 0.05$ ).

En la fase con rama completa, en la primera frecuencia natural, los valores de transmisibilidad de la aceleración disminuyeron a medida que la masa de cada trayectoria de vibración aumentó (Pearson = 0,321,  $p < 0,05$ ,  $n = 53$ ). Este mismo resultado se observó en la tercera frecuencia natural para las tres etapas de la rama (Pearson = 0,292, 0,329 y 0,314,  $p < 0,05$ ,  $n = 53$ , respectivamente). Por otra parte, para otros valores de frecuencias naturales, la masa de los caminos de vibración no mostró ninguna correlación lineal significativa con los valores de la transmisibilidad de la aceleración.

Para la etapa con rama sin frutos y sin hojas, en la primera frecuencia natural, los valores de la transmisibilidad de la aceleración aumentaron a medida que la longitud de la trayectoria de vibración se incrementaba (Pearson = 0,358 y 0,587,  $p < 0,05$ ,  $n = 53$ , respectivamente). Sin embargo, este resultado no se encontró en la etapa de la rama con fruta para los valores de frecuencia natural.

### 3.5 Discusión

Las ramas fructíferas secundarias mantuvieron una proporción con respecto a la distribución de la masa en los diferentes órganos, frutos, hojas y tallo, a pesar de las diferencias obtenidas entre los valores de volumen de rama y número de frutos entre las dos campañas. La planta alcanzó un equilibrio entre sus órganos, asociándose un elevado número de frutos por árbol a frutos de tamaño pequeño (Blanke & Bower, 1991). Guardiola & García-Luis (2000) demostraron que, para varias variedades de naranja y mandarina, existe una relación inversa entre el número de flores y el tamaño del fruto, así como entre la masa unitaria del fruto y el número de frutos del árbol. Para ello, el árbol establece una regulación entre la parte foliar y la producción de frutos. Para la variedad 'Valencia', la relación entre el área foliar y el fruto maduro se establece en 800 cm<sup>2</sup> de hoja, es decir, aproximadamente 40 hojas por fruto (Yuan et al., 2005). Confirmando este resultado para las especies leñosas, Sun et al. (2019) demostraron que

existe una relación entre la biomasa y el diámetro de la rama que es independiente de la especie o la altura de la rama.

Las ramas mostraron una respuesta similar a la vibración en el rango de frecuencia ensayado, pero con una magnitud diferente de la transmisión de la aceleración dependiendo de la etapa de la rama. La proporción de masa entre los diferentes órganos de las ramas podría haber contribuido decisivamente a la homogeneidad de la respuesta dinámica de las ramas, dando a las propiedades de los materiales un papel menos prominente (James et al., 2014). En el rango de frecuencias estudiado, las ramas respondieron con valores de transmisibilidad de aceleración máxima en los valores de frecuencia que correspondían a los modos de vibración de la estructura (Bunce et al., 2019). Otros parámetros como la esbeltez, el módulo elástico del tallo y la amortiguación, que no se determinaron en los ensayos, podrían influir en el factor de amplificación del desplazamiento dinámico de la rama (Ciftci et al., 2013). En consecuencia, aunque las frecuencias naturales identificadas eran similares entre las ramas, la respuesta de cada una de ellas en los valores de transmisibilidad de la aceleración no lo fueron. Theckes et al. (2015) establecieron un mecanismo en la respuesta del árbol a la vibración conocido como amortiguación por ramificación, que se ha demostrado que tiene una gran capacidad para atenuar la respuesta de la estructura en el rango de grandes amplitudes, es decir, cerca de las frecuencias naturales. Este sistema de amortiguación de vibraciones es muy robusto frente a las variaciones de la geometría y el tipo de amortiguación de la estructura. Rodríguez et al. (2008) afirman que la arquitectura de los árboles puede basarse en leyes de escala que reducen su comportamiento dinámico a sus frecuencias naturales y otros parámetros biométricos. Este mismo comportamiento se ha demostrado en la vibración forzada de árboles completos, donde las propiedades dinámicas de los árboles grandes y pequeños eran similares cuando estaban sujetos a una ley de escala (Castro-García et al., 2008). Estos resultados indican que la respuesta dinámica de las ramas fructíferas secundarias puede ser similar con respecto a la frecuencia natural de sus modos de vibración, a pesar de las diferencias de tamaño y número de frutos.

### *3.5.1 La contribución de los frutos a la respuesta dinámica de la rama*

La presencia de frutos en las ramas implicaba que el 69,4% de la masa se distribuía en la parte externa como carga puntual a través de la unión del pedúnculo con la rama. El efecto de la masa en la respuesta dinámica de las ramas fue descrito por James et al. (2006), señalando la contribución de la masa empleando el término 'amortiguación de la masa', que es un mecanismo muy eficaz para reducir el movimiento armónico de las ramas contra la excitación externa y contribuye a la estabilidad de la estructura. Los frutos en la rama produjeron una reducción de la respuesta de la rama en los valores de transmisibilidad de la aceleración, especialmente en los valores de baja frecuencia (2 Hz), en comparación con las etapas de ramas sin frutos y ramas sin hojas. Así pues, la presencia del fruto contribuyó a una amplificación de la vibración aplicada desde el interior al exterior de la rama. La carga puntual de los frutos maduros pudo contribuir a que los caminos de vibración se comportaran como osciladores armónicos amortiguados individuales acoplados al tallo, mejorando la amortiguación estructural de la rama (Spatz & Theckes, 2013). De hecho, la presencia de frutos limitó el efecto descrito por Ciftci et al. (2013), que descubrieron que, para un árbol sin frutos, un aumento de la longitud de la rama correspondía a un aumento de la transmisión de las vibraciones. Liu et al. (2017) mostraron un resultado similar a través de un estudio experimental en las ramas con cítricos. Estos autores determinaron un valor medio de transmisión de 4,7 veces, para una frecuencia de excitación de

2,5 Hz, desde el interior del árbol hasta la parte exterior de la copa. En ensayos anteriores de transmisión de vibraciones en las ramas de los cítricos, con el fin de discriminar la respuesta de los frutales maduros e inmaduros, Castro-García et al. (2017) identificaron valores de frecuencias naturales de 2,0 y 7,0 Hz en la respuesta de los frutos. Sin embargo, los frutos maduros en una gama de frecuencias de 4,5-5 Hz proporcionaban una respuesta diferente a los frutos inmaduros.

La ausencia de frutos en las ramas permitió que la respuesta dinámica de estas se acercara más a las experiencias descritas para las especies forestales, especialmente aquellas con formas decurrentes (Miesbauer et al., 2014). Las ramas en la etapa de ausencia de frutos presentaron un equilibrio entre la masa de las hojas y la masa de su tallo. Cuando se quitaron los frutos, no hubo cambios en los valores de las frecuencias naturales, aunque su participación en la masa de la rama fue muy importante. Un resultado similar fue mostrado por Wu & Lin (1990): la eliminación de los frutos, considerados como una masa concentrada en el extremo libre de un viga en voladizo, dio una variación de los primeros valores de frecuencias naturales que era insignificante cuando la relación de masas (masa del fruto/masa del tallo) oscilaba entre 3 y 9. Moore & Maguire (2004) observaron que los valores de frecuencia natural de las especies de coníferas eran proporcionales a los parámetros geométricos del árbol, principalmente al diámetro y a la altura del árbol. Otros parámetros, como la presencia de hojas o la temperatura por encima o por debajo del punto de congelación pueden contribuir a modificar las frecuencias naturales de un árbol (Bunce et al., 2019). En estudios de la estructura de las ramas, Lee & Jim (2018) demostraron que el orden de las ramas, la relación de diámetros y la longitud podrían afectar a las propiedades en el dominio de la frecuencia del movimiento oscilatorio. Ensayos con árboles de crecimiento abierto mostraron que la modificación de la frecuencia natural mediante la eliminación de ramas requería la eliminación de más del 80% de la masa de la copa (Moore & Maguire, 2005). La eliminación de los frutos produjo un aumento significativo de la transmisión de las vibraciones en las ramas, principalmente a valores de baja frecuencia (2 y 7 Hz).

### 3.5.2 La contribución de las hojas a la respuesta dinámica de la rama

Tras la eliminación de las hojas, posterior a la eliminación de los frutos, hubo una disminución del 50% en la masa de la rama. La ausencia de hojas aumentó el valor de la primera frecuencia natural, mientras que la transmisibilidad de la aceleración en comparación con la etapa de la rama sin frutos también aumentó. Kovacic et al. (2018) encontraron resultados similares con un aumento de 1,6 veces en la frecuencia natural al quitar las hojas en un árbol en maceta (*Aesculus hippocastanum*), mientras que Reiland et al. (2015) mostraron valores de 1,2 veces para los robles rojos (*Quercus rubra* L.). Otros estudios corroboraron estas observaciones de reducción de la frecuencia natural en los modos de vibración de baja frecuencia debido a la presencia de hojas (Baker, 1997; Hu et al., 2008). Netsvetov & Nikulina (2010) afirmaron que las hojas tienen un doble efecto, por un lado, son capaces de reducir la transmisión de la vibración al funcionar como un amortiguador aerodinámico y, por otro, como una masa que reduce la amortiguación. El efecto de las hojas se acentúa cuanto más externas están en la copa. Du et al. (2013) demostraron que, en una plantación de cerezos dulces de alta densidad, el follaje y el fruto causaban un importante efecto de amortiguación en la transmisión de la energía vibratoria a lo largo de los brotes fructíferos verticales, al tiempo que mostraban un valor de frecuencia natural constante de 8-10 Hz. La contribución de las hojas a la amortiguación se debe a que desempeñan un papel importante en los mecanismos disipadores de estas oscilaciones (Sellier

et al., 2006, Spatz & Theckes, 2013). Una vez eliminadas las hojas y los frutos, la transmisión de la vibración en la rama está condicionada por la geometría de esta (Du et al., 2012, 2015), por las propiedades de la madera (Jagels et al., 2018) y por la relación entre el diámetro y la longitud de la rama, lo que altera las propiedades de las oscilaciones en el dominio de la frecuencia (Lee & Jim, 2018).

### 3.5.3 Implicaciones para los sistemas de recolección mecanizada de frutos

Los sistemas de recolección mecanizada de cítricos tienen como objetivo desprender el fruto por medio de la vibración, haciendo que el árbol pase de la fase de rama con frutos, o rama completa, a rama sin frutos. En función de los resultados, la regulación de la frecuencia de la máquina no debe basarse en la cantidad de fruta en el árbol ni cambiarse durante el tiempo de vibración. No obstante, la aplicación de diferentes valores de frecuencia para diferentes partes del árbol ha dado un resultado satisfactorio (Pu et al., 2018). La regulación del valor de frecuencia dependerá de la tecnología de recolección empleada, con valores más bajos para el sacudidor de copa, que van de 2 a 6 Hz (Savary et al., 2010), y valores más altos para los vibradores de troncos, que van desde los 5 a 18 Hz (Castro-García et al., 2017). Esto se debe a que cada tecnología aplica la vibración con diferente valor de amplitud en diferentes partes del árbol. Se debe prestar atención al uso de una combinación de baja frecuencia con altos valores de aceleración, lo que da lugar a un alto valor de desplazamiento y esto podría provocar daños en la corteza cuando se trabaja con vibradores de troncos (Whitney et al., 2001). Sin embargo, el tamaño del árbol, basado en su masa foliar, tiene un efecto importante en la transmisión de la vibración y puede reducir la eficiencia de la recolección a medida que aumenta el tamaño de este (Castro- García et al., 2017). Ante la reducción de los valores de eficiencia de la recolección en árboles grandes, no es apropiado aumentar la frecuencia de vibración cuando se superan los 11 Hz. En este caso, deben considerarse otras soluciones, como ajustar el tamaño del árbol mediante la poda, el uso de agentes de abscisión o el cambio de la tecnología de recolección de vibradores de troncos a sacudidores de copa.

## 3.6 Conclusiones

Las ramas secundarias fructíferas de cítricos muestran los mismos tres primeros valores de frecuencia natural en condiciones de vibración forzada. Las frecuencias naturales de la rama están determinadas por el tallo, mientras que los valores de transmisión de la aceleración están condicionados por la presencia de frutos y hojas. La presencia de frutos no modifica la respuesta de frecuencia de la rama, pero sí reduce la transmisibilidad de la aceleración, especialmente a bajas frecuencias. Las hojas proporcionan un doble efecto: por un lado, una notable amortiguación de la vibración y, por otro, una modificación de la respuesta en frecuencia para las bajas frecuencias. La selección de un valor de frecuencia de vibración adecuado para el árbol es decisiva para la recolección mecanizada de los cítricos.

## Capítulo 4

# Monitorización de las señales de vibración en la recolección mecanizada de cítricos para mejorar la eficiencia del desprendimiento de los frutos<sup>\*</sup>

---

<sup>\*</sup> Basado en: Castro-Garcia, S., Aragon-Rodriguez F., Sola-Guirado, R.R., Serrano, A.J., Soria-Olivas, E., & Gil-Ribes, J.A. (2019). Vibration Monitoring of the Mechanical Harvesting of Citrus to Improve Fruit Detachment Efficiency. *Sensors*, 19(8), 1760. <https://doi.org/10.3390/s19081760>

## 4.1 Resumen/Abstract

La introducción de la recolección mecanizada de naranjas puede contribuir a aumentar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas y a reducir la dependencia de la mano de obra. El objetivo de este trabajo es determinar la propagación de la vibración en la copa de los cítricos para establecer recomendaciones que permitan alcanzar altos valores de eficiencia en el desprendimiento de la fruta y eliminar la necesidad de posteriores procesos de recolección manual. Se realizaron ensayos de campo con un sacudidor de copa lateral en cuatro parcelas comerciales de naranjas dulces. La vibración de la copa durante el proceso de cosecha se midió con un conjunto de acelerómetros triaxiales con un registrador de datos colocado en 90 ramas fructíferas. Se monitorizó del proceso de vibración, la producción de frutos y las propiedades de las ramas. La mejora de la eficiencia en el desprendimiento de los frutos fue posible si tanto la copa del árbol como la maquinaria se ajustaban mutuamente. El seto debe ser formado para facilitar el acceso de las varas y fomentar la fructificación externa, ya que las ramas internas de la copa mostraron el 43% del nivel de aceleración en comparación con las ramas externas. La máquina debe ajustarse para hacer vibrar las ramas con un tiempo de vibración de al menos 5,8 s, después de la interacción de la vara con la rama, junto con un valor cuadrático medio de la aceleración ( $A_{RMS}$ ) de  $23,9 \text{ ms}^{-2}$  para un total desprendimiento de los frutos.

*The introduction of a mechanical harvesting process for oranges can contribute to enhancing farm profitability and reducing labour dependency. The objective of this work is to determine the spread of the vibration in citrus tree canopies to establish recommendations to reach high values of fruit detachment efficiency and eliminate the need for subsequent hand-harvesting processes. Field tests were carried out with a lateral tractor-drawn canopy shaker on four commercial plots of sweet oranges. Canopy vibration during the harvesting process was measured with a set of triaxial accelerometer sensors with a datalogger placed on 90 bearing branches. Monitoring of the vibration process, fruit production, and branch properties were analysed. The improvement of fruit detachment efficiency was possible if both the hedge tree and the machinery were mutually adjusted. The hedge should be trained to facilitate access of the rods and to encourage external fructification since the internal canopy branches showed 43% of the acceleration vibration level of the external branches. The machine should be adjusted to vibrate the branches at a vibration time of at least 5.8 s, after the interaction of the rod with the branch, together with a root mean square acceleration value of  $23,9 \text{ ms}^{-2}$  to a complete process of fruit detachment.*

## 4.2 Introducción

Los cítricos, ya sea para consumo en fresco o para procesamiento industrial, se cosechan principalmente a mano. En todo el mundo se produjeron 147 millones de toneladas de cítricos en 2017, incluyendo naranja, pomelo, limón, mandarina y otros cítricos (FAOSTAT, 2019). España es el sexto productor mundial de cítricos, con una producción aproximada en 2017-2018 de más de siete millones de toneladas. En España, las plantaciones de cítricos predominantes están diseñadas para la recolección manual, con una orientación hacia el mercado de productos frescos. Las plantaciones para recolección manual experimentan problemas debido a la disponibilidad de mano de obra y a un alto coste de explotación.



Dentro del proceso de producción de los cítricos, la recolección es una fase de enorme importancia económica debido a su alto impacto en el coste final de la producción. La recolección manual en el sur de España representa entre el 25% y el 35% del coste final de producción (Junta de Andalucía, 2019). Roka & Hyman (2012) afirmaron que, en las condiciones de Florida, la aplicación de la cosecha mecánica para el procesamiento industrial podría proporcionar una reducción del 50% de los costes, al tiempo que aumentaría la productividad laboral en un 10%. Con el enfoque actual de la producción de cítricos, los altos costes de la recolección manual podrían comprometer la rentabilidad de la actividad y el futuro de las plantaciones a largo plazo (Brotons-Martínez et al., 2018).

Desde la década de los 70, el desarrollo de sistemas de recolección mecanizada de cítricos para la industria de los zumos se ha producido principalmente en Florida. Sin embargo, ninguno de los sistemas mecanizados ha podido igualar la flexibilidad y la capacidad de selección de fruta de la recolección manual (Sanders et al., 2005). Los principales sistemas mecánicos de cosecha son los sistemas basados en vibradores de troncos y sacudidores de copa que se aplicaron y desarrollaron para los cítricos, y que alcanzan altos valores de eficiencia en la recolección, oscilando entre el 84-95% y el 55-95%, respectivamente (Whitney, 1999). Sin embargo, en ambos sistemas se ha identificado el desprendimiento de los frutos inmaduros, ocurriendo principalmente en variedades tardías que son de especial interés para la industria de los zumos y, además, produciendo una reducción de la capacidad de trabajo ( $\text{ha h}^{-1}$ ), pudiendo representar un obstáculo para la adopción de estos sistemas de recolección mecanizada por parte de los agricultores. Roka et al. (2005) mostraron valores de reducción del rendimiento para el uso de estas máquinas en comparación con la recolección manual del 20-50% según su uso y regulación. Paralelamente, el desarrollo y la prueba de agentes de abscisión han permitido aumentar la capacidad de trabajo y mejorar el desprendimiento de los frutos maduros con estas tecnologías de recolección (Burns et al., 2005). Se demostró que una reducción moderada de la fuerza de desprendimiento del fruto, mediante la aplicación de un agente de abscisión, era suficiente para aumentar significativamente la eficiencia de la cosecha (Hartmond et al., 2000). Posteriormente, se manifestó que el uso de un agente de abscisión junto con un ajuste de los parámetros de vibración, fundamentalmente el tiempo y la frecuencia de vibración, permitía alcanzar altos porcentajes de desprendimiento de frutos maduros sin afectar significativamente a la temporada siguiente (Burns et al., 2006). Este resultado se confirmó sobre la base de las diferentes respuestas de frecuencia de los frutos maduros y los frutos inmaduros a la cosecha mecánica (Castro-García et al., 2017).

Los sistemas sacudidores de copa permiten una vibración continua de la fila de árboles; las varas penetran en la copa y logran un elevado desprendimiento de los frutos en las zonas donde hay contacto directo de las varas con las ramas. El uso de sacudidores de copa puede generar una mayor caída de hojas, brotes y ramas que la recolección manual. La caída de estos órganos se considera un daño al árbol, lo que podría tener consecuencias negativas en el rendimiento, la vida productiva y el coste del transporte desde la plantación hasta la industria (Spann & Danyluk, 2010). Por esta razón, la mejora de estas máquinas se ha basado en un doble objetivo: aumentar la eficacia en el derribo de los frutos maduros y reducir los daños causados a los árboles. Con el fin de mejorar el proceso de recolección mecanizada, Savary et al. (2010) desarrollaron una simulación de un sacudidor de copa basada en métodos de elementos finitos para predecir y evaluar la interacción entre el árbol y la máquina. A continuación, Savary et al. (2011) evaluaron el efecto de la vibración en la copa del árbol según la distribución de las fuerzas y aceleraciones en las ramas y los frutos. Posteriormente, las propuestas de mejora de la máquina se basaron en modelos matemáticos y pruebas de prototipos con una combinación de

parámetros de funcionamiento de la máquina como la frecuencia y la amplitud de la vibración (Gupta et al., 2015, 2016), y la configuración y el material de las ramas (Liu et al., 2018). Se ha demostrado que las varas desempeñan un papel esencial en el proceso de sacudida de los árboles, tanto en lo que respecta al desprendimiento de los frutos como a la posible generación de daños en los árboles y los frutos. Liu et al. (2018) indicaron que el material de las varas afectaba a la respuesta vibratoria de los árboles con respecto a los picos de aceleración de las ramas. Recomendaron que las varas tuvieran altos valores de rigidez, pero que su superficie fuera lisa para reducir los daños. La forma de las varas reveló que las varas flexibles en forma de arco tenían un mejor rendimiento con respecto a la eficiencia de desprendimiento de los frutos y una menor tasa de daños a los árboles que las varas de extremo libre (Pu et al., 2018). En otro intento de adaptar el proceso de vibración a las necesidades de los árboles, Pu et al (2018) diseñaron y probaron un sistema de sacudidores independientes de dos secciones para minimizar los daños a los árboles y maximizar la eficiencia de la cosecha. La adaptación de la máquina a la variabilidad de la copa de los árboles permitió reducir los daños a los árboles en comparación con otros sistemas sacudidores de copa.

Durante el proceso de recolección, las varas de la máquina penetran en el árbol, pero no suelen llegar a todas las partes de la copa, por lo que la vibración debe transmitirse a través de las ramas para desprender el fruto interior. Whitney & Wheaton (1984) indicaron que se obtenía un mayor valor de eficiencia en el desprendimiento de los frutos al cosechar árboles de copa más pequeños en lugar de más grandes. Los sistemas sacudidores de copa tienen generalmente una capacidad limitada para separar los frutos internos del árbol y, sin embargo, pueden eliminar casi todos los frutos externos. El proceso de recolección de los frutos del interior de la copa puede causar daños en las partes más externas debido a la reducción de la velocidad de avance de la máquina o al aumento del valor de la frecuencia de vibración, y también puede requerir una recolección manual adicional.

Este estudio parte de la hipótesis de que los procesos de recolección mecanizada pueden llevarse a cabo con un alto valor de eficiencia de la cosecha, en los que no es necesaria la posterior recolección manual, y que los posibles, aunque moderados, daños en el árbol no afectan a la vida productiva de la plantación. El objetivo de este trabajo es analizar la interacción de las varas sacudidoras de la copa con las ramas de los árboles a partir de los datos recogidos durante el proceso de recolección mecanizada de los cítricos. En primer lugar, se caracterizaron las ramas fructíferas con y sin contacto directo con las varas de la máquina en la posición y la producción. Luego, se monitoreó el proceso de vibración de la copa durante la recolección mecanizada. Por último, se determinaron los parámetros de vibración necesarios para desprender la fruta y se dieron recomendaciones sobre los parámetros de recolección necesarios para aumentar su eficiencia.

### 4.3 Materiales y métodos

Se realizaron ensayos de recolección mecanizada en Córdoba (España) en 2017 durante la temporada de recolección de la naranja dulce (*Citrus sinensis* L. Osbeck cv. Valencia) para la producción de zumo, durante cuatro semanas desde el final de la floración hasta antes de la caída natural de los frutos inmaduros en junio. La tabla 4.1 muestra las principales características de las cuatro plantaciones de cítricos recolectadas mecánicamente. Los árboles se habían

plantado en amplios setos de más de 0,4 m de altura y tenían grandes distancias entre las filas para permitir la maniobrabilidad de la máquina y el uso de sacudidores de copa (Fig. 4.1).

Tabla 4.1. Características de las plantaciones de cítricos cosechados mecánicamente con sistema sacudidor de copa.

	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4
Fecha plantación	2006	2005	2007	2005
Superficie (ha)	54,7	38,0	33,1	57,3
Árboles por hectárea	440	330	440	330
Distancia entre árboles (m)	7 × 3	7 × 4	7 × 3	7 × 4
Altura del seto (m)	4,0	4,0	4,3	4,4
Anchura del seto (m)	3,9	4,1	4,5	4,6



Figura 4.1. Ejemplo de una fila de árboles en seto ancho para la recolección mecanizada.

La recolección mecanizada se realizó con un sistema de sacudidor de copa lateral continuo arrastrado por tractor (Oxbo 3210, Byron, Nueva York, NY, EE.UU.), trabajando una gama de velocidades de avance de entre 1 y 1,5 km h<sup>-1</sup> (0,28-0,42 ms<sup>-1</sup>) y una frecuencia de vibración cercana a los 4,5 Hz, lo que provocaba la caída de los frutos al suelo. Se realizaron ensayos de recolección para asegurar un contacto estrecho del sistema sacudidor con la copa del árbol (Fig. 4.2). La máquina cosechó ambos lados del seto en pasadas independientes, con una capacidad de trabajo aproximada de 0,4-0,5 ha h<sup>-1</sup>. Posteriormente, los frutos que quedaban en la copa se recogían a mano junto con los frutos del suelo y se cargaban en un contenedor.

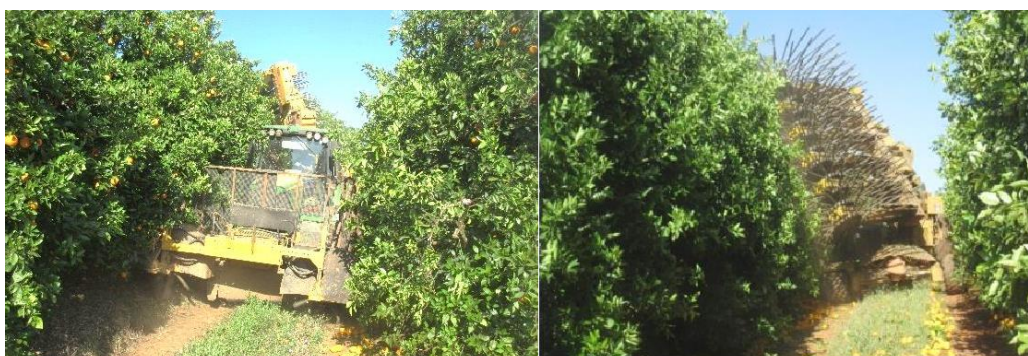


Figura 4.2. Sistema sacudidor de copa lateral continuo arrastrado por tractor (Oxbo, 3210) utilizado en los ensayos de recolección de cítricos. izquierda: Vista frontal antes del proceso de recolección; derecha: Vista posterior después del proceso de recolección.

Se estudió la interacción del sistema de recolección con la copa del árbol a cada lado del seto (Fig. 4.3). Dado que los setos de los árboles diferían entre las plantaciones, se seleccionó una sección transversal representativa de la copa del árbol. La sección transversal tenía una superficie de 4-5 m<sup>2</sup> y estaba compuesta por una distancia de la línea de los troncos al exterior de la copa de hasta 2,0-2,5 m y una altura que oscilaba entre 0,5-2,5 m. Esta sección transversal se seleccionó porque diferenciaba un área externa de la copa con contacto directo de las varas de la máquina con las ramas, para una longitud de vara de 1,4 m, y un área interna de la copa sin contacto directo con las varas. Además, la sección transversal era representativa de la copa de los árboles, con un alto rendimiento, que evitaba el efecto de las ramas más bajas y pendulares y permitía analizar el proceso de vibración en una zona homogénea de la cubierta entre las parcelas ensayadas. La sección transversal se dividió en 16-20 sectores según la anchura del seto, a intervalos de 0,5 m tanto horizontal como verticalmente. En cada sector se registraron los valores de vibración, las propiedades de las ramas y el número de frutos. El área de la copa que tuvo contacto directo con las ramas fue muestreada con 10 sectores, mientras que el área de la copa sin contacto directo fue muestreada con 6 ó 10 sectores.

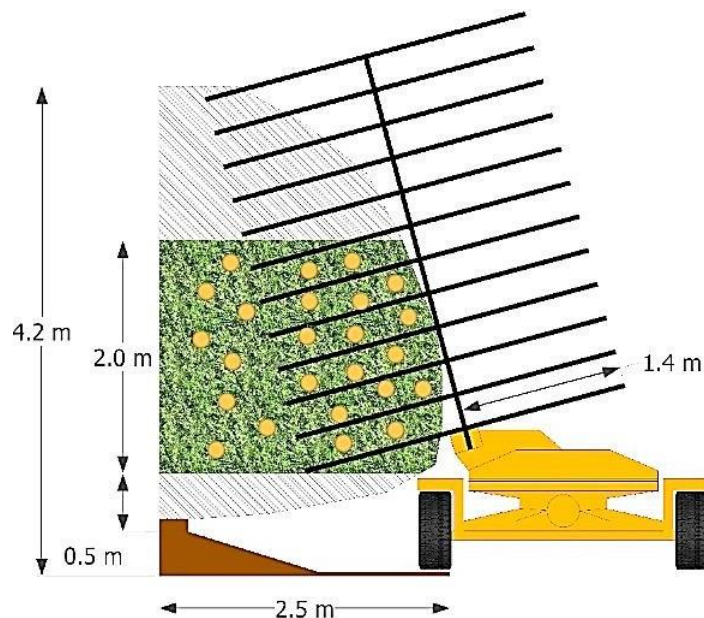


Figura 4.3. Sección transversal del seto de árboles y áreas de estudio con y sin contacto directo con las varas del sistema sacudidor de copa

Antes del proceso de recolección mecánica, se seleccionaron un total de 90 ramas fructíferas que tenían frutos maduros y se distribuyeron en diferentes sectores. El diseño estadístico estableció un muestreo aleatorio estratificado, cada conglomerado fue una parcela ensayada, y en cada parcela se seleccionaron aleatoriamente entre 18 y 24 ramas fructíferas. La muestra garantizó al menos tres mediciones en cada sector. A cada rama se le asignó un valor de posición en la sección transversal en un punto cercano al fruto que pudiera soportar un sensor de aceleración, pero que tuviera un diámetro inferior a 10 mm. La relación de desprendimiento de frutos se determinó por el número de frutos retirados de cada rama antes y después del proceso de recolección. Las mediciones de la vibración de las ramas se registraron con un sensor acelerómetro triaxial MEMS (Gulf Coast Data Concepts LLC X200-4, Waveland, MS, EE. UU.) con un rango de medición de 2000 ms<sup>-2</sup>, una resolución de 16 bits, una sensibilidad de 0,06 ms<sup>-2</sup> y una frecuencia de muestreo de 400 Hz. La figura 4.4 muestra la colocación del sensor en la rama fructífera.



Figura 4.4. Ubicación del sensor de aceleración en una rama fructífera en la parte más externa de la copa.

El análisis de las señales de aceleración en el dominio del tiempo y el análisis estadístico se realizó utilizando el software libre R (R Core Team, 2016) y en el dominio de la frecuencia utilizando el software NV Gate v8.0, con una Transformada Rápida de Fourier con 401 líneas en un rango de frecuencia de 0-156,2 Hz. En el dominio del tiempo, el valor de aceleración resultante ( $A_r$ ) se determinó como el módulo de la suma vectorial de los tres ejes de medición en cada sensor. La figura 4.5 muestra una muestra de  $A_r$  en una rama fructífera.

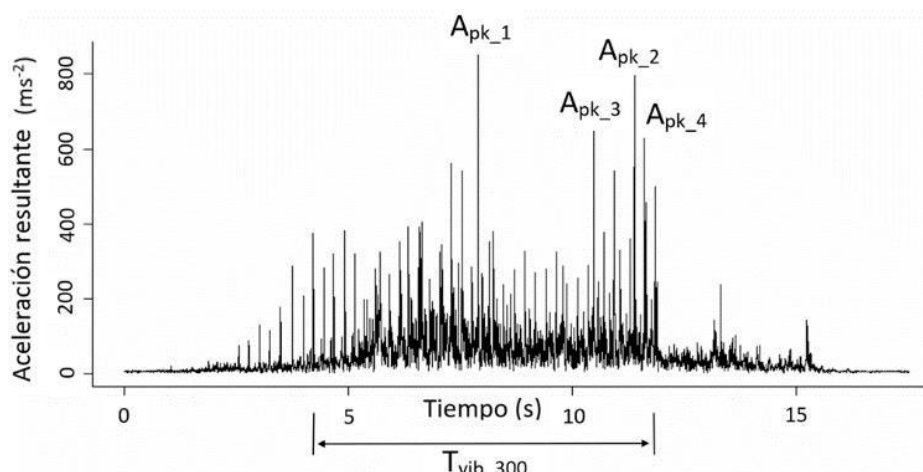


Figura 4.5. Ejemplo de aceleración resultante ( $A_r$ ) en el dominio del tiempo medido en las ramas fructíferas.  $T_{vib\_300}$ : tiempo transcurrido entre el primer y el último evento con un valor de  $A_r$  de  $300 \text{ ms}^{-2}$ .  $A_{pk\_n}$ : número de valores pico máximos de  $A_r$ .

En el dominio del tiempo, las variables de vibración estudiadas fueron:

- Tiempo de vibración ( $T_{vib}$ ): tiempo (s) que transcurre entre el primer y el último valor de  $A_r$  medido en la rama, en el rango de  $A_r$  de  $20 \text{ ms}^{-2}$  hasta los  $600 \text{ ms}^{-2}$ .
- Aceleración máxima media ( $A_{pk}$ ): el valor medio de los 10 valores máximos de pico de  $A_r$  ( $\text{ms}^{-2}$ ) para  $T_{vib\_20}$ .

En el dominio de la frecuencia, las variables de vibración estudiadas fueron:

- Frecuencia: número de ciclos por segundo (Hz) de movimiento de las varas en la copa.
- Aceleración RMS ( $A_{RMS}$ ): suma vectorial de los valores cuadráticos medios (RMS) de cada eje del acelerómetro a la frecuencia de vibración.

El análisis estadístico se centró en la predicción de la relación de desprendimiento de frutos según las variables de vibración y las mediciones de las ramas como parámetros previstos. Se utilizó una regresión logística con un método de validación cruzada K = 2 particiones.

#### 4.4 Resultados y discusión

La mayor parte de los frutos (72,7%) se encontraban en la zona de la copa que estaba en contacto directo con las varas, en un rango de altura de 1-2 m desde el suelo, y en un rango de 0,5-2 m desde el tronco. Gupta et al. (2015) afirmaron que la zona de mayor fructificación se encuentra en las ramas primarias de la zona intermedia de la copa a una altura de 1,14-2,29 m, y a una distancia de 0,78-0,83 m del exterior de esta. Sin embargo, la distribución de los frutos en la copa también depende de las distancias de plantación y de la altura del árbol. Una distancia reducida entre los árboles puede generar un mayor porcentaje de frutos en las partes superiores de la copa, pero puede reducir el número de frutos en el interior (Whitney & Wheaton, 1984).

El diámetro de la rama en el punto de medición de la vibración fue de  $7,9 \pm 2,4$  mm (media  $\pm$  desviación estándar), con una variación que osciló entre 10,2 mm para las ramas más cercanas al tronco y al suelo y 5,53 mm para las ramas más exteriores y superiores. Cada rama ensayada tenía un valor medio de  $3,7 \pm 1,8$  frutos. Los resultados mostraron una gran variabilidad en la distribución de los frutos en la copa y en la morfología de las ramas. Esta variabilidad es importante para el resultado de los sistemas de recolección mecanizada y fue considerada por Gupta et al. (2015, 2016) para modelar el árbol y simular el proceso de recolección a fin de mejorar el sistema sacudidor de copa. Sin embargo, los actuales sistemas de recolección basados en los sacudidores de copa no contemplan la variabilidad de las ramas y los frutos dentro de la copa del árbol. Pu et al. (2018) demostraron la necesidad de utilizar diferentes parámetros de recolección y fueron capaces de lograr un alto índice de desprendimiento de los frutos (82,6%) con un bajo daño al árbol.

Los sistemas sacudidores de copa cosechan continuamente los frutos a medida que se desplazan a lo largo de la fila de árboles. Antes de que la máquina entre en contacto con una rama, ésta puede vibrar debido al contacto con otras ramas o a la transmisión de la vibración a través del tronco. Posteriormente, la rama vibra debido al contacto con las varas de la máquina, y finalmente, la rama vibra libremente cuando la máquina ha pasado. La tabla 4.2 muestra los resultados de este proceso de vibración medido en las ramas, tanto en la zona de la copa con y sin contacto directo con las varas de la máquina. Para definir el comienzo y el final del proceso de vibración, se registraron los valores de aceleración producidos sólo por fuentes naturales, principalmente por el viento y la gravedad, y sin interacción de la máquina. El tiempo de vibración en el que la rama fue excitada por la máquina se definió como el tiempo transcurrido entre los valores de aceleración resultantes superiores a  $18 \text{ ms}^{-2}$  ( $T_{\text{vib}_18}$ ).

Tabla 4.2. Parámetros de vibración medidos en las ramas con y sin contacto directo con las varas durante la recolección mecanizada con sacudidor de copa.

	Ramas con contacto directo de las varas	Ramas sin contacto directo de las ramas	Valor medio
Tiempo de vibrado (s)	$14.8 \pm 2.8$ a	$13.8 \pm 2.9$ a	$14.3 \pm 2.8$
Frecuencia (Hz)	$4.1 \pm 0.2$ a	$4.0 \pm 0.3$ a	$4.1 \pm 0.5$
$A_{\text{RMS}}$ ( $\text{ms}^{-2}$ )	$29.6 \pm 10.2$ a	$12.8 \pm 6.4$ b	$26.5 \pm 13.6$
$A_{\text{pk}}$ ( $\text{ms}^{-2}$ )	$616.7 \pm 283.3$ a	$268.1 \pm 164.6$ b	$495.1 \pm 270.9$

Derribo del fruto (%)	84.7 ± 30.5 a	25.1 ± 22.2 b	69.1 ± 40.7
-----------------------	---------------	---------------	-------------

Los valores mostrados son la media y la desviación estándar, n = 90. Las mismas letras en la misma fila no son significativamente diferentes (t de Student, p < 0,05; test de Wilcoxon-Mann-Whitney, p < 0,05).

El tiempo medio de vibración ( $T_{vib,18}$ ) de las ramas fue de  $14,3 \pm 2,8$  s. No se encontraron diferencias significativas (t de Student, p > 0,05) entre el tiempo de vibración de las ramas situadas en la zona de la copa con o sin contacto directo con las varas. Esto indica que todas las ramas vibran al mismo tiempo, pero no todas al mismo nivel de aceleración. La longitud del sistema de sacudidas de la máquina, es decir, la longitud de las varas y los tambores, junto con la velocidad de avance de la máquina, determinaban el tiempo de vibración durante el cual las varas tenían contacto directo con las ramas, mientras que la formación de los árboles y la densidad de la cubierta vegetal podían definir el tiempo de vibración durante el cual la rama vibraba sin contacto directo con las varas. En las condiciones de ensayos sobre la parcela, es decir, una longitud de vara de 1,4 m y una velocidad de avance que oscilaba entre 1 y 1,5 km h<sup>-1</sup> (0,28 y 0,42 ms<sup>-1</sup>), los sistemas sacudidores de copa pudieron mantener el contacto directo con las ramas dentro del rango de 7,7 a 11,5 s. Esto indicó que entre el 20% y el 46% del tiempo de vibración puede corresponder a la transmisión de la vibración antes y después del paso de la máquina.

Durante el proceso de recolección, las ramas en contacto con las varas experimentaron un proceso de vibración forzada. Las varas, accionadas con un movimiento alternativo y giratorio, penetraron en la copa, produciendo una excitación por impulsos en las ramas fructíferas de la parte más externa de la copa (Castro-Garcia et al., 2018). Las ramas mostraron un valor medio de frecuencia de vibración de  $4,1 \pm 0,5$  Hz. El valor de la frecuencia de vibración no se correlacionó con la posición de la rama en la copa (Pearson = 0,135, p > 0,05). El valor de frecuencia utilizado estaba dentro del rango recomendado para el desprendimiento de cítricos con sacudidores de copa. Liu et al. (2018) establecieron que el valor de 5 Hz era apropiado para el desprendimiento de los frutos sin aumentar los daños causados al árbol. De manera similar, se demostró que un valor de frecuencia de 4,8 Hz era adecuado para producir una alta aceleración en las ramas cuando se utilizaban varas rígidas (Pu et al., 2018). La frecuencia de la vibración en combinación con el diseño de las varas utilizadas y el estado de los frutos inmaduros (Burns et al., 2006) juegan un papel importante en el daño causado a los árboles. Aunque los daños en los árboles son un elemento importante en el proceso de mejora de la recolección mecanizada, no se han considerado en este estudio porque los daños que se produjeron fueron menores y similares a los de años anteriores. Las plantaciones recolectadas mecánicamente no habían mostrado ningún problema en el desarrollo o el rendimiento de los árboles en comparación con las campañas anteriores.

Los valores de  $A_{RMS}$  medidos en las ramas se relacionaron positivamente con el porcentaje de desprendimiento de frutos. La vibración de las ramas se caracterizó por un valor de  $A_{RMS}$  de  $26,5 \pm 13,6$  ms<sup>-2</sup> para la frecuencia de vibración de la máquina. Sin embargo, hubo una variación significativa en los valores medios de  $A_{RMS}$  en las ramas según su posición en la copa (Fig. 4.6). Las ramas con contacto directo con las varas mostraron un valor medio de  $A_{RMS}$  significativamente más alto ( $29,6 \pm 10,2$  ms<sup>-2</sup>) (t de Student, p < 0,05; Wilcoxon-Mann-Whitney, p < 0,05) que las ramas sin contacto directo ( $12,8 \pm 6,4$  ms<sup>-2</sup>). Pu et. al (2018) mostraron que los valores más altos de aceleración en las ramas ( $31,4$  ms<sup>-2</sup>) fueron proporcionados por el contacto con las varas de la máquina y estas ramas alcanzaron los valores más altos de eficiencia en el desprendimiento de los frutos.

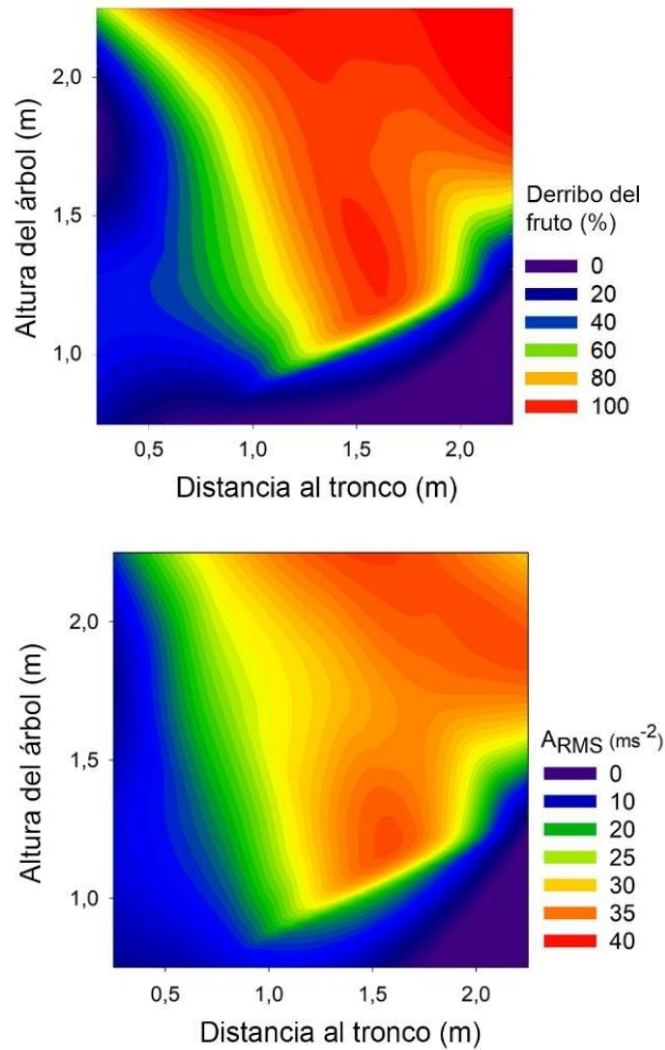


Figura 4.6. Derribo del fruto producido con el sistema sacudidor de copa medido en ramas fructíferas en la sección transversal de la copa del árbol (arriba); Distribución de los valores  $A_{RMS}$  (abajo).

Durante el proceso de recolección, la aceleración producida en la rama se transmitió a los frutos para su desprendimiento. Las ramas internas, sin contacto directo con las varas, mostraron el 43% del nivel de vibración  $A_{RMS}$  de las ramas externas. Un resultado similar fue alcanzado por Liu et al. (2018), cuyos resultados mostraron una reducción de la aceleración en las ramas internas de la copa del 42% con respecto a las ramas externas. En ensayos de campo con mediciones en el interior del fruto antes de su desprendimiento con sistemas sacudidores de copa, Castro-García et al. (2018) registraron valores medios de  $A_{RMS}$  entre 38,8 y 51,3  $ms^{-2}$ . Estos valores indicaban que había una amplificación de los valores de aceleración desde la rama hasta el fruto. Savary et al. (2010) evaluaron la aceleración producida en las ramas e indicaron que los valores de aceleración resultantes eran mayores en los extremos de las ramas, especialmente en las ramas más delgadas y exteriores. Estos mismos autores señalaron que la región del tronco de los árboles no ramificados tenía valores de aceleración muy bajos, mientras que los valores de aceleración empezaban a ser notablemente más altos desde la primera rama de la región del tronco.

La interacción de las varas con las ramas se caracterizó por una sucesión de impactos con un alto valor de aceleración de acuerdo con la frecuencia de vibración de la máquina. Estos



impactos presentaron un valor medio de  $A_{pk}$  de  $495,1 \pm 270,9 \text{ ms}^{-2}$ . De forma similar a la figura 4.6, los valores de  $A_{pk}$  en las ramas con contacto directo con las varas ( $616,7 \pm 283,3 \text{ ms}^{-2}$ ) fueron mayores (t de Student,  $p < 0,05$ ) que las ramas sin contacto directo ( $268,1 \pm 164,6 \text{ ms}^{-2}$ ). Los valores de  $A_{pk}$  y  $A_{RMS}$  mostraron una correlación lineal positiva (Pearson = 0,70,  $p < 0,05$ ) con la altura en la copa. En ambos casos, el contacto directo de la vara representó un incremento de 2,3 veces los valores de aceleración alcanzados en la rama.

El sistema sacudidor de copa alcanzó un valor medio de desprendimiento de frutos de  $69,1 \pm 40,7\%$ . Sin embargo, esta variable presentó una gran variabilidad dentro de la sección transversal del seto del árbol (Fig. 4.6). Como era de esperar, esta variable alcanzó sus valores más altos en las ramas con contacto directo con las varas. La relación de desprendimiento de frutos se redujo de un valor medio de  $84,7 \pm 30,5\%$  en las ramas con contacto directo con las varas a  $25,1 \pm 22,2\%$  en las ramas sin contacto directo. El valor de desprendimiento de frutos del 100% se alcanzó en todas las ramas situadas entre 2 y 2,5 m de altura. Un resultado similar fue reportado por Whitney (1999) quienes encontraron que trabajando con pequeñas copas accesibles a las varas se logró un desprendimiento de frutos de 96%, mientras que las copas más amplias lograron valores reducidos de 55%. Savary et al. (2011) alcanzaron un valor de desprendimiento de frutos del 88% en el exterior de la copa, mientras que en el interior esta cifra se redujo al 57%. Sin embargo, para mejorar la eficiencia de la recolección, no sólo es necesario que la vara penetre en la copa, sino también que interactúe con la rama. Liu et al. (2018), analizando el desprendimiento de los frutos según el punto de contacto de la vara con la rama, determinaron que la operación era más eficaz cuando la vara impactaba en el 30% de la distancia al extremo libre de la rama.

Los resultados obtenidos de la sección transversal de la copa del árbol han mostrado una gran variabilidad, tanto en las vibraciones como en los valores de los frutos. La reducción de esta variabilidad y la mejora del proceso de recolección mecanizada requieren el conocimiento de los requisitos para separar los frutos del árbol. Las mediciones en la copa mostraron una alta correlación lineal entre las variables, lo que indicaba que la predicción del desprendimiento de frutos no podía tener una solución única. El análisis de los datos se centró en la discretización de las variables cuantitativas que podían discriminar si había un desprendimiento de frutos con un valor del 100% y un éxito razonable. Debido a su simplicidad y eficiencia, se utilizó la regresión logística. Los  $A_{RMS}$  y el tiempo transcurrido entre una aceleración superior a  $300 \text{ ms}^{-2}$  ( $T_{vib\_300}$ ) fueron variables significativas para discriminar los eventos de desprendimiento de frutos del 100%. El resultado se definió como una línea recta que separa las condiciones en las que se obtuvo un desprendimiento del 100% con una precisión medida como el área bajo la curva ROC de 0,95 en el conjunto de validación. La ecuación (1) muestra los valores obtenidos y la figura 4.7 es su representación gráfica.

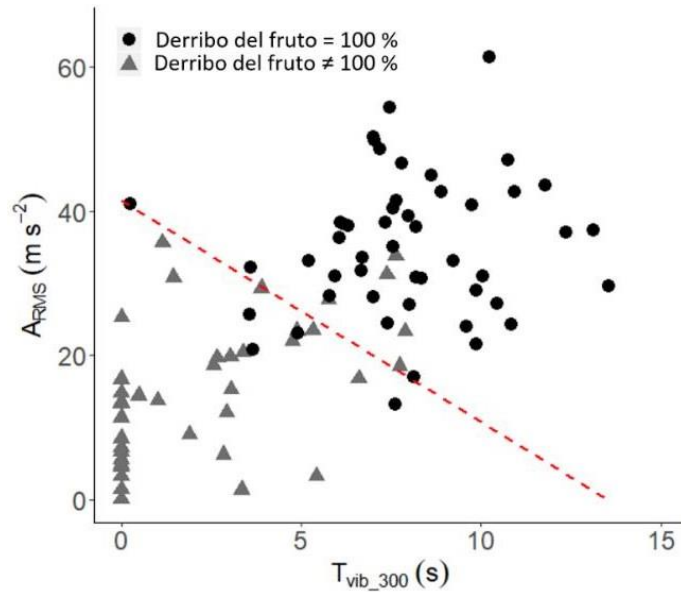


Figura 4.7. Distribución de valores del porcentaje de derribo de los frutos según  $A_{RMS}$  ( $m s^{-2}$ ) y  $T_{vib\_300}$  (s).

$$\left(\frac{\text{Probabilidad}}{1-\text{Probabilidad}}\right) = 7.13417 - 0.52754 \cdot T_{vib\_300} - 0.17206 \cdot A_{RMS} \quad (1)$$

En la actualidad, los sistemas sacudidores de copa para la recolección de cítricos pueden emplear varios tipos de sistemas de vibración, con variaciones en la frecuencia o la amplitud del movimiento, diferentes velocidades de avance de las máquinas o varas con diferentes diseños o propiedades mecánicas. En todos los casos, la máquina produce una vibración forzada de las ramas con el fin de desprender los frutos y evitar daños importantes al árbol o a la fruta. El seguimiento del proceso de vibración forzada de la copa del árbol demostró que era posible lograr un índice de desprendimiento de frutos del 100%, basado en una combinación de niveles de aceleración y tiempos de vibración en las ramas (Fig. 4.7). En las condiciones de las pruebas de campo realizadas, proponemos una combinación de un tiempo de vibración de al menos 5,8 s, después de la interacción de la vara con la rama ( $T_{vib\_300}$ ), junto con un valor de  $A_{RMS}$  de 23,9  $ms^{-2}$ . Con estos parámetros de cosecha, se logró un proceso completo de desprendimiento de frutos en el 88,9% de las ramas ensayadas. Aunque estos valores podrían modificarse si se considerara otro tipo de formación del árbol, variedad de cítricos o máquina de recolección, el proceso de desprendimiento de frutos puede estimarse por el tiempo de vibración y la aceleración de la rama. Ambos parámetros son de gran importancia, no sólo para la formación de los árboles para facilitar la penetración de las varas en la copa, sino también para el diseño de nuevos sistemas sacudidores de copa.

#### 4.5 Conclusiones

La monitorización del proceso de vibración en el árbol durante la recolección mecanizada con el sacudidor de copa mostró una gran variabilidad en los resultados dependiendo de las diferentes partes de esta. Las ramas que tuvieron contacto directo con las aras de la máquina mostraron un valor medio más alto del índice de desprendimiento de frutos (84,7%) que las ramas sin contacto (25,1%). La transmisión de la vibración de las ramas externas a las internas en la copa no fue efectiva para eliminar los frutos internos. Durante el proceso de recolección, se pudieron alcanzar valores del 100% de desprendimiento de los frutos con una combinación

de parámetros de recolección. Es posible lograr un proceso completo del desprendimiento de los frutos si tanto la copa del árbol como la maquinaria se ajustan mutuamente para facilitar el contacto del sistema de sacudida y el tiempo de vibración necesario.

# Capítulo 5

## Patrón de abscisión de naranja variedad "Valencia" con sistema sacudidor de copa\*

---

\* Basado en: Aragon-Rodriguez, F., Castro-Garcia, S., Sola-Guirado, R. R., & Gil-Ribes, J.A. (2019). Fruit abscission pattern of 'Valencia' orange with canopy shaker system. *Scientia Horticulturae*, 246, 916-920. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.087>

## 5.1 Resumen/Abstract

El desprendimiento de los frutos puede ocurrir por causas naturales o realizarse mecánicamente por una combinación de tensiones mecánicas que causan la ruptura de los tejidos de la planta. Las zonas de abscisión (AZ) son muy importantes en la recolección de cítricos, tanto en lo que respecta al mercado de destino como a los posibles daños causados al árbol o al fruto. El objetivo de este estudio es determinar el patrón de abscisión de las naranjas dulces (variedad 'Valencia') con un sacudidor de copa y compararlo con otros sistemas de desprendimiento. Se ensayaron cinco plantaciones de naranjas variedad 'Valencia' durante las campañas 2017 y 2018, utilizando un sacudidor de copa lateral arrastrado por un tractor. El diámetro, peso y tipo de rotura de los frutos se evaluó en los casos de caída natural, recolección manual, recolección mecanizada mediante sacudidor de copa y ensayo a tracción. El tipo de rotura AZ-C predominó en la caída natural (89,0%) y en la recolección manual (79,5%). De forma similar, el tipo AZ-A predominó para el sacudidor de copa (58,8%) y el ensayo a tracción (45,3%). Los esfuerzos mecánicos sobre el fruto produjeron el desgarro de la cáscara al romper el flavedo, alcanzando su mayor frecuencia en la recolección manual (7,6%). La rotura por desgarro de la cáscara requirió un valor medio de la fuerza de desprendimiento del fruto de 99,3 N, superior a los valores medios de AZ-C (88,7 N) y AZ-A (66,6 N). Los frutos que permanecieron en el árbol después de la recolección con el sacudidor de copa mostraron valores medios de fuerza de desprendimiento de los frutos más bajos (16,3%) que los frutos antes de la recolección. La frecuencia de frutos con cáliz cosechados con el sacudidor de copa y de forma manual fue similar, con un valor medio del 36%.

*Fruit detachment can occur due to natural causes or be mechanically performed by a combination of mechanical stresses that cause tissue breakage in the plant. Forced abscission should not coincide with natural abscission zones (AZ). Abscission zones are very important in citrus harvesting both in terms of the destination market and of the possible damage caused to the tree or fruit. The objective of this study is to determine the abscission pattern of sweet oranges with a canopy shaker and compare it with other detachment systems. Five plots of Valencia oranges were tested during the 2017 and 2018 harvesting seasons, using a commercial tractor-drawn canopy shaker. The diameter, weight and breakage type were evaluated in the cases of natural fall, snap method, mechanical harvesting with canopy shaker, and pull test. Breakage type AZ-C predominated in natural fall (89.0%) and the snap method (79.5%). Similarly, AZ-A predominated for the canopy shaker (58.8%) and pull test (45.3%). Mechanical action on the fruit produced peel tear by breaking the flavedo, which reached highest frequency in the snap method (7.6%). Peel tear breakage required a mean fruit detachment force value of 99.3 N, higher than the average abscission values for AZ-C (88.7 N) and AZ-A (66.6 N). The fruit that remained on the tree after canopy shaker harvesting showed lower mean values of fruit detachment force (16.3%) than the preharvest fruit. The frequency of fruit with calyx with the canopy shaker and snap methods was similar, with a mean value of 36%.*

## 5.2 Introducción

El desprendimiento de frutos puede producirse por causas naturales o por la acción de un agente externo. El proceso natural de abscisión del fruto es una estrategia de la planta para desechar los frutos maduros o dañados, así como para dispersar las semillas. La cosecha de los

cítricos tiene lugar durante la fase de maduración del fruto, antes de que se produzca la caída natural (Ladaniya, 2008). Se emplean diferentes métodos manuales y mecanizados para separar el fruto del árbol. Para el mercado de productos frescos, el método más utilizado es el corte manual: el fruto se corta por su pedúnculo y se mantiene su cáliz. Cuando se destina a industria, la fruta se desprende retorciendo el tallo y tirando de ella (Ladaniya, 2008). Actualmente se utilizan sistemas de recolección mecanizada para la fruta destinada a industria, empleando principalmente vibradores de troncos (Torregrosa et al., 2009) y sacudidores de copa (Peterson, 1998). Ambas tecnologías realizan una vibración forzada, que se transmite al fruto y provoca el desprendimiento de este (Castro-García et al., 2017). Los sacudidores de copa son los sistemas comerciales más desarrollados y empleados, que permiten un trabajo continuo y alcanzan altos valores de eficiencia en el desprendimiento de la fruta (> 90%) si la plantación está adaptada y el operador está capacitado (Roka et al., 2014).

En todos estos métodos, la fuerza de desprendimiento del fruto (FDF), junto con otros parámetros como la firmeza y los sólidos solubles, son parámetros de gran interés utilizados para evaluar los agentes de abscisión, los reguladores del crecimiento de las plantas o la nutrición y la planificación de las cosechas. La FDF se determina con otro método de cosecha, la prueba a tracción. Aunque se trata de un método que sirve para predecir la eficiencia de la recolección mecanizada, la forma en que se produce la extracción de los frutos mecánicamente es ligeramente diferente a la forma en que se realiza el método de la prueba a tracción (Liu et al., 2017). Por lo tanto, sería aconsejable estudiar con mayor profundidad las diferencias entre FDF con la prueba a tracción y con estos métodos de recolección.

La elección de un método de recolección está condicionada por factores como la tecnología disponible, el tipo de disposición de la plantación y el coste o la disponibilidad de la mano de obra. Sin embargo, la calidad de los frutos cosechados es uno de los parámetros más importantes y está muy relacionada con el sector al que se destina. El mercado de productos frescos requiere que la piel y el interior de la fruta no estén dañados y que el cáliz esté intacto, para conservar sus propiedades organolépticas y de protección ante patógenos. Sin embargo, los cítricos destinados al procesamiento industrial permiten ciertos tipos de daños externos (Moreno et al., 2015).

Los cítricos tienen dos zonas principales de abscisión natural (AZ): AZ-A, situada entre el pedúnculo y la rama, y AZ-C, situada entre el cáliz y el fruto. La AZ-A predomina durante el desarrollo de los frutales inmaduros. Después de este tiempo, la AZ-C se convierte en la zona predominante (Goren, 1993). Sin embargo, cuando se fuerza la abscisión para la recolección, se aplica una combinación de esfuerzos mecánicos, normalmente para romper algunos tejidos de la planta. En este caso, las zonas de abscisión forzada pueden o no coincidir con la AZ natural.

La forma en que se produce la abscisión forzada del fruto es importante para el árbol, para el fruto y para su posterior manejo. El sistema de recolección mecanizada empleado puede afectar a la producción del año siguiente cuando el fruto desprendido mantiene parte de las ramas. Roka et al. (2005) mostraron reducciones de la producción de entre el 20% y el 50%, dependiendo de la regulación de la recolección mecanizada. La abscisión de la fruta con o sin el cáliz es básica para la conservación enfocada en el mercado de productos frescos.

El objetivo de este trabajo fue determinar el patrón de abscisión de la naranja dulce con recolección mecanizada empleando el sistema sacudidor de copa en comparación con otros métodos de desprendimiento de frutos. La evaluación del patrón de abscisión puede contribuir al desarrollo de la maquinaria utilizada para la cosecha mecanizada de este cultivo, al desarrollo

y la gestión de productos que favorezcan la abscisión y a determinar si es factible que la fruta cosechada se destine al mercado de productos frescos o al procesamiento industrial.

### 5.3 Materiales y métodos

Se estudiaron los patrones de abscisión de los frutos para los siguientes métodos de desprendimiento: caída natural, método manual, sacudidor de copa y prueba a tracción. Los frutos evaluados de la caída natural se recogieron del suelo durante los períodos de cosecha y no tenían ningún daño externo visible. Los frutos evaluados por el método manual fueron recolectados por los operarios agrícolas. La recolección mecanizada de la fruta se realizó con un sistema de sacudidor de copa lateral continuo, tirado por un tractor (Grupo Ploeger Oxbo; Oxbo 3210, Nueva York, EE. UU.), con 288 varas de metal de 1,4 m de longitud con extremo libre con una velocidad de avance en el rango de 1-1,25 km h<sup>-1</sup> y a una frecuencia de 4,5 a 5 Hz (Fig. 5.1).



Figura 5.1. Recolección mecanizada de cítricos con un sistema sacudidor de copa lateral continuo (Oxbo, 3210) arrastrado por un tractor.

El fruto evaluado con la prueba a tracción (Mecmesin; Dinamómetro CFG+200, Slinfold, Reino Unido), se desprendió aplicando una fuerza de tracción creciente y continua sobre el fruto cerca del cáliz en la dirección principal de la rama hasta su desprendimiento (Fig. 5.2).



Figura 5.2. Medición de la fuerza de desprendimiento de las naranjas con mediante la prueba a tracción.

Las pruebas se llevaron a cabo en el sur de España (Córdoba) en 5 parcelas de naranjas dulces comerciales (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck cv. Valencia) durante las temporadas de recolección de 2017 y 2018 en cuatro fechas distribuidas a lo largo de cada campaña de recolección (Tabla 5.1), después de la floración y antes de la caída natural de los frutos inmaduros. Los árboles se formaron en forma de V con tres o más ramas principales, en un seto amplio para la recolección mecanizada con un sacudidor de copa lateral. En la tabla 5.1 se muestran los datos de los frutos evaluados y las parcelas ensayadas.

Tabla 5.1. Características de las plantaciones de cítricos ensayadas

	Campaña de recolección							
	Mayo 2017				Mayo-Junio 2018			
Día	9	16	23	31	8	16	23	1
Parcela	1	2	3	3	3	4	4	5
Año de plantación	2007	2006	2005	2005	2005	2006	2006	2006
Superficie (ha)	33,1	54,7	38,0	38,0	38,0	57,3	57,3	29,0
Distancia entre filas (m)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,5	7,5	7,0
Distancia entre árboles (m)	3,0	3,0	3,8	3,0	3,8	3,0	3,0	3,0
Altura árboles (m)	3,8	3,5	4,3	4,2	3,5	3,4	3,9	3,6
Anchura árboles (m)	3,7	3,7	4,2	4,5	3,7	4,0	3,4	3,6

El patrón de abscisión de los frutos se evaluó para 2540 frutos (1034 y 1506 para las temporadas 2017 y 2018, respectivamente). La fruta ensayada mostró un peso medio de 182,4 g (Grupo Gram; GRAM SPX, Barcelona, España), un porcentaje de zumo de 54,9%, un diámetro ecuatorial de 70,0 mm (Mitutoyo; Absolute CD 20 DCX, Takatsu-ku, Prefectura de Kanagawa, Japón), una tasa de sólidos solubles de 11,32° Brix (Hanna Instruments S.R.L.; Refractómetro HI96800, Rhode Island, EE.UU.) y una acidez de 0,83 (Hanna Instruments S.R.L.; Acidez titulable de zumo de frutas HI84532, Rhode Island, EE.UU.). La clasificación de la AZ se realizó para cada fruto según los siguientes grupos (Fig. 5.3):

- Desgarro del flavedo: se rompe con una porción de flavedo.



- AZ-C: ruptura entre pedúnculo y fruto, con disco floral. Este grupo se dividió en dos categorías: frutos con y sin cáliz.
- AZ-A: rotura en otra parte del tallo. Este grupo se dividió en dos categorías: rotura en el pedúnculo o rotura en cualquier parte de la rama.

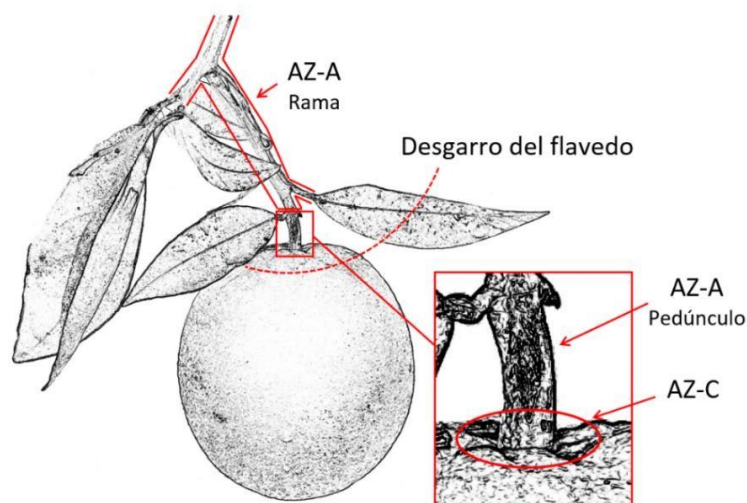


Figura 5.3. Esquema de las zonas de abscisión de los cítricos (AZ) con diferentes métodos de separación.

El diseño estadístico establecido fue un muestreo por conglomerados en dos etapas, en el que cada fila fue un conglomerado y siendo muestreada al azar, excluyendo el primer y el último árbol de la fila para evitar el efecto de borde. El software utilizado para el análisis estadístico fue IBM SPSS Statistics 25 (International Business Machines Corporation; SPSS Statistics 25, Nueva York, EE. UU.).

La evaluación de la prueba a tracción se realizó en la zona cosechable de la copa con 11 muestras para cada temporada de recolección (2017 y 2018). Cada muestra incluía 45 frutos antes de la recolección mecanizada y 45 frutos después de la recolección mecanizada de los frutos que quedaban en el árbol, de forma aleatoria.

## 5.4 Resultados

Los frutos presentaron un ligero aumento lineal del peso medio a lo largo de la campaña de recolección en las dos temporadas de cosecha y en las cinco parcelas de ensayo (temporada 2017: Pearson=0,344,  $p < 0,01$ ,  $n=777$ ; temporada 2018: Pearson = 0,145,  $p < 0,01$ ,  $n = 1217$ ). Además, había una relación lineal positiva significativa entre el peso del fruto y el diámetro ecuatorial ( $R^2=0,732$ ,  $n=1993$ ). Los valores medios del peso y el diámetro del fruto no mostraron diferencias significativas con respecto al método de desprendimiento utilizado (ANOVA,  $F=1,02$ ,  $p > 0,05$ ,  $n=2540$ ). Los valores medios de FDF a lo largo de la temporada de recolección, alcanzados principalmente en mayo, mostraron una alta variabilidad, pero no hubo diferencias significativas con respecto al período de cosecha (ANOVA,  $p > 0,05$ ). En ambas temporadas, a medida que la fecha avanzaba hubo una ligera reducción lineal de los valores de FDF (temporada 2017: Pearson = -0,138,  $p < 0,05$ ,  $n=276$ ; temporada 2018: Pearson = -0,186  $p < 0,05$ ,  $n=173$ ) y un aumento en el diámetro del fruto (temporada 2017: Pearson = 0,227,  $p < 0,01$ ,  $n=276$ ; temporada 2018: Pearson=0,229,  $p < 0,01$ ,  $n=173$ ).

La figura 5.4 muestra los patrones de abscisión según el método de desprendimiento del fruto. La rotura por el desgarro del flavedo fue mayor con el método manual (7,6%) (prueba post hoc de Tukey,  $p < 0,05$ ) que con el sacudidor de copa (1%) o la caída natural (0,4%) (prueba post hoc de Tukey,  $p > 0,05$ ). Sin embargo, los patrones de abscisión de AZ-C y AZ-A mostraron una tendencia opuesta dependiendo del método de desprendimiento utilizado. AZ-C fue mayor en la caída natural (89,0%) y con el método manual (79,5%). Estos métodos de desprendimiento mostraron diferencias significativas en los valores medios de la fruta para el AZ-C en comparación con el sacudidor de copa (58,8%) y la prueba a tracción (45,3%) (prueba post-hoc de Tukey,  $p < 0,05$ ). Por el contrario, el AZ-A fue más elevado con la prueba a tracción (51,8%) y el sacudidor de copa (40,2%), y el valor medio disminuyó significativamente para el método manual (12,9%) y la caída natural (10,6%) (prueba post-hoc de Tukey,  $p < 0,05$ ). Utilizando el método manual, hubo un aumento en el porcentaje de frutos con desgarro por la cáscara (de 0,4-7,6%) y abscisión AZ-A (de 10,6-12,9%) en comparación con la caída natural. El sacudidor de copa incremento 3,1 veces la proporción de frutos con abscisión AZ-A en comparación con el método manual.

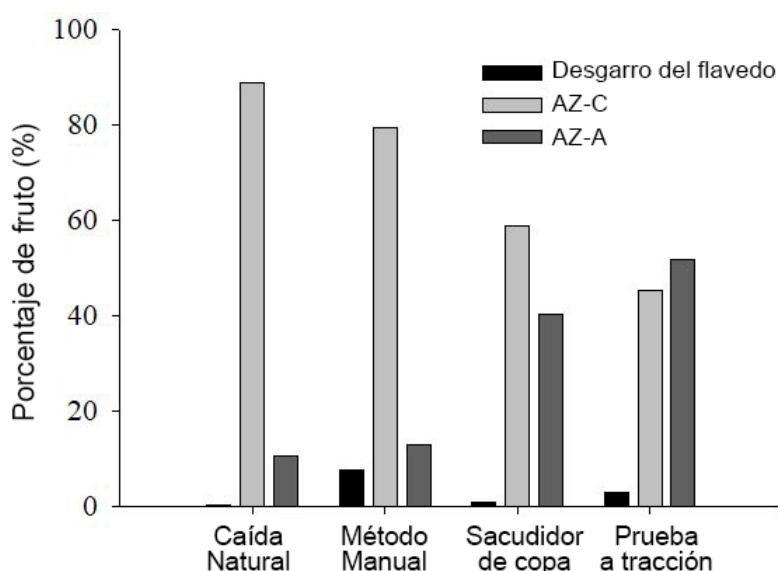


Figura 5.4. Esquema de las zonas de abscisión de los cítricos (AZ) con diferentes métodos de recolección.

El porcentaje de frutos con abscisión en AZ-C con cáliz fue mayor con el sacudidor de copa (41,6%) y el método manual (30,2%) que con la prueba a tracción (15,5%) o la caída natural (7,3%) (prueba post-hoc de Tukey,  $p < 0,05$ ). El porcentaje de frutos con abscisión en AZ-A por el pedúnculo fue muy bajo, con 0,7% para la caída natural, 0,9% para el método manual, 3,4% para la prueba a tracción y 6,1% para el sacudidor de copa.

La fruta mostró diferencias significativas en el FDF para el desprendimiento de la fruta según AZ (Fig. 5.5, Antes). El desgarro de la cáscara por rotura del flavedo requirió un FDF medio de 99,3 N, más alto que para una rotura AZ-C (88,7 N) y una rotura AZ-A (66,6 N; prueba post-hoc de Tukey,  $p < 0,05$ ). En los frutos con abscisión AZ-C, se encontró una correlación lineal entre la FDF y el diámetro del fruto (Pearson=0,401,  $p < 0,01$ ,  $n=991$ ): el 33% de este fruto se desprendió con el cáliz, con valores de FDF más altos y significativos (94,0 N) (t-Student,  $t=7,087$ ,

$p < 0,01$ ) que para los frutos sin cáliz (78,8 N). La ruptura del pedúnculo en AZ-A requirió un FDF más alto (81,8 N) que con la rama (65,5 N).

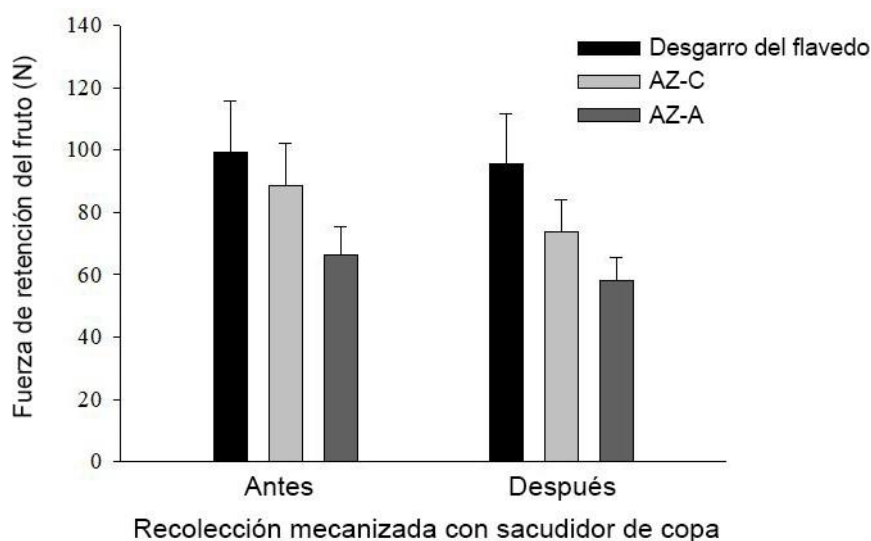


Figura 5.5. Fuerza necesaria para desprender el fruto en la copa del árbol antes y después de la recolección mecanizada con sacudidor de copa según la zona de abscisión del fruto (AZ).

Los frutos desprendidos por la prueba a tracción con desgarro del flavedo no mostraron diferencias significativas (t de Student,  $t=1.550$ ,  $p > 0,05$ ) antes o después de la cosecha mecánica, con un valor medio de la proporción de 2,42%. Sin embargo, el uso de un sacudidor de copa aumentó significativamente la cantidad media de fruta con abscisión AZ-A de 45 a 50% (t de Student,  $t = -2,05$ ,  $p < 0,1$ ,  $p=0,54$ ,  $n=22$ ) y redujo la cantidad de fruta con abscisión AZ-C de 50 a 45% (t de Student,  $t=1734$ ,  $p < 0,1$ ,  $p=0,98$ ,  $n=22$ ). Además, la fruta que quedaba en el árbol después de la cosecha mecánica con abscisión por AZ-C tenía valores medios de FDF (73,6 N) significativamente más bajos (t de Student,  $t=7,63$ ,  $p < 0.01$ ,  $n=22$ ) que la fruta con la misma abscisión antes de la utilización de la máquina de recolección (87,9 N). Esta reducción del valor medio de FDF se distribuyó de la misma manera entre los frutos que conservaban el cáliz o no (t de Student,  $t=4,70$ ,  $p < 0.01$ ,  $n=22$ ). Los frutos desprendidos en la abscisión de AZ-A tuvieron valores medios más bajos (t de Student,  $t=6,07$ ,  $p < 0.01$ ,  $n=22$ ) de FDF antes (68,1 N) y después (59,1 N) de la recolección con el sacudidor de copa. En ambos casos, el fruto desprendido por AZ-A requería una fuerza de desprendimiento menor que el fruto desprendido por el AZ-C.

## 5.5 Discusión

La abscisión es un fenómeno complejo, y es difícil predecir cómo se produce en condiciones reales de campo (Li et al., 2017). La caída natural de los cítricos maduros está condicionada por factores que pueden actuar individualmente o estar vinculados, y pueden ser secuenciales o simultáneos (Iglesias et al., 2007). Estos factores pueden tener una base genética o de regulación molecular (Merelo et al., 2017), pueden implicar el metabolismo de la planta a través de la disponibilidad de carbohidratos en los frutos jóvenes (Iglesias et al., 2003), la defoliación durante un período de crecimiento exponencial (Mehouachi et al., 1995, 2000), concentraciones de ácido abscísico y la liberación de etileno (Iglesias et al., 2007) o ser un resultado del entorno externo, como el déficit de agua o el estrés biótico producido por patógenos (Olsson & Butenko,

2018). Cuando se provoca la abscisión, aparecen nuevas formas de desprendimiento (además de AZ-A y AZ-C) como el desgarro de la cáscara, causado por una rotura mecánica del flavedo. Esta ruptura no era muy común, ocurriendo en menos del 8% de los frutos muestreados. Sin embargo, estas frutas mostraron un mayor FDF que el resto de AZ estudiadas. Este tipo de desprendimiento significa que la fruta sólo puede ser destinada a uso industrial debido a la falta de cáliz y al riesgo de entrada de patógenos que pueden dañar la fruta durante el almacenamiento. El porcentaje de frutos con desgarro por el flavedo puede variar según el tipo y la variedad de cítricos, siendo más susceptibles los frutos de cáscara fina, como las mandarinas.

Los resultados muestran que la AZ-C es la AZ más común, coincidiendo con Merelo et al. (2017). El método manual causa un desprendimiento en la AZ-C similar a la abscisión natural. Sin embargo, el sacudidor de copa desprendió el fruto en el punto más débil, tanto AZ-C como AZ-A. El aumento de las roturas por AZ-A con el sacudidor de copa se relacionó con valores más bajos de FDF. Un resultado similar se obtuvo para los limones (Torregrosa et al., 2010), donde los valores de FDF con abscisión en AZ-C se redujeron a lo largo de la temporada de cosecha, alcanzando valores de igual abscisión en AZ-A, que se mantuvieron constantes, al final del período. A diferencia de los limones, la variedad de naranja dulce 'Valencia' tiene un alto FDF en comparación con otras variedades de naranja (Torregrosa et al., 2009; Peterson, 1998) lo que facilita la rotura de AZ-A. El patrón de abscisión podría ser diferente en otras variedades de naranja, influenciadas por la FDF. Además, la contribución complementaria de elementos como el calcio afecta a las propiedades del fruto y, por lo tanto, sería necesario un estudio más detallado con secciones histológicas (Rehman et al., 2018).

La abscisión AZ-A da lugar a frutos con pedúnculo y genera la caída de hojas, ramas y brotes. La recolección mecanizada con sacudidor de copa puede aumentar la producción de restos vegetales (hojas, brotes, etc.) al menos en un 20% (Roka et al., 2012), y puede llegar a ser hasta 2,5 veces más alta que con el método manual (Spann & Danyluk, 2010), lo que implica un coste adicional del procesamiento de los frutos. Además, la presencia de un tallo de más de 4 mm de altura en el fruto puede causar daños a otros frutos durante el transporte (Torregrosa et al., 2009). El porcentaje de frutos con abscisión AZ-C y cáliz con el sacudidor de copa (41,6%) fue similar al resultado obtenido por Torregrosa et al. (2010) con un vibrador de troncos (41,7%) o con un vibrador de ramas (43,3%). Moreno et al. (2015) utilizaron un vibrador de troncos en variedades de mandarinas y naranjas y obtuvieron bajos porcentajes de frutos sin cáliz, entre 9,3 y 0,6%, con una eficiencia de cosecha que osciló entre el 67 y el 85%.

Los frutos desprendidos con el método de la prueba a tracción mostraron diferentes AZ, siendo las más frecuentes las que requerían un valor menor de FDF, en este caso, los frutos desprendidos en AZ-A, con un valor medio de 63,8 N. Según Glozer (2008), la evaluación correcta de FDF debería realizarse sólo en AZ-C, con un valor medio más alto (79,3 N). Además, el FDF puede variar en función de la forma en que se realice el método (Pozo et al., 2007), disminuyendo a medida que aumenta el ángulo del eje de la fruta (Liu et al., 2018). La evaluación de la FDF ha mostrado una aplicación limitada para predecir la eficiencia de la recolección con un sacudidor de copa. Savary et al. (2011) mostraron que el valor máximo de FDF en condiciones de laboratorio era sólo el 18% del método tradicional de medición de FDF con la prueba a tracción. Los valores medios de FDF no variaron significativamente durante la temporada, pero mostraron una tendencia decreciente. Tanto para el sacudidor de copa como para el vibrador de troncos, una reducción del FDF mejora la eficiencia de las máquinas, que requieren una vibración menos agresiva (Roka et al., 2005). La reducción del FDF fue útil para mejorar la

eficiencia de la recolección del 10-12%, pero no fue útil para valores superiores al 35% (Hartmond et al., 2000).

Los sistemas sacudidores de copa pueden lograr una alta eficiencia de recolección (90-95%) en las zonas cosechables de los árboles donde se produce un contacto adecuado entre las varas y la copa (Roka et al., 2014). El proceso de desprendimiento combina una vibración forzada con el impacto en las ramas y los frutos, dependiendo del diseño de las varas (Pu et al., 2018), el patrón de vibración de frecuencia y amplitud (Castro-García et al., 2018), y la penetración de las varas en la copa del árbol (Liu et al., 2018). La vibración generada produce una alta respuesta de los frutos, tallos y ramas (Castro-García et al., 2017). El sistema sacudidor de copa alcanzó un porcentaje mayor de abscisiones de frutos en AZ-C que el de la prueba a tracción, pero menor que el del método manual. Sin embargo, los frutos que quedaban en el árbol tenían un menor FDF después de la cosecha mecánica cuando tenían el desprendimiento AZ-A. Este efecto también fue descrito por Savary et al. (2010), que atribuyeron las acciones de torsión y flexión durante la recolección mecanizada como la principal causa del desprendimiento del fruto.

## 5.6 Conclusiones

Los diferentes métodos de desprendimiento de los frutos producen diversos patrones de abscisión. La recolección mecanizada con sacudidores de copa muestra un patrón de abscisión en AZ-A más alto que el de la caída natural y el método manual, en el que predomina AZ-C. El desprendimiento del fruto con el sacudidor de copa mostró un menor FDF en la rama (AZ-A) que en este (AZ-C), aumentando la generación de restos vegetales y la caída de la fruta con el cáliz. Los frutos que quedaron en el árbol después de la recolección con el sacudidor de copa mostraron un menor FDF que los anteriores.

## Capítulo 6

# El comportamiento vibratorio de los olivos en seto en respuesta a la recolección mecanizada con cosechadora cabalgante\*

---

\* Basado en: Sola-Guirado, R. R., Aragon-Rodriguez, F., Castro-Garcia, S., & Gil-Ribes, J. (2019). The vibration behaviour of hedgerow olive trees in response to mechanical harvesting with straddle harvester. *Biosystems Engineering*, 184, 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.009>

## 6.1 Resumen/Abstract

Comprender el comportamiento de los árboles en la recolección mecanizada es muy importante para la gestión de las plantaciones y el diseño de la maquinaria. El objetivo de este trabajo es determinar la respuesta dinámica de los árboles, dispuestos en seto, a la recolección mediante cosechadora cabalgante con sacudidor de copa. Se midieron 44 puntos de vibración a diferentes alturas sobre el suelo en árboles al azar. Se analizaron los principales parámetros de vibración en los dominios de tiempo y frecuencia. El ratio de transmisión de la aceleración entre las varas de la máquina y los árboles fue del 58%, vibrando a una frecuencia similar de 7,8 Hz. Los valores de aceleración registrados en la dirección principal del movimiento de las varas fueron superiores tanto en la dirección del seto como en la vertical. Las varas de la cosechadora estuvieron en contacto directo con la copa del árbol el 62% del tiempo de vibración de este. Los valores de aceleración resultantes muestran una distribución temporal similar a la de una curva gaussiana, pero la distribución a lo largo del tiempo total de vibración muestra que sólo el 49,2% de estos valores son inferiores a  $50 \text{ ms}^{-2}$  y el 93,3% son inferiores a  $300 \text{ ms}^{-2}$ . El análisis del tiempo de vibrado en un rango de aceleración determinada provee de más información acerca de la vibración. El árbol respondió de manera diferente según la altura de la copa, en términos de aceleración RMS y aceleraciones pico, identificando dos zonas diferentes en esta.

*Understanding tree behaviour under mechanical harvesting is very important for orchard management and machine design. The objective of this work is to determine the Dynamic response of trees, in a hedgerow arrangement, to a straddle harvester with canopy shaker. Forty-four points were measured in random trees at different heights above the ground. The main vibration parameters in the time and frequency domains were analysed. The transmission range of acceleration between machine rods and trees was 58%, vibrating at a similar frequency of 7.8 Hz. The acceleration values registered in the main direction of rod movement were higher than both in the direction of the hedgerow and vertically. The rods of the harvester are in direct contact with the tree canopy 62% of the tree's vibration time. The resultant acceleration values show a temporal distribution similar to a Gaussian curve but distribution throughout the total vibration time shows that only 49.2% of these values are lower than  $50 \text{ ms}^{-2}$  and 93.3% are lower than  $300 \text{ ms}^{-2}$ . The analysis of vibration time in a range gives more information about the impact of shaking. The tree responded differently at different canopy heights in terms of acceleration RMS and peaks, identifying two zones.*

## 6.2 Introducción

El olivo es un cultivo de gran importancia internacional, que está experimentando un gran desarrollo. Los esquemas de plantación tradicionales de la cuenca mediterránea (menos de 200 árboles  $\text{ha}^{-1}$ ) se están modificando por otros de menor espaciamiento como los intensivos (200-400 árboles  $\text{ha}^{-1}$ ), de alta densidad (400-700 árboles  $\text{ha}^{-1}$ ) y de super alta densidad o superintensivos (más de 1500 árboles  $\text{ha}^{-1}$ ). Estos nuevos diseños de plantación se están adoptando en todos los lugares del mundo donde se da el cultivo. La elección de la tipología de plantación depende de diferentes factores: condiciones ecológicas, tamaño de la plantación, disponibilidad de mano de obra, inversión económica, etc. (Tous et al., 2014). Cada tipología tiene una arquitectura de árbol diferente y, por lo tanto, requiere una formación y una gestión de los árboles particular.

El diseño de la arquitectura del árbol puede influir en el rendimiento y las características de los frutos (Lavee et al., 2012) y está estrechamente relacionado con la tecnología de recolección que se aplique y, por lo tanto, con la rentabilidad del cultivo (Bernardi et al., 2018). La relación entre la arquitectura del árbol y la tecnología de recolección está, por un lado, condicionada por los sistemas de recolección mecanizada disponibles, que realizan diferentes patrones de vibración (Sola-Guirado et al., 2014) y, por otro lado, del comportamiento del árbol bajo una excitación, como la vibración, relacionada con las disposiciones espaciales y temporales de su tronco, ramas y brotes. El crecimiento y el desarrollo de un árbol puede controlarse, en gran parte, mediante parámetros físicos como el espaciamiento entre los árboles, el crecimiento de la copa o la formación de ramas, y mediante parámetros fisiológicos como la densidad de las hojas y la radiación fotosintéticamente activa (Cherbiy-Hoffmann et al., 2012).

El olivar de alta densidad es el más adecuado para implantar un elevado nivel de mecanización, lo que lo hace muy atractivo para los agricultores e inversores. Su principal ventaja es la rapidez de la cosecha, que se realiza mediante cosechadoras cabalgantes con sacudidor de copa, una tecnología importada de la recolección de la viña. Sin embargo, hace años, las plantaciones no estaban adaptadas para permitir la recolección continua mediante cosechadoras cabalgantes y se componían de árboles aislados aptos para vibradores de troncos y/o la recolección o vareo manual. El diseño de las plantaciones ha tenido que modificarse para juntar los árboles y crear un seto continuo con el fin de emplear las cosechadoras cabalgantes. La estructura de los árboles y la fructificación deben adaptarse a las cosechadoras, pero la máquina también debe adaptarse a las características del seto (Connor et al., 2014). Este trabajo se centra en la interacción dinámica entre la máquina y los árboles y su comportamiento bajo vibración forzada.

Las cosechadoras cabalgantes con sacudidor de copa aplican una vibración por medio del movimiento alternativo de dos filas opuestas de varas que comprimen la copa del árbol a ambos lados, mientras se desplazan hacia el árbol adyacente a una velocidad de avance uniforme. Varios autores han estudiado la regulación del sacudidor de copa en cosechadoras laterales para otros cultivos como los cítricos (Gupta et al., 2016). También hay resultados para el patrón de vibración de los sacudidores de copa en cosechadoras de otros cultivos, como las uvas (Pezzi & Caprara, 2009). Se ha estudiado la influencia de los cosechadores con sacudidor de copa en los olivares por su rendimiento (Ravetti & Robb, 2010), la calidad del aceite (Farinelli & Tombesi, 2015) y los daños causados a los frutos (Morales-Sillero et al., 2014) o a los árboles (Pérez-Ruiz et al., 2018). Además, se ha estudiado el comportamiento del olivo bajo vibración en la recolección mecanizada, principalmente para la aplicación de vibradores de troncos en árboles (Castro-García et al., 2008, Hoshyarmanesh et al., 2017). Para comprender mejor la recolección mecanizada de este tipo de plantaciones es necesario estudiar las dos componentes, la máquina (cosechadora cabalgante con sacudidor de copa) y el árbol (olivar en seto) (Tombesi & Farinelli, 2014). La optimización de la recolección se logrará maximizando el desprendimiento de los frutos, minimizando los daños al árbol y reduciendo al mínimo el tiempo dedicado a la operación. La forma de lograrlo es ajustar adecuadamente los parámetros de la máquina y la formación de los árboles, lo que requiere una comprensión de lo que ocurre en la estructura del árbol durante la recolección. El objetivo de este trabajo es determinar la respuesta dinámica de los árboles en seto estrecho recolectados a través de una cosechadora cabalgante con sacudidor de copa. Los resultados y la metodología empleados pueden utilizarse en la recolección de otros cultivos con máquinas similares y proporcionar unas indicaciones adecuadas para mejorar la recolección mecanizada.



### 6.3 Materiales y métodos

Los ensayos se llevaron a cabo en un olivar superintensivo en regadío (830 árboles ha<sup>-1</sup>) de la variedad 'Arbequina', situado en Córdoba (latitud: 37 560 04.800 N, longitud: 4 430 00.9000 W), en el sur de España. Los árboles tenían más de 10 años, estaban en buen estado fisiológico y de salud, con un volumen de copa de  $5,32 \pm 1,31$  m<sup>3</sup> árbol<sup>-1</sup> y un espacio entre árboles de 2 m. La poda de árboles había sido adaptada a los sistemas de recolección en fila continua con un seto de 1,11 m de ancho y una altura de la copa desde 0,57 m hasta 2,95 m del suelo. Se realizaron los ensayos del 14 al 20 de diciembre de 2017, en condiciones similares de tiempo, madurez del fruto y hora del día, siendo estos factores importantes en la eficiencia de la recolección mecanizada (Camposeo et al., 2013).

El sistema de recolección estaba basado en una cosechadora cabalgante con sacudidor de copa (New Holland Braud VX7090, Bélgica) formada por un túnel de 0,60 m de ancho y una altura fija de 2,60 m para introducir y comprimir la copa de los árboles. La máquina tenía una disposición de 20 varas de nylon a cada lado con una longitud de 2,10 m, un espaciamiento vertical de 0,10 m y un espaciamiento horizontal de 0,10 m (centro de la vara) a 0,60 m (extremos de la vara). La velocidad de avance de la máquina era de 0,55 ms<sup>-1</sup>. La vibración forzada se aplicó mediante movimientos alternativos de las varas con una configuración de la cosechadora fijada en 7,7 Hz (460 ciclos min<sup>-1</sup>), siendo la más adecuada para la eficiencia en la recolección y con un daño bajo a los árboles, según la experiencia del operador de la máquina.

La vibración se midió en los árboles y en la máquina durante la operación de recolección utilizando un conjunto de acelerómetros triaxiales MEMS (Gulf Coast Data Concepts LLC X200-4, Waveland, MS) con un rango de medición de  $\pm 2000$  ms<sup>-2</sup>, una resolución de 16 bits, una sensibilidad de 0,06 ms<sup>-2</sup> y una frecuencia de muestreo de 400 Hz. Cada sensor del árbol estaba situado detrás de la rama, para evitar el contacto directo con las varas, coincidiendo con la dirección vertical (eje Z). Los ejes transversales del sensor definían un plano paralelo al suelo (ejes X e Y). El eje Y coincidía con el movimiento principal de las varas. Se registraron 44 puntos distribuidos aleatoriamente en los árboles a diferentes alturas de 0,65 a 2,40 m del suelo, y los acelerómetros se situaron en las ramas principales con la misma orientación del eje. Los sensores de aceleración de la máquina estaban situados detrás de la vara para evitar el contacto directo con las ramas (Fig. 6.1).



Figura 6.1. Ubicación de los acelerómetros en el árbol y la cosechadora cabalgante (Z: dirección vertical del árbol, X: dirección de avance de la máquina, Y: dirección de movimiento de las varas).

El análisis de las señales de aceleración se realizó en el dominio del tiempo utilizando el software libre R (R Core Team, 2016) y en el dominio de la frecuencia utilizando el software NVGate v8.0, realizando una Transformada Rápida de Fourier con 401 líneas en un rango de frecuencia de 0-156,2 Hz con una resolución de 0,39 Hz.

Se propone una metodología de análisis para obtener varias variables importantes a partir de las señales de aceleración medidas en los árboles y la máquina.

En el dominio de la frecuencia, las variables de vibración fueron:

- Frecuencia: número de ciclos por segundo (Hz) de movimiento de la vara que sacude la copa.
- Aceleración RMS ( $A_{RMS}$ ): media cuadrática (RMS) de aceleración para cada eje del acelerómetro ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) para la frecuencia de la vibración (Rao, 2004).

En el dominio del tiempo, las variables estudiadas (Fig. 6.2) fueron:

- Aceleración resultante ( $A_r$ ) ( $ms^{-2}$ ): suma vectorial de los tres ejes de medición ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ) en cada sensor.
- Tiempo de vibración ( $T_{vib}$ ): tiempo transcurrido entre el primer y el último evento con un valor sobre un rango de aceleración resultante. Este rango se obtuvo midiendo la aceleración a la que vibran los árboles sin ninguna excitación excepto la acción de los fenómenos naturales, en los 150 s antes y después de la cosecha.
- Tiempo de vibración en un rango de aceleración resultante ( $T_{Ar}$ ): suma de los intervalos de tiempo por encima de un rango de aceleración resultante.
- Aceleración máxima o pico ( $A_p$ ): los 21 valores máximos de los picos en la aceleración resultante en el dominio del tiempo. El número 21 es un criterio tomado asumiendo una frecuencia media de 7 ciclos por segundo y un tiempo de vibración de 3 s.

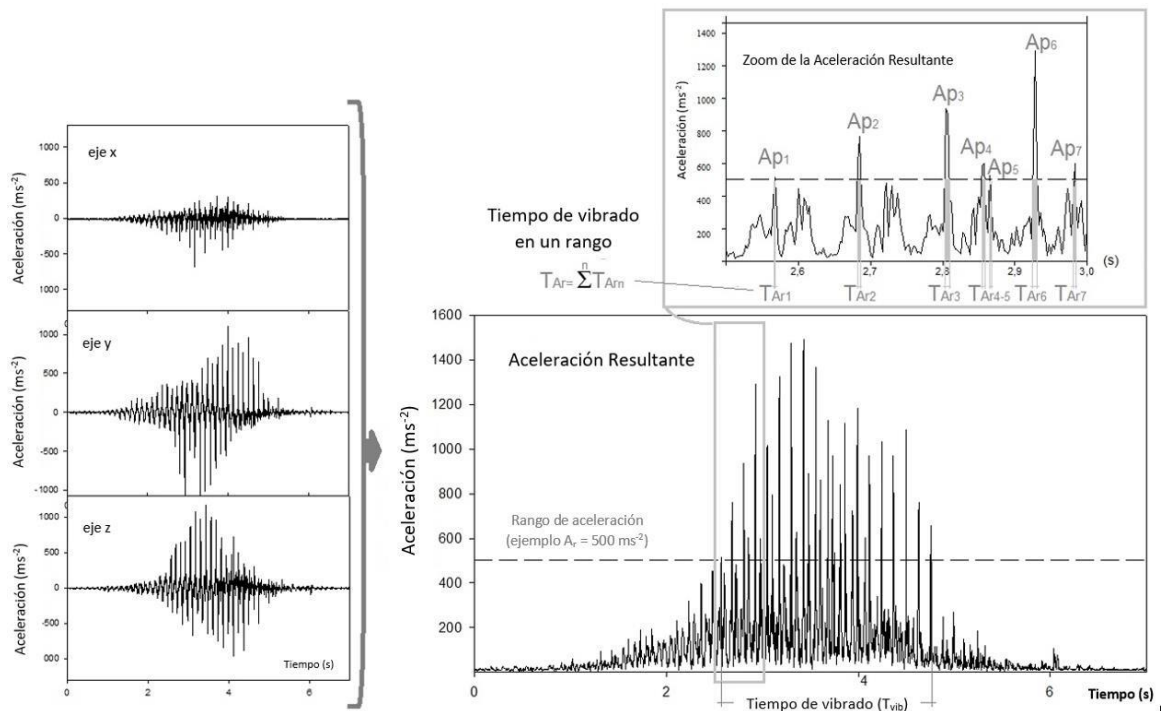


Figura 6.2. Señal de aceleración en el dominio del tiempo (izquierda) y parámetros de vibración analizados en cada árbol para un ejemplo con un rango de aceleración de  $500 \text{ ms}^{-2}$  (derecha).

Se realizó un análisis de agrupamiento o conglomerados con los diferentes puntos de muestreo utilizando  $A_{RMS}$  y  $A_p$  aplicando los métodos de *hierarchical clustering*, *k-means* y *k-medoids*. Se utilizó la distancia euclídea en todos los métodos. Para el *hierarchical clustering* se empleó el criterio de enlace de Ward. Para *k-means* y *k-medoids* se utilizó un valor  $k$  (número de grupos) de 2, estimado por *Elbow method* y *Silhouette method*.

## 6.4 Resultados y discusión

Se vibraron las rama inferiores y superiores de la copa debido a la configuración en altura de la máquina y a la elasticidad en la compresión de las ramas superiores en su entrada al túnel. Las ramas vibraron con una frecuencia de  $7,8 \pm 0,1 \text{ Hz}$  (media  $\pm$  desviación estándar), muy cercana a la frecuencia de sacudida de la vara de la cosechadora, y coincidiendo con los valores aportados por otros autores para máquinas similares (Pezzi & Caprara, 2009). La frecuencia con la que se excitan los árboles para desprender los frutos varía según la tecnología de recolección empleada. El patrón de vibración es diferente si la excitación se aplica al follaje o directamente sobre la estructura del árbol. Se puede aplicar una amplia gama de frecuencias para desprender las aceitunas directamente relacionadas con la amplitud de la vibración, pero, en general, la cosechadora cabalgante funciona con valores bastante similares al sacudidor de copa lateral y ligeramente superiores a los del vareador manual mecánico, pero inferiores a los vibradores de troncos o de ramas (Sola-Guirado et al., 2014). Sin embargo, los valores de frecuencia también pueden variar para la misma máquina, como se ha informado para la cosechadora de café (12-15 Hz) (Cassia et al., 2013) o ser similares a los de la viña (7-8 Hz) (Vallone et al., 2017).

Los valores de  $A_{RMS}$  medidos en las varas de la cosechadora fueron  $174 \pm 28 \text{ ms}^{-2}$ , mientras que los valores medidos en los árboles fueron  $101 \pm 31 \text{ ms}^{-2}$ . Esto indica una tasa de transmisión

de la aceleración del 58,2%. Este valor bajo no es tan importante como en los vibradores de troncos, donde las tasas bajas de transmisión pueden producir daños en la corteza del tronco o deficiencias en el desprendimiento del fruto (Tombesi et al., 2017). No obstante, esta podría mejorarse con un mejor contacto entre las varas y las ramas siempre que haya un ángulo adecuado entre ellas (Gupta et al., 2016), lo que sólo puede lograrse con la ramificación o la modificación de la inclinación de la vara. El material de las varas también es importante, ya que puede influir no sólo en la eficiencia en el desprendimiento, sino también en los daños a las ramas (Liu et al., 2017; Pu et al., 2018) y en la durabilidad de las mismas.

Varios autores han estudiado la transmisión de la aceleración a lo largo de toda la estructura del árbol (Sola-Guirado et al., 2018; Tombesi et al., 2017), sin embargo, para una cosechadora cabalgante carece de sentido porque las varas golpean muchos puntos de la estructura del árbol en toda la altura de este a lo largo del túnel. Debido a esto, no es relevante analizar la transmisión entre diferentes puntos del árbol. A pesar de ello, el árbol puede representarse como una estructura formada por un tronco y unas ramas que son masas dinámicas con un factor de amortiguación y un resorte (James et al., 2006). El ángulo de crecimiento de las ramas y el contacto entre las ramas de una misma fila influyen en la respuesta del árbol a la vibración. Tombesi & Farinelli (2014) sugieren la adaptación de la copa del árbol al túnel de vibrado mediante la eliminación de los brotes con menos potencial de fructificación, es decir, brotes de un año, y una poda más severa que en la parte superior de la copa.

Bajo el procedimiento de medición descrito y colocando los acelerómetros como se muestra en la figura 5.1, la descomposición de  $A_{RMS}$  en los diferentes ejes (x, y, z) mostró diferentes valores durante el proceso de vibración. La dirección principal de la vibración en el árbol con valores de  $92 \pm 30 \text{ ms}^{-2}$  fue la perpendicular al seto (eje y), que correspondía a la máxima amplitud de la vara en el movimiento de sacudida. Los valores registrados en el árbol en la misma dirección que el seto y la velocidad de avance (eje x) fueron tres veces inferiores a los de la dirección principal de vibración ( $31 \pm 19 \text{ ms}^{-2}$ ). Por otra parte, hubo otros componentes significativos de la vibración a lo largo de la dirección del crecimiento del árbol (eje z) ( $17 \pm 12 \text{ ms}^{-2}$ ), a pesar de que las varas sólo funcionan en un plano horizontal, pero que pueden deberse a la ligera inclinación de los árboles.

Es bastante difícil calcular el principio y el final de la vibración generada por los sistemas de recolección continua. En una cosechadora cabalgante, este tiempo podría calcularse fijando un rango adecuado o un valor mínimo de aceleración resultante, que sólo se produciría en el árbol debido a la interacción de las varas que lo sacuden y terminaría cuando ese contacto finalizase. Por esta razón, en este trabajo registramos los valores de aceleración generados en los árboles exclusivamente por los fenómenos ambientales, principalmente el viento y la gravedad, sin interacción de la máquina. La aceleración media fue de  $11 \pm 1 \text{ ms}^{-2}$  con valores máximos de  $17 \text{ ms}^{-2}$ , por lo que propusimos establecer un rango de aceleración de  $18 \text{ ms}^{-2}$ . Con este rango el tiempo de vibración fue de  $6,84 \pm 1,08 \text{ s}$ .

Cuanto mayor era el rango de aceleración, menor era el tiempo de vibración, que alcanzó valores de 6,13 s para un rango de  $30 \text{ ms}^{-2}$ , 4,68 s para  $100 \text{ ms}^{-2}$ , 3,32 para  $300 \text{ ms}^{-2}$  o 1,21 para  $1000 \text{ ms}^{-2}$ . En la figura 6.3 se muestran los valores medios de aceleración resultantes registrados en los árboles a lo largo del tiempo, comenzando en el mismo punto con el citado criterio de un rango de aceleración de  $18 \text{ ms}^{-2}$ . Los valores de  $A_r$  aumentaron hasta alcanzar un pico, posiblemente en el punto medio del túnel donde se produce la máxima amplitud de movimiento, y disminuyeron hasta llegar a una depresión, con una evolución temporal que se ajusta a una curva gaussiana ( $R^2 = 0,93$ ). La zona de  $A_r$  creciente mostró una evolución lineal más

larga que la zona decreciente (Fig. 6.3). Esto muestra cómo los árboles tienen una mayor amortiguación de la vibración al principio de la sacudida que al final, a pesar de la alta amortiguación del olivo (Castro-García et al., 2008). Esto puede deberse al efecto ‘catapulta’ que la máquina genera cuando libera al árbol. La figura 6.3 también muestra el espectro de frecuencia media de los puntos medidos. El análisis de frecuencias mostró un valor principal (7,8 Hz) correspondiente a la vibración de frecuencia de las varas y un primer valor armónico en doble frecuencia (15,6 Hz) correspondiente a la respuesta del árbol y la posibilidad de impactos dobles cuando las varas de ambos lados de la máquina golpean el árbol al mismo tiempo.

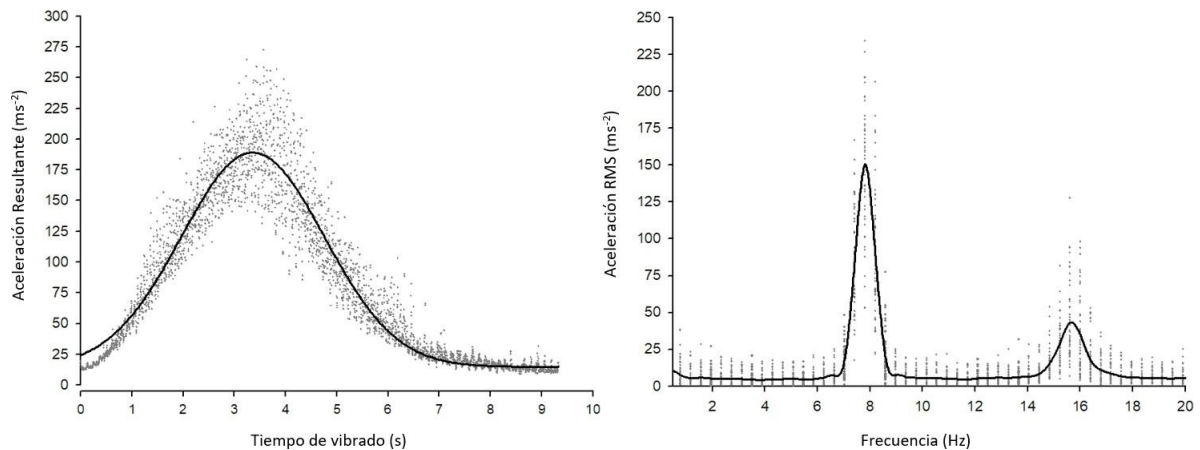


Figura 6.3. Aceleración medida en los olivos realizada con la cosechadora cabalgante. Izquierda: Análisis en el dominio del tiempo de los valores de aceleración resultantes para un promedio de 44 valores con 0,0025 s de resolución. A la derecha: Espectro medio de la vibración de la copa con la una resolución de 0,39 Hz.

El tiempo de vibración calculado (6,84 s) es considerablemente mayor que la duración teórica que las varas están golpeando la copa (4,19 s), que se calculó dividiendo la distancia recorrida (la suma de la longitud de las varas y el diámetro medio del árbol) por la velocidad de la máquina. Es decir, los árboles están sometidos a una vibración forzada durante más tiempo porque hay un período de este en el que la máquina cubre y libera el árbol. Durante la sacudida, hay transmisión de vibraciones entre los árboles del mismo seto y después de la sacudida hay un tiempo en el que el árbol permanece vibrando libremente.

La distribución de la aceleración resultante a lo largo del tiempo de vibración medido en los árboles (Fig. 6.4) muestra que el patrón de vibración que realiza la cosechadora cabalgante es bastante similar al de los sacudidores de copa o de follaje (Sola-Guirado et al., 2014). Este histograma ilustra que la mayoría de las veces los valores de aceleración resultantes son bajos (49,2% para  $A_r < 50 \text{ ms}^{-2}$  y 21,3% para  $50 < A_r < 100 \text{ ms}^{-2}$ ) a pesar de que hay algunos valores de aceleración resultantes que son diez veces mayores, pero que representan un tiempo más corto. Los valores altos, de más de  $600 \text{ ms}^{-2}$ , son sólo el 2,2% del tiempo de vibración. Estos valores ponen de manifiesto cómo los impactos no se consideran en el análisis del dominio de la frecuencia con  $A_{\text{RMS}}$ . En otros sistemas de recolección, los parámetros de vibración en el dominio de la frecuencia se aplican como predictores de la eficiencia de la recolección y los daños (Hong et al., 2012; Polat et al., 2007; Sessiz & Özcan, 2006). Sin embargo, en la recolección con sacudidores de copa lateral o cabalgantes, los impactos tienen una gran influencia en el proceso de eficiencia (Sola-Guirado et al., 2016), por lo que la aceleración resultante no es suficiente

para el análisis de la recolección con esta tecnología y debe complementarse con los valores de los impactos.

Los impactos en las ramas se generan por los movimientos de las varas de alta amplitud mientras se avanza. Las aceleraciones pico ( $A_p$ ) tuvieron valores medios de  $974 \pm 375 \text{ ms}^{-2}$  con valores máximos de hasta  $1607 \text{ ms}^{-2}$ . Sin embargo, a pesar de los altos valores, los impactos tuvieron una rápida amortiguación y, por lo tanto, una baja duración (Fig. 6.4). Esta amortiguación puede depender en mayor medida de la resistencia al aire de las hojas y brotes que de las propiedades mecánicas de la madera del árbol (Gupta et al., 2016). El árbol, en consecuencia, puede actuar como un oscilador armónico amortiguado con una amortiguación predominante de la masa (Castro- García et al., 2008).

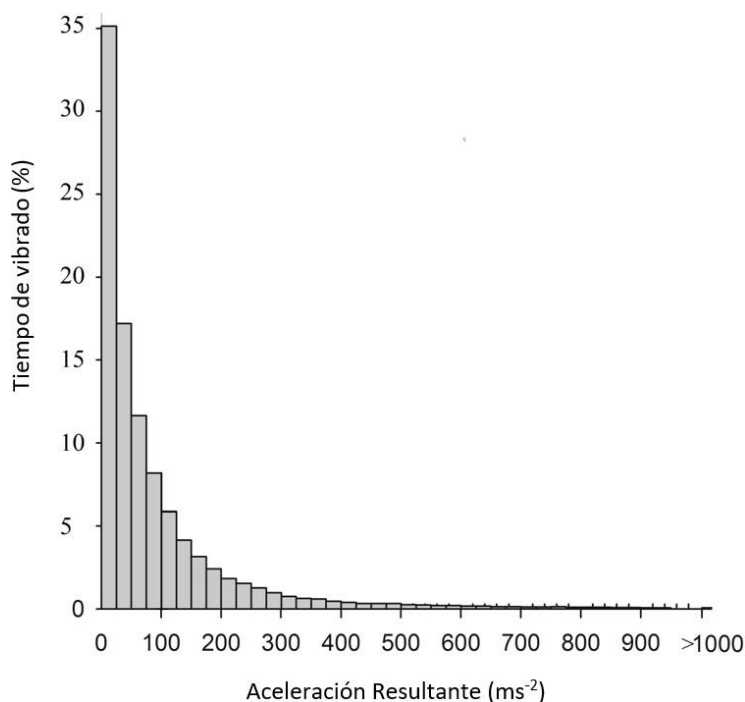


Figura 6.4. Histograma de la aceleración resultante de la vibración medida en los árboles en el dominio del tiempo (N = 44).

Para un análisis más profundo de la distribución de las aceleraciones resultantes se puede calcular el parámetro relativo al tiempo de vibración en un rango de aceleración resultante ( $T_{Ar}$ ). Esto muestra cuánto tiempo vibran las ramas en un rango de aceleración que puede influir en el desprendimiento o incluso en el daño (Pezzi & Caprara, 2009). En este trabajo, las ramas vibraron durante un tiempo de 4,43 s, 0,44 s o 0,04 s en rangos de 30, 300 y 1000  $\text{ms}^{-2}$ , respectivamente. Los valores del tiempo de vibración disminuyen a medida que aumenta el rango de aceleración resultante, llegando casi a una función exponencial negativa ( $R^2 = 0,93$ ). No obstante, este análisis debe tomarse con precaución por varias razones: la resolución o la frecuencia de muestreo en el análisis puede promediar los valores máximos de los impactos, un solo impacto se distribuye de forma diferente a lo largo de los tres ejes, y, por último, el valor de la aceleración resultante muestra los valores cuadráticos medios y también introduce valores adicionales de los picos que son el resultado de los rebotes de los impactos en cada eje. Para aumentar el tiempo de vibración en un rango, sería aconsejable reducir la velocidad de avance,

perjudicando la capacidad de trabajo de la máquina, o alargar las varas para mejorar el rendimiento del trabajo (Caprara & Pezzi, 2011).

El comportamiento de los árboles mostró diferencias según la altura a la que se producía la vibración y el diámetro de las ramas. Se halló una relación lineal positiva significativa entre  $A_p$  y la altura del árbol (Pearson = 0,806,  $p < 0,01$ ,  $R^2 = 0,65$ ) y también con el valor de  $A_{RMS}$  (Pearson = 0,794,  $p < 0,01$ ,  $R^2 = 0,63$ ) (Fig. 6.5). Por el contrario, se halló una relación lineal significativa negativa de estas variables con el diámetro de la rama (Pearson = 0,630,  $p < 0,01$ ,  $R^2 = 0,40$ ; Pearson = 0,661,  $p < 0,01$ ,  $R^2 = 0,44$ , respectivamente) (Fig. 6.6).

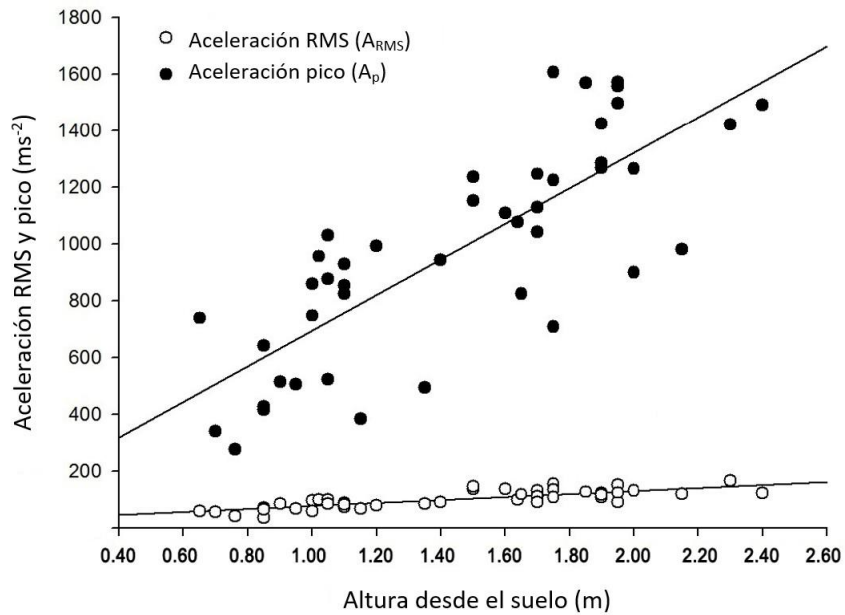


Figura 6.5. Relaciones lineales entre los valores de aceleración y la altura en la copa del árbol: Aceleración RMS ( $A_{RMS}$ ) y Aceleración pico o máxima ( $A_p$ ).

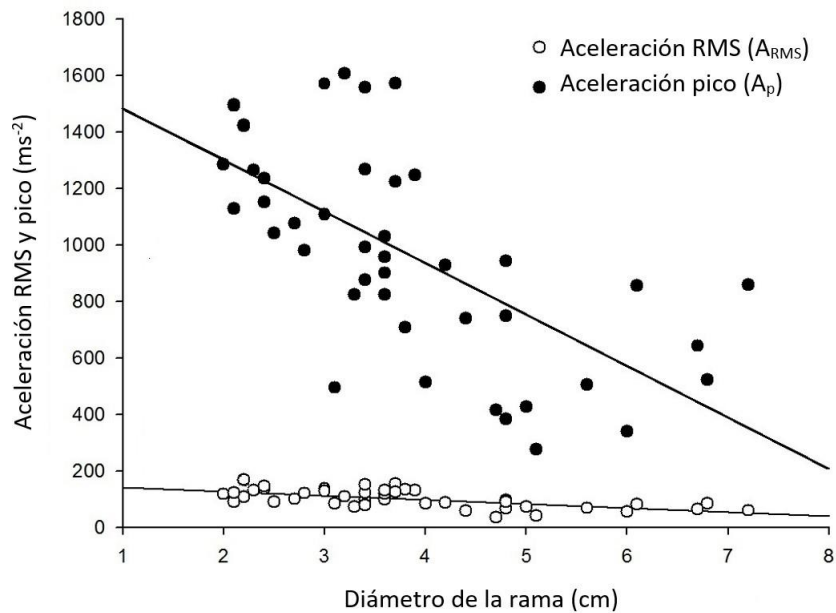


Figura 6.6. Relaciones lineales entre los valores de aceleración y el diámetro de la rama del árbol: Aceleración RMS ( $A_{RMS}$ ) y Aceleración pico o máxima ( $A_p$ ).

El análisis de conglomerados con  $A_{RMS}$  y  $A_p$  obtuvo una clasificación en dos grupos (grupo 1,  $N = 20$  y grupo 2,  $N = 24$ ) (Tabla 6.1) con similitudes del 93% entre los modelos de *hierarchical clustering*, *k-means* y *k-medoids*. Se seleccionó el modelo de *k-medoids* por ser más robusto y menos sensible a valores atípicos. Se encontraron diferencias significativas (t de Student,  $p < 0,05$ ) entre los grupos en cuanto a la altura en el árbol,  $A_{RMS}$  y  $A_p$ . Parece indicar que este tipo de árboles plantados en un seto responden de manera diferente para las dos zonas de arriba y abajo de alrededor de 1,50-1,70 m. Otros autores han encontrado tres zonas de comportamiento diferente en las copas de olivos tradicionales vibrados con sacudidores de copa (Sola-Guirado et al., 2017).

Tabla 6.1. Parámetros de vibración en las parcelas ensayadas, separados en dos grupos de acuerdo con el modelo de agrupación

Variables	Grupo	Mín.	Máx.	Media	C.V. (%)
Distancia desde el suelo (altura) (m)	1	1,50	2,40	1,88 a	12,5
	2	0,65	1,70	1,09 b	26,3
Aceleración pico ( $A_p$ ) ( $ms^{-2}$ )	1	707	1607	1282 a	19,0
	2	276	1076	717 b	35,0
Aceleración RMS ( $A_{RMS}$ ) ( $ms^{-2}$ )	1	90	165	128 a	13,8
	2	35	118	78 b	25,4
Tiempo de vibrado ( $T_{vib}$ ) (s)	1	5,30	8,90	6,94 a	15,6
	2	4,80	9,33	6,75 a	16,2

La misma letra en la misma variable indica que no hay diferencias significativas (t de Student,  $p < 0.05$ )

El coeficiente medio de variación de los valores RMS y de la aceleración máxima fue mayor en la zona baja de la copa ( $CV = 30,2\%$ ,  $N = 24$ ) en comparación con la zona alta ( $CV = 16,4\%$ ,  $N = 20$ ). Esto indica que hay más homogeneidad en la zona superior debido a la compresión de esta sección de la copa dentro del túnel de la cosechadora. Sin embargo, las zonas bajas de los árboles tienen una mayor variabilidad, probablemente debido al gran efecto de amortiguamiento del suelo que está más cerca de las zonas bajas (Horvath & Sitkei, 2005), las diferencias de crecimiento de las ramas a lo largo de la altura de los árboles, además del amortiguamiento causado por la interacción de las ramas más bajas con los mecanismos de recogida de la máquina. Así pues, las características de la copa influyen en la respuesta de los árboles a la vibración, y pueden afectar a la recolección mecanizada, pero de forma diferente a cuando se realiza con vibradores de troncos (Tombesi et al., 2017).

Los sistemas cabalgantes con sacudidor de copa son más eficientes en árboles con una copa plana y continua (Ferguson & Castro-García, 2014) porque el túnel de sacudida se ha diseñado para realizar una vibración similar en toda la altura del árbol a pesar de la diferente respuesta este. Los resultados sugieren crear diferentes zonas de vibración en la máquina o ajustar la vibración a diferentes alturas para reducir el nivel de energía aplicado al árbol y así reducir el daño tanto al árbol como a los frutos (Pérez-Ruiz et al., 2018). Otra medida sería adaptar la formación del árbol para distribuir la producción de frutos en zonas que reciben valores de aceleración más altos, considerando que la zona superior de la copa tiene un rendimiento más alto (Trentacoste et al., 2018), una mayor elasticidad de la copa (Tombesi & Farinelli, 2014) y la formación afecta al rendimiento, pero no a la eficiencia de la recolección mecanizada (Strik & Cahn, 1999). En este estudio no se encontraron diferencias significativas entre los valores del volumen de la copa de los árboles para la aceleración resultante o la aceleración máxima.

Si atendemos al tiempo de vibrado, no se encontraron diferencias significativas entre las zonas descritas (t de Student,  $p > 0,05$ ). Sin embargo, sí hubo diferencias significativas entre



ambas zonas para  $T_{Ar}$  (Fig. 6.7 con intervalos de  $50 \text{ ms}^{-2}$ ), siendo significativa (t de Student,  $p < 0,05$ ) para todos los intervalos excepto  $50-100 \text{ ms}^{-2}$  (t de Student,  $p > 0,05$ ). Esto pone de relieve la importancia de calcular el parámetro del  $T_{Ar}$  como parte del análisis de la respuesta de los árboles con cualquier tecnología de recolección.

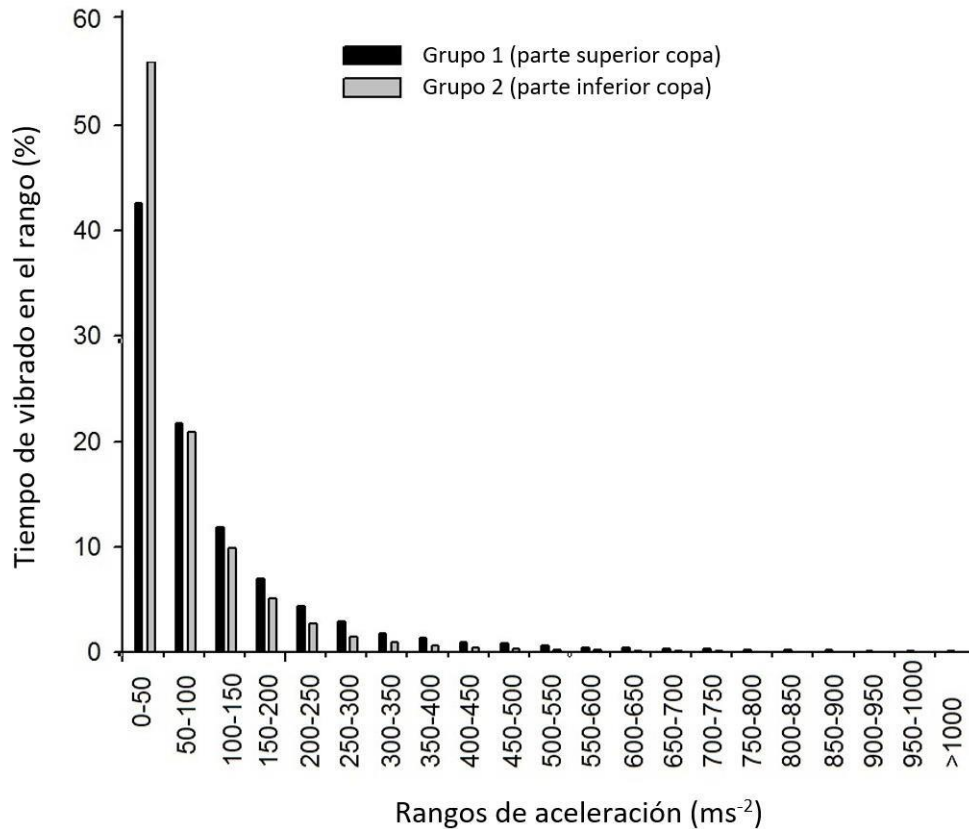


Figura 6.7. Distribución del tiempo de vibración dentro de los diferentes rangos de aceleración medidos a lo largo del tiempo total de vibrado (N = 44).

## 6.5 Conclusiones

Los datos obtenidos proporcionan un valioso estudio cuantitativo de los fenómenos vibratorios que se producen durante la recolección mecanizada de los olivos en una disposición en seto estrecho con una cosechadora cabalgante con sacudidor de copa.

Existe una baja tasa de transmisión de la aceleración entre varas y ramas que puede sugerir la realización de un análisis del fenómeno como una vibración no forzada o discontinua. El rango de aceleración por encima de  $18 \text{ ms}^{-2}$  puede ser un buen criterio para calcular el tiempo de vibración en el que el árbol vibra debido a la interacción de la máquina. La energía aplicada al árbol aumenta con una distribución de tiempo gaussiana, con los valores más altos de aceleración en la zona de máxima amplitud de las varas. Sin embargo, el fruto se desprende principalmente dentro del túnel con un tiempo de vibración del 62% respecto al tiempo total de vibración, por lo que los valores reducidos de la fuerza de desprendimiento del fruto pueden causar el desprendimiento antes de la acción de la cosechadora.

El patrón de la cosechadora cabalgante con sacudidor de copa muestra valores bajos de aceleración a lo largo del tiempo y esto oculta el valor de los impactos que se producen en el árbol. El análisis del tiempo de vibración dentro de un rango de aceleraciones da una idea de cuán grandes y cortos son estos picos de aceleración. Estos valores son muy importantes cuando se estudia la aptitud de las diferentes variedades de olivo para la cosecha mecánica, centrándose en los desarrollos para evitar daños en los frutos y las ramas.

La respuesta tridimensional de los árboles fue diferente dependiendo del movimiento de las varas y la dirección de avance de la máquina. Los valores de la aceleración resultante y aceleración máxima o pico fueron mayores en las partes más altas del árbol. El diseño de la máquina debería adaptarse de acuerdo con las diferentes respuestas del árbol a fin de reducir los niveles de energía en los frutos. Asimismo, la formación del árbol debe evitar la concentración de frutos en las zonas bajas, promover la fructificación externa de la copa y reducir la fructificación en la línea del tronco.

## Capítulo 7

### Conclusiones

## Conclusiones

Los objetivos específicos planteados han sido alcanzados por los resultados obtenidos a través de cuatro artículos científicos que conforman dicho trabajo, pudiendo obtener las siguientes conclusiones específicas:

El Objetivo específico 1 corresponde al análisis de la interacción de las varas del sacudidor de copa con las ramas de los árboles durante el proceso de recolección mecanizada. De los resultados obtenidos mediante los trabajos que recogen este objetivo se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Los árboles dispuestos en seto tienen diferentes respuestas según el tipo y la dirección de la vibración aplicada durante el proceso de recolección mecanizada con sistemas sacudidores de copa. La dirección predominante de la vibración de la copa es la dirección transversal al seto, esto es, perpendicular a la dirección de avance de la máquina. Aunque también se produce una vibración en la dirección longitudinal del seto, la dirección de avance de la máquina es de menor magnitud. La vibración es transmitida a los árboles antes y después del paso del sacudidor de copa como consecuencia del contacto directo entre las copas de los árboles
- El derribo de los frutos está directamente relacionado con la regulación del sacudidor de copa. La velocidad de desplazamiento de la máquina condiciona el tiempo de vibrado del árbol, mientras que la aceleración provocada por las varas está definida por su valor de frecuencia y amplitud. Esto deriva en la importancia de plantear un adecuado ajuste de las máquinas para encontrar la mejor relación entre la eficacia en el derribo de los frutos, los daños producidos y la capacidad de trabajo. Esta relación dependerá de condiciones intrínsecas y extrínsecas de las plantaciones.
- La transmisión mecánica de la vibración en el árbol es muy reducida, a pesar de existir un adecuado contacto entre las varas de la máquina y la copa. El amortiguamiento de la vibración en la copa del árbol desde el exterior al interior del seto reduce la eficacia de la recolección. La zona eficaz para el derribo de los frutos se corresponde prácticamente a la zona de la copa explorada por las varas.
- La respuesta del árbol a la recolección puede ser expresada en función del tipo de amortiguamiento implicado en el proceso. El amortiguamiento viscoelástico o de histéresis, originado por la rigidez de las ramas y el tronco del árbol, es predominante en las cosechadoras cabalgantes de seto estrecho, donde el seto es comprimido y sacudido en ambos lados. En cambio, el amortiguamiento viscoso o hidráulico debido al movimiento de las hojas, así como el amortiguamiento másico producido por la interacción mutua de las ramas y el tronco, tiene una mayor importancia en los sistemas de sacudida lateral en seto ancho, que no comprimen la copa y se destinan a árboles de mayor volumen de copa.
- La respuesta diferencial que ha mostrado el seto estrecho a la vibración forzada indica la necesidad de una regulación adaptativa de los sacudidores de copa según la altura del seto. Esta regulación favorecerá que las máquinas de recolección sean más eficientes en el derribo de los frutos y provoquen menos daños a los árboles.

El Objetivo específico 2 corresponde al establecimiento de las orientaciones de poda y formación de árboles para facilitar la transmisión de la vibración, reducir los daños y mejorar el desprendimiento de los frutos. De los resultados obtenidos mediante los trabajos que recogen este objetivo se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Los árboles y el sistema de recolección empleado necesitan de una adaptación mutua para alcanzar unos elevados niveles de eficiencia en la operación. Para incrementar la eficacia en la recolección se debe facilitar el acceso de las varas a las zonas fructíferas de la copa.
- La formación del seto, condicionada por el marco de plantación, que proporciona una copa continua, incrementa la eficiencia y la eficacia del proceso de recolección mecanizada frente a las plantaciones con copa discontinua.
- La producción del árbol, actuando los frutos como cargas puntuales en la copa, no define los valores más eficaces para realizar la regulación en frecuencia de los sistemas sacudidores de copa. Sin embargo, si se debe regular en frecuencia según el tipo de cultivo.

En el Objetivo específico 3 corresponde a la definición del patrón de abscisión de los frutos con recolección mecanizada utilizando sistemas sacudidores de copa. De los resultados obtenidos mediante los trabajos que recogen este objetivo se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Los sistemas sacudidores de copa originan una vibración localizada cerca de los frutos. Fundamentalmente, los frutos se desprenden por medio de la acción de las varas, moviendo la copa. En menor medida, los frutos son desprendidos por el contacto directo o impacto de las varas.
- El desprendimiento de los cítricos empleando sacudidores de copa se realiza, principalmente, por la rotura de su pedúnculo. Este tipo de abscisión conlleva que se generen mayores restos vegetales que deberán ser eliminados y puede incrementar el daño a frutos durante su almacenaje y transporte.
- Los frutos que permanecen en el árbol después de la recolección mecanizada sufren una fatiga mecánica a causa de la vibración soportada y los posibles impactos recibidos con ramas u otros frutos. Estos presentan una mayor facilidad para su desprendimiento, condicionando su posterior manejo.

El trabajo desarrollado en esta tesis doctoral demuestra que el análisis conjunto de la respuesta del árbol y de los parámetros de funcionamiento de los sistemas sacudidores de copa permite la mejora del proceso de recolección mecanizada en cítricos y en olivar. Se muestra interesante proseguir en líneas futuras de trabajo con la determinación de la respuesta dinámica del olivo y su abscisión forzada provocada por la recolección mecanizada con sacudidores de copa. Además, se está trabajando durante el proyecto CPI Innolivar en el desarrollo y ejecución de sacudidores de copa laterales para aceituna de mesa, pudiendo ser empleados también para aceituna con destino aceite. Los ensayos que se realizarán pondrán de manifiesto el comportamiento de este tipo de sacudidores en variedades tradicionales de aceituna con poda y formación adaptadas a la maquinaria con el objetivo de promover la sostenibilidad económica, social y ambiental de las plantaciones olivareras.

## Referencias

## Referencias

- Aerial coffee harvesting*. (s. f.). [Fotografía]. Unusual and exotic harvesters: Coffee. <https://stmaaprodfwsite.blob.core.windows.net/assets/sites/1/Aerial-coffee-harvesting.jpg>
- Agroinformación. (2020, 13 agosto). *La recogida nocturna de la aceituna APAG Extremadura* [Fotografía]. <https://agroinformacion.com/wp-content/uploads/2020/08/LA-RECOGIDA-NOCTURNA-DE-ACEITUNA-APAG-EXTREMADURA-1080x675.jpg>
- Agüera Vega, J., Blanco, G. L., Castillo, F., Castro-Garcia, S., Gil-Ribes, J. A., & Pérez-Ruiz, M. (2013). Determination of field capacity and yield mapping in olive harvesting using remote data acquisition. *Precision Agriculture 2013 - Papers Presented at the 9th European Conference on Precision Agriculture*, 691-696.
- Allalout, A., Krichene, D., Methenni, K., Taamalli, A., Daoud, D., & Zarrouk, M. (2011). Behavior of super-intensive Spanish and Greek olive cultivars grown in northern Tunisia. *Journal of Food Biochemistry*, 35(1), 27–43.
- Arenas-Arenas, F. J., González-Chimeno, A. B., Romero-Rodríguez, E., Casado, G., Bordas, M., Torrents, J., & Hervalejo, A. (2016). Adaptation of two citrus cultivars grafted on former alcaide N° 517 to super high-density system and evaluation of mechanized harvesting. *Citrus Research & Technology*, 37(2), 122–131. <https://doi.org/10.4322/crt.icc021>
- Baker, C. (1997). Measurements of the natural frequencies of trees. *Journal of Experimental Botany*, 48(5), 1125–1132. <https://doi.org/10.1093/jxb/48.5.1125>
- Bergqvist, J., Dokoozlian, N., & Ebisuda, N., (2001). Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin valley of California. *The American Journal of Enology and Viticulture*, 52, 1–7.
- Bernardi, B., Benalia, S., Fazari, A., Zimbalatti, G., Stillitano, T., & De Luca, A.I. (2016). Mechanical harvesting in traditional olive orchards: oli-picker case study. *Agronomy Research*, 14(3), 683-688.
- Bernardi, B., Falcone, G., Stillitano, T., Benalia, S., Strano, A., Bacenetti, J., & De Luca, A. I. (2018). Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation. *Science of The Total Environment*, 625, 1446–1458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.005>
- Blanke, M. M., & Bower, J. P. (1991). Small fruit problem in Citrus trees. *Trees*, 5(4), 239–243. <https://doi.org/10.1007/bf00227531>
- Bordas, M., Torrents, J., Arenas, F., & Hervalejo, A. (2012). High density plantation system of the spanish citrus industry. *Acta Horticulturae*, 965, 123–130. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.965.15>

- Bosch, J.L., López, G., & Batlles, F.J. (2009). Global and direct photosynthetically active radiation parameterizations for clear-sky conditions. *Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam*, 149, 146-158
- Brotons-Martínez, J., Martín-Gorrioz, B., Torregrosa, A., & Porras, I. (2018). Economic evaluation of mechanical harvesting of lemons. *Outlook on Agriculture*, 47(1), 44–50. <https://doi.org/10.1177/0030727018762657>
- Bunce, A., Volin, J. C., Miller, D. R., Parent, J., & Rudnicki, M. (2019). Determinants of tree sway frequency in temperate deciduous forests of the Northeast United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266-267, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.02>
- Burns, J. K., Buker, R. S., & Roka, F. M. (2005). Mechanical Harvesting Capacity in Sweet Orange Is Increased with an Abscission Agent. *HortTechnology*, 15(4), 758–765. <https://doi.org/10.21273/horttech.15.4.0758>
- Burns, J. K., Roka, F. M., Li, K. T., Pozo, L., & Buker, R. S. (2006). Late-season 'Valencia' Orange Mechanical Harvesting with an Abscission Agent and Low-frequency Harvesting. *HortScience*, 41(3), 660–663. <https://doi.org/10.21273/hortsci.41.3.660>
- Camposeo, S., Ferrara, G., Palasciano, M., & A. Godini (2008). Varietal behavior according to the superintensive olive culture training system. *Acta Horticulturae*, 791, 271–274.
- Camposeo, S., Vivaldi, G. A., & Gattullo, C. E. (2013). Ripening indices and harvesting times of different olive cultivars for continuous harvest. *Scientia Horticulturae*, 151, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.019>
- Caprara, C., & Pezzi, F. (2011). Measuring the stresses transmitted during mechanical grape harvesting. *Biosystems Engineering*, 110(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.003>
- Caruso, T., Campisi, G., Marra, F., Camposeo, S., Vivaldi, G., Proietti, P., & Nasini, L. (2014). Growth and yields of «Arbequina» high-density planting systems in three different olive growing areas in Italy. *Acta Horticulturae*, 1057, 341–348. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1057.40>
- Cassia, M. T., Silva, R. P. D., Chioderolli, C. A., Noronha, R. H. F., & Santos, E. P. D. (2012). Quality of mechanized coffee harvesting in circular planting system. *Ciência Rural*, 43(1), 28–34. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782012005000148>
- Castillo-Ruiz, F. J., Jiménez, F. J., Blanco-Roldan, G. L., Sola-Guirado, R. R., Vega, J. A., & Castro-García, S. (2015). Analysis of fruit and oil quantity and quality distribution in high-density olive trees in order to improve the mechanical harvesting process. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(2), 9.
- Castillo-Ruiz, F., Sola-Guirado, R., Castro-García, S., Gonzalez-Sanchez, E., Colmenero-Martinez, J., & Blanco-Roldán, G. (2017). Pruning systems to adapt traditional olive orchards to new integral harvesters. *Scientia Horticulturae*, 220, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.043>



- Castro-García, S., Blanco-Roldán, G., Ferguson, L., González-Sánchez, E., & Gil-Ribes, J. (2017). Frequency response of late-season 'Valencia' orange to selective harvesting by vibration for juice industry. *Biosystems Engineering*, *155*, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.012>
- Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., & Gil-Ribes, J. A. (2011). Frequency response of *Pinus Pinea* L. for selective cone harvesting by vibration. *Trees*, *25*(5), 801–808. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0556-8>
- Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., Gil-Ribes, J. A., & Agüera-Vega, J. (2008). Dynamic analysis of olive trees in intensive orchards under forced vibration. *Trees*, *22*(6), 795–802. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0240-9>
- Castro-García, S., Castillo-Ruiz, F. J., Jimenez-Jimenez, F., Gil-Ribes, J. A., & Blanco-Roldan, G. L. (2015). Suitability of Spanish 'Manzanilla' table olive orchards for trunk shaker harvesting. *Biosystems Engineering*, *129*(0), 388-395.
- Castro-García, S., Rosa, U. A., Gliever, C. J., Smith, D., Burns, J. K., Krueger, W. H., Ferguson, L., & Glozer, K. (2009). Video Evaluation of Table Olive Damage during Harvest with a Canopy Shaker. *HortTechnology*, *19*(2), 260–266. <https://doi.org/10.21273/hortsci.19.2.260>
- Castro-García, S., Sola-Guirado, R. R., & Gil-Ribes, J. A. (2018). Vibration analysis of the fruit detachment process in late-season 'Valencia' orange with canopy shaker technology. *Biosystems Engineering*, *170*, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.007>
- Cherbiy-Hoffmann, S. U., Searles, P. S., Hall, A. J., & Rousseaux, M. C. (2012). Influence of light environment on yield determinants and components in large olive hedgerows following mechanical pruning in the subtropics of the Southern Hemisphere. *Scientia Horticulturae*, *137*, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.01.019>
- Ciftci, C., Brena, S. F., Kane, B., & Arwade, S. R. (2013). The effect of crown architecture on dynamic amplification factor of an open-grown sugar maple (*Acer saccharum* L.). *Trees*, *27*(4), 1175–1189. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0867-z>
- Connor, D. J. (2006). Towards optimal designs for hedgerow olive orchards. *Australian Journal of Agricultural Research*, *57*(10), 1067. <https://doi.org/10.1071/ar05448>
- Connor, D.J., Gómez-del-Campo, M., & Comas, J. (2012). Yield characteristics of N–S oriented olive hedgerows, cv. Arbequina. *Scientia Horticulturae*, *133*, 31–36.
- Connor, D. J., Gómez-del-Campo, M., Rousseaux, M. C., & Searles, P. S. (2014). Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards: A review. *Scientia Horticulturae*, *169*, 71–93. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.010>
- De la Rosa, R., León, L., Guerrero, N., Rallo, L., & Barranco, D. (2007). Preliminary results of an olive cultivar trial at high density. *Australian Journal of Agricultural Research*, *58*(5), 392. <https://doi.org/10.1071/ar06265>
- Dias, A. B., Falcão, J. M., Pinheiro, A., & Peça, J. O. (2020). Evaluation of Olive Pruning Effect on the Performance of the Row-Side Continuous Canopy Shaking Harvester in

- a High Density Olive Orchard. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01631>
- Diaz-Espejo, A., Buckley, T., Sperry, J., Cuevas, M., de Cires, A., Elsayed-Farag, S., Martin-Palomo, M., Muriel, J., Perez-Martin, A., Rodriguez-Dominguez, C., Rubio-Casal, A., Torres-Ruiz, J., & Fernández, J. (2012). Steps toward an improvement in process-based models of water use by fruit trees: A case study in olive. *Agricultural Water Management*, 114, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.027>
- Du, X., Chen, D., Zhang, Q., Scharf, P. A., & Whiting, M. D. (2012). Dynamic responses of sweet cherry trees under vibratory excitations. *Biosystems Engineering*, 111(3), 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.12.009>
- Du, X., Chen, D., Zhang, Q., Scharf, P. A., & Whiting, M. D. (2013). Response of UFO (upright fruiting offshoots) on cherry trees to mechanical harvest by dynamic vibratory excitation. *Transactions of the ASABE*, 56(2), 345-354.
- Du, X., Wu, C., He, L., & Tong, J. (2015). Dynamic characteristics of dwarf Chinese hickory trees under impact excitations for mechanical fruit harvesting. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(1), 17-25.
- Egea, G., Diaz-Espejo, A., & Fernández, J. E. (2016). Soil moisture dynamics in a hedgerow olive orchard under well-watered and deficit irrigation regimes: Assessment, prediction and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 164, 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.034>
- ESYRCE. (2017). *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos*. Recuperado 1 de abril de 2021, de [https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2017sm\\_tcm30-455983.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2017sm_tcm30-455983.pdf)
- European Commission. (s. f.). *Sustainable agriculture in the EU*. Recuperado 1 de abril de 2021, de <https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/sustainability>
- Evans, L.T. (2003). Agricultural Intensification and Sustainability. *Outlook on Agriculture*, 32(2), 83-89. <https://doi.org/10.5367/000000003101294316>
- Famiani, F., Farinelli, D., Rollo, S., Camposeo, S., Di Vaio, C., & Inglese, P. (2014). Evaluation of different mechanical fruit harvesting systems and oil quality in very large size olive trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4), 960-972.
- FAO. (2017, 22 febrero). *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. <http://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>
- FAOSTAT. (2019). *Food and Agriculture Data*. Recuperado 1 de abril de 2021, de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Farinelli, D., & Tombesi, S. (2015). Performance and oil quality of ‘Arbequina’ and four Italian olive cultivars under super high density hedgerow planting system cultivated in central Italy. *Scientia Horticulturae*, 192, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.04.035>
- Farinelli, D., Tombesi, S., Famiani, F., & Tombesi, A. (2012). The fruit detachment force/fruit weight ratio can be used to predict the harvesting yield and the efficiency

- of trunk shakers on mechanically harvested olives. *Acta Horticulturae*, 965, 61–64. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.965.5>
- Fereres, E., & Evans, R. G. (2005). Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrigation Science*, 24(2), 55–57. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0019-3>
- Ferguson, L., & Castro-Garcia, S. (2014). Transformation of an Ancient Crop: Preparing California ‘Manzanillo’ Table Olives for Mechanical Harvesting. *HortTechnology*, 24(3), 274–280. <https://doi.org/10.21273/horttech.24.3.274>
- Ferguson, L., Rosa, U., Castro-Garcia, S., Lee, S., Guinard, J., Burns, J., Krueger, J., O'Connell, N. V., & Glozer, K. (2010). Mechanical harvesting of California table and oil olives. *Advances in Horticultural Science*, 24(1), 53-63. <http://www.jstor.org/stable/42882754>
- Fernández, J. E., Perez-Martin, A., Torres-Ruiz, J. M., Cuevas, M. V., Rodriguez-Dominguez, C. M., Elsayed-Farag, S., Morales-Sillero, A., García, J. M., Hernandez-Santana, V., & Diaz-Espejo, A. (2013). A regulated deficit irrigation strategy for hedgerow olive orchards with high plant density. *Plant and Soil*, 372(1–2), 279–295. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1704-2>
- Fernández-Escobar, R., De la Rosa, R., León, L., Gomez, J. A., Testi, F., Orgaz, M., Gil-Ribes, J. A., Trapero, A. (2013). Evolution and sustainability of the olive production systems. *Present and future of the Mediterranean olive sector*, 11– 42.
- Ferreira Júnior, L. D. G., Silva, F. M. D., Ferreira, D. D., & Sales, R. S. (2015). Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastas derrçadoras. *Ciência Rural*, 46(2), 273–278. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141679>
- Fouché, J. R., Roberts, S. C., Midgley, S. J., & Steyn, W. J. (2010). Peel Color and Blemishes in ‘Granny Smith’ Apples in Relation to Canopy Light Environment. *HortScience*, 45(6), 899–905. <https://doi.org/10.21273/hortsci.45.6.899>
- Fregapane, G., Gómez-Rico, A., & Salvador, M. D. (2010). Influence of irrigation management and ripening on virgin olive oil quality and composition. In *Olives and olive oil in Health and Disease Prevention* (pp. 51-58). Academic Press.
- Giacosa, S., Marengo, F., Guidoni, S., Rolle, L., & Hunter, J. J. (2015). Anthocyanin yield and skin softening during maceration, as affected by vineyard row orientation and grape ripeness of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz. *Food Chemistry*, 174, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.155>
- Giametta, G., & Bernardi, B. (2010). Olive grove equipment technology. Straddling trees: Mechanized olive harvests. *Advances in Horticultural Science*, 24, 64-70.
- Gil-Sierra, J. (2015, 5 noviembre). *Recortadora de bajas* [Fotografía]. Poda y recolección mecanizada en el olivar superintensivo. <https://www.innovagri.es/wp-content/uploads/2015/11/02-FILEminimizer.jpg>
- Glozer, K. (2008). *Fruit Removal Force (FRF, Pull Force): Why and How Measure it* [Diapositivas]. University of California. <https://ucanr.edu/sites/fruittree/files/49318.pdf>

- Godini, A., Vivaldi, G.A., & Camposeo, S. (2011). Olive cultivars field-tested in super-high-density system in southern Italy. *California Agriculture*, 65(1), 39–40.
- Goldhamer, D. A., Viveros, M., & Salinas, M. (2005). Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science*, 24(2), 101–114. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0014-8>
- Gómez-del-Campo, M., & García, J. M. (2011). Canopy Fruit Location Can Affect Olive Oil Quality in 'Arbequina' Hedgerow Orchards. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(1), 123–133. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1900-2>
- Goren, R. (1993) Anatomical, physiological, and hormonal aspects of abscission in citrus. *Horticultural Reviews*, 15, 145-182.
- Gregoire. (s. f.). *Vendimiadora Gregoire G10.330* [Fotografía]. Vendimiadora Gregoire G10.330. <https://www.gregoire.fr/es-es/productos/aceitunas/358-g10-330>
- Guardiola, J. L., & García-Luis, A. (2000). Increasing fruit size in Citrus. Thinning and stimulation of fruit growth. *Plant Growth Regulation*, 31(1), 121-132.
- Gupta, S. K., Ehsani, R., & Kim, N.H. (2015). Optimization of a Citrus Canopy Shaker Harvesting System: Properties and modeling of tree limbs. *Transactions of the ASABE*, 58, 971–985.
- Gupta, S. K., Ehsani, R., & Kim, N. H. (2016). Optimization of a Citrus Canopy Shaker Harvesting System: Mechanistic Tree Damage and Fruit Detachment Models. *Transactions of the ASABE*, 59(4), 761–776. <https://doi.org/10.13031/trans.59.10819>
- Hartmond, U., Whitney, J., Burns, J., & Kender, W. (2000). Seasonal Variation in the Response of 'Valencia' Orange to Two Abscission Compounds. *HortScience*, 35(2), 226–229. <https://doi.org/10.21273/hortsci.35.2.226>
- Hong, M. Y., Rosa, U. A., & Upadhyaya, S. K. (2012). Optimum Operating Parameters for a Rotary Drum Shaker for Harvesting *Jatropha curcas* L. *Transactions of the ASABE*, 55(6), 2051–2058. <https://doi.org/10.13031/2013.42492>
- Horvath, E., & Sitkei, G. (2005). Damping properties of plum trees shaken at their trunks. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 19–25. <https://doi.org/10.13031/2013.17936>
- Hoshyarmanesh, H., Dastgerdi, H. R., Ghodsi, M., Khandan, R., & Zareinia, K. (2017). Numerical and experimental vibration analysis of olive tree for optimal mechanized harvesting efficiency and productivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 132, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.11.014>
- Hu, X. Y., Tao, W. M., & Guo, Y. M. (2008). Using FEM to predict tree motion in a wind field. *Journal of Zhejiang University e Science A*, 9(7), 907-915.
- Iglesias, D. J., Cercós, M., Colmenero-Flores, J. M., Naranjo, M. A., Ríos, G., Carrera, E., Ruiz-Rivero, O., Lliso, I., Morillon, R., Tadeo, F. R., & Talon, M. (2007). Physiology of citrus fruiting. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 333–362. <https://doi.org/10.1590/s1677-04202007000400006>

- Iglesias, D. J., Tadeo, F. R., Primo-Millo, E., & Talon, M. (2003). Fruit set dependence on carbohydrate availability in citrus trees. *Tree Physiology*, 23(3), 199–204. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.3.199>
- Jackson, T., Shenkin, A., Wellpott, A., Calders, K., Origo, N., Disney, M., Burt, A., Raumonon, P., Gardiner, B., Herold, M., Fourcaud, T., & Malhi, Y. (2019). Finite element analysis of trees in the wind based on terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.014>
- Jagels, R., Equiza, M. A., Maguire, D. A., & Cirelli, D. (2018). Do tall tree species have higher relative stiffness than shorter species? *American Journal of Botany*, 105(10), 1617–1630. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1171>
- James, K. R., Dahle, G. A., Grabosky, J., Kane, B., & Detter, A. (2014). Tree biomechanics literature review: Dynamics. *Arboriculture and Urban Forestry*, 40(1), 1-15.
- James, K. R., Haritos, N., & Ades, P. K. (2006). Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany*, 93(10), 1522–1530. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1522>
- [Junta de Andalucía. Costes medios de producción. Campaña 2016–17. Disponible online: http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio](http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio) (acceso el 1 de Abril del 2021).
- Kovacic, I., Radomirovic, D., & Zukovic, M. (2018). Tree vibrations: Determining oscillatory properties by using infra-red marker-tracking system. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.010>
- Ladaniya, M. S. (2008). Chapter 8: Harvesting. *Citrus Fruit*. Academic Press.
- Lavee, S., Haskal, A., & Avidan, B. (2012). The effect of planting distances and tree shape on yield and harvest efficiency of cv. Manzanillo table olives. *Scientia Horticulturae*, 142, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.010>
- Lazzaro, L., Otto, S., & Zanin, G. (2008). Role of hedgerows in intercepting spray drift: Evaluation and modelling of the effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(4), 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.009>
- Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2018). Applying precision triaxial accelerometer to monitor branch sway of an urban tree in a tropical cyclone. *Landscape and Urban Planning*, 178, 170-182.
- León, L., De la Rosa, R., Rallo, L., Guerrero, N., & Barranco, D. (2007). Influence of spacing on the initial production of hedgerow ‘Arbequina’ olive orchards. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(4), 554. <https://doi.org/10.5424/sjar/2007054-5358>
- Li, X., Kitajima, A., Kataoka, K., Takisawa, R., & Nakazaki, T. (2017). Anatomical Observations of the Citrus Fruit Abscission Zone and Morphological Changes of the Cells during Secondary Physiological Fruit Drop. *The Horticulture Journal*, 86(4), 447–455. <https://doi.org/10.2503/hortj.okd-054>
- Liu, T. H., Ehsani, R., Toudeshki, A., Zou, X. J., & Wang, H. J. (2017). Experimental Study of Vibrational Acceleration Spread and Comparison Using Three Citrus Canopy

- Shaker Shaking Tines. *Shock and Vibration*, 2017, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/9827926>
- Liu, T. H., Luo, G., Ehsani, R., Toudeshki, A., Zou, X. J., & Wang, H. J. (2018). Simulation study on the effects of tine-shaking frequency and penetrating depth on fruit detachment for citrus canopy-shaker harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 148, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.004>
- Maia, J., Boteta, L., Guerreiro, C., Infante, J., Dias, A.B., Pinheiro, A., Picarra, I., Figueira, M., & Peca, J.O. (2008). Adaptability of Portuguese *Olea europaea* varieties to super high density production system. *The Sixth International Symposium on Olive Growing*, 183, Evora, Portugal, Sept. 9–13.
- Mazoyer, M., Roudart, L., & Membrez, J. H. (2006). *A History of World Agriculture*. Amsterdam University Press.
- Mehouachi, J., Iglesias, D., Tadeo, F., Agustí, M., Primo-Millo, E., & Talon, M. (2000). The role of leaves in citrus fruitlet abscission: Effects on endogenous gibberellin levels and carbohydrate content. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 75(1), 79–85. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511204>
- Mehouachi, J., Serna, D., Zaragoza, S., Agusti, M., Talon, M., & Primo-Millo, E. (1995). Defoliation increases fruit abscission and reduces carbohydrate levels in developing fruits and woody tissues of Citrus unshiu. *Plant Science*, 107(2), 189–197. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(95\)04111-7](https://doi.org/10.1016/0168-9452(95)04111-7)
- Merelo, P., Agustí, J., Arbona, V., Costa, M. L., Estornell, L. H., Gómez-Cadenas, A., Coimbra, S., Gómez, M. D., Pérez-Amador, M. A., Domingo, C., Talón, M., & Tadeo, F. R. (2017). Cell Wall Remodeling in Abscission Zone Cells during Ethylene-Promoted Fruit Abscission in Citrus. *Frontiers in Plant Science*, 8(126). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00126>
- Miesbauer, J. W., Gilman, E. F., & Giurcanu, M. (2014). Effects of tree crown structure on dynamic properties of Acer rubrum L. 'Florida Flame'. *Arboriculture and Urban Forestry*, 40(4), 218-229.
- Millán, S., Campillo, C., Casadesús, J., Pérez-Rodríguez, J. M., & Prieto, M. H. (2020). Automatic Irrigation Scheduling on a Hedgerow Olive Orchard Using an Algorithm of Water Balance Readjusted with Soil Moisture Sensors. *Sensors*, 20(9), 2526. <https://doi.org/10.3390/s20092526>
- Moore, J. R., & Maguire, D. A. (2004). Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees - Structure and Function*, 18(2), 195–203. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0295-6>
- Moore, J. R., & Maguire, D. A. (2005). Natural sway frequencies and damping ratios of trees: influence of crown structure. *Trees*, 19(4), 363–373. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0387-y>
- Morales-Sillero, A., Rallo, P., Jiménez, M. R., Casanova, L., & Suárez, M. P. (2014). Suitability of Two Table Olive Cultivars ('Manzanilla de Sevilla' and 'Manzanilla

- Cacereña') for Mechanical Harvesting in Superhigh-density Hedgerows. *HortScience*, 49(8), 1028–1033. <https://doi.org/10.21273/hortsci.49.8.1028>
- Moreno, R., Torregrosa, A., Moltó, E., & Chueca, P. (2015). Effect of harvesting with a trunk shaker and an abscission chemical on fruit detachment and defoliation of citrus grown under Mediterranean conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(1), e0206. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015131-6590>
- Mika, A., Buler, Z., Rabcewicz, J., Białkowski, P., & Konopacka, D. (2015). Suitability Of Plum And Prune Cultivars, Grown In A High Density Planting System, For Mechanical Harvesting With A Canopy Contact, Straddle Harvester. *Journal of Horticultural Research*, 23(2), 69–81. <https://doi.org/10.2478/johr-2015-0017>
- Mika, A., Wawrzyńzak, P., Buler, Z., Konopacka, D., Konopacki, P., Krawiec, A., Białkowski, P., Michalska, B., Plaskota, M., & Gotowicki, B. (2012). Mechanical harvesting of plums for processing with a continuously moving combine harvester. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 20(1), 29–42. <https://doi.org/10.2478/v10290-012-0003-y>
- Mika A., Wawrzyńzak P., Buler Z., Krawiec A., Białkowski, P., Michalska, B., Plaskota, M., Gotowicki, B. (2011) Results of experiments with densely-planted sour cherry trees for harvesting with a continuously moving combine harvester. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 19(2), 31–40
- Msallem, M., Larbi, A., Ayadi, M., Ben Dhiab, A., & Caballero, J.M. (2008). Influence of planting densities on the behavior of 'Arbequina' olive variety. *The Sixth International Symposium on Olive Growing*, 181, Evora, Portugal, Sept. 9–13.
- Naylor, A. P., Creasy, G. L., Trought, M. C., & Van Hanen, L. (2000). The effects of row orientation and fruit exposure on the juice composition of Sauvignon blanc (*Vitis vinifera* L.). *Proceedings 5th International Symposium on Cool Climate Viticulture and Oenology*, 16–20 January, Melbourne, Australia.
- Netsvetov, M., & Nikulina, V. (2010). Seasonal variations of oscillation and vibration parameters of acer platanoides. *Dendrobiology*, 64, 37-42.
- New Holland. (s. f.). *BRAUD 9090X OLIVAR* [Fotografía]. Vendimiadoras BRAUD 9090X OLIVAR. <https://assets.cnhindustrial.com/nhag/eu/assets/Grape/new-braud-9090x-olive/Features/overview/braud-9090x-olive-l-eccellenza-reinventata.jpg>
- Niklas, K. J. (1992). *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and functions*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Olesen, T., Morris, S., & McFadyen, L. (2007). Modelling the interception of photosynthetically active radiation by evergreen subtropical hedgerows. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(3), 215. <https://doi.org/10.1071/ar06110>
- Oliphant, A., Susan, C., Grimmond, B., Schmid, H., & Wayson, C. (2006). Local-scale heterogeneity of photosynthetically active radiation (PAR), absorbed PAR and net radiation as a function of topography, sky conditions and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 103(3), 324–337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.09.021>

- Olsson, V., & Butenko, M. A. (2018). Abscission in plants. *Current Biology*, 28(8), R338-R339. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.02.069>
- ONU. (s. f.). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations - Department of Economic and Social Affairs. Recuperado 1 de abril de 2021, de <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Oyarzun, R. A., Stöckle, C. O., & Whiting, M. D. (2007). A simple approach to modeling radiation interception by fruit-tree orchards. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142(1), 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.004>
- Padilla-Díaz, C., Rodríguez-Dominguez, C., Hernández-Santana, V., Pérez-Martin, A., & Fernández, J. (2016). Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agricultural Water Management*, 164, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.002>
- Pastor, M., García-Vila, M., Soriano, M., Vega, V., & Fereres, V. (2007). Productivity of olive orchards in response to tree density. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 82(4), 555–562. <https://doi.org/10.1080/14620316.2007.11512273>
- Pellenc. (s. f.). *Recolección de las olivas en plantaciones súper intensivas* [Fotografía]. Cosechadora arrastrada de aceitunas CV5045. <https://pellenc.com/agri/wp-content/uploads/sites/12/2016/05/Pellenc-Tractee-Olive-Super-Intensif-Vrt.jpg>
- Pérez-Ruiz, M., Rallo, P., Jiménez, M., Garrido-Izard, M., Suárez, M., Casanova, L., Valero, C., Martínez-Guanter, J., & Morales-Sillero, A. (2018). Evaluation of Over-The-Row Harvester Damage in a Super-High-Density Olive Orchard Using On-Board Sensing Techniques. *Sensors*, 18(4), 1242. <https://doi.org/10.3390/s18041242>
- Peterson, D. L. (1998) Mechanical harvester for process oranges. *Applied Engineering in Agriculture*, 14(5), 455–458. <https://doi.org/10.13031/2013.19409>
- Pezzi, F., & Caprara, C. (2009). Mechanical grape harvesting: Investigation of the transmission of vibrations. *Biosystems Engineering*, 103(3), 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.002>
- Polat, R., Gezer, I., Guner, M., Dursun, E., Erdogan, D., & Bilim, H. C. (2007). Mechanical harvesting of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1131–1135. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.023>
- Policarpo, M., Talluto, G., & Bianco, R. L. (2006). Vegetative and productive responses of 'Conference' and 'Williams' pear trees planted at different in-row spacings. *Scientia Horticulturae*, 109(4), 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.06.009>
- Pozo, L., A. Malladi, K.-J. John-Karupppiah, Y. Lluch, F. Alferez & J. K. Burns (2007) Daily Fluctuation in Fruit Detachment Force of 'Valencia' Orange Is related to Time of Day, Temperature, Relative Humidity, Fruit Weight, and Juice Percentage. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 120, 41-44.
- Pretty, J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science*, 362(6417). <https://doi.org/10.1126/science.aav0294>
- Proietti, P., Nasini, L., Ilarioni, L.L., & Balduccini, A.M. (2011). Photosynthesis and vegetative—Productive activities of the olive cultivars 'Arbequina', 'Leccino' and



- 'Maurino' in a very high density olive grove in central Italy. *Acta Horticulturae*, 924, 111–116.
- Pu, Y., Toudeshki, A., Ehsani, R., Yang, F., & Abdulridha, J. (2018). Selection and experimental evaluation of shaking rods of canopy shaker to reduce tree damage for citrus mechanical harvesting. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 48–54. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181102.4126>
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rallo, L., Barranco, D., Castro-García, S., Connor, D. J., Gómez del Campo, M., & Rallo, P. (2013). High-Density Olive Plantations. *Horticultural Reviews Volume 41*, 303–384. <https://doi.org/10.1002/9781118707418.ch07>
- Rao, S.S. (2004). Chapter 10: Vibration Measurement and Applications. *Mechanical vibrations* (4th Ed.). New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Ravetti, L., & Robb, S. (2010). Continuous mechanical harvesting in modern Australian olive growing systems. *Advances in Horticultural Science*, 24(1), 71–77.
- Real Academia Española. (s.f.). Árbol. En *Diccionario de la lengua española*. <https://dle.rae.es/árbol> (accedido el 1 de Abril de 2021).
- Rehman, M., Singh, Z., & Khurshid, T. (2018). Pre-harvest spray application of prohexadione-calcium and paclobutrazol improves rind colour and regulates fruit quality in M7 Navel oranges. *Scientia Horticulturae*, 234, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.018>
- Reiland, M., Kane, B., Modarres-Sadeghi, Y., & Ryan, H. D. P. (2015). The effect of cables and leaves on the dynamic properties of red oak (*Quercus rubra*) with co-dominant stems. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 844–850. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.010>
- Rieger, M. (2006). Introduction to Fruit Crops. Taylor & Francis.
- Rius, X., & Lacarte, J. M. (2010). La revolución del olivar: El cultivo en seto. *Comografic, SA Barcelona, Spain*.
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Wetterstrand, H., DeClerck, F., Shah, M., Steduto, P., de Fraiture, C., Hatibu, N., Unver, O., Bird, J., Sibanda, L., & Smith, J. (2016). Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*, 46(1), 4–17. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>
- Rodriguez, M., de Langre, E., & Moulia, B. (2008). A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization. *American Journal of Botany*, 95(12), 1523-1537.
- Roka, F., & Hyman, B. (2012). Mechanical harvesting of sweet oranges for juice processing. *Acta Horticulturae*, 965, 241–243. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.965.32>

- Roka, F., Ehsani, R., & Spann, T. (2012). Harvest debris and cost implications for mechanical harvesting. *Acta Horticulturae*, 965, 159–160. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.965.20>
- Roka, F. M., Burns, J.K., & Buker, R.S. (2005). Mechanical harvesting without abscission agents-Yield impacts on late season 'Valencia' oranges. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 118, 25–27.
- Roka, F. M., Ehsani, R. J., Futch, S. H., & Hyman, B. R. (2014). Citrus mechanical harvesting systems - Continuous canopy shakers. Florida: Food and Economic Resources Department, UF/IFAS Extension.
- Rondanini, D.P., Castro, D.N., Searles, P.S., & Rousseaux, M.C. (2011). Fatty acid profiles of varietal virgin olive oils (*Olea europaea* L.) from mature orchards in warm arid valleys of Northwestern Argentina (La Rioja). *Grasas Aceites*, 62, 399–409.
- Sanders, K. (2005). Orange Harvesting Systems Review. *Biosystems Engineering*, 90(2), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.10.006>
- Savary, S. K. J. U., Ehsani, R., Schueller, J. K., & Rajaraman, B. P. (2010). Simulation Study of Citrus Tree Canopy Motion During Harvesting Using a Canopy Shaker. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1373–1381. <https://doi.org/10.13031/2013.34892>
- Savary, S. U., Ehsani, R., Salyani, M., Hebel, M., & Bora, G. (2011). Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(1), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.005>
- Schindler, D., Vogt, R., Fugmann, H., Rodriguez, M., Schönborn, J., & Mayer, H. (2010). Vibration behavior of plantation-grown Scots pine trees in response to wind excitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7–8), 984–993. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.03.003>
- Schupp, J., Baugher, T. A., Miller, S., Harsh, R., & Lesser, K. (2008). Mechanical Thinning of Peach and Apple Trees Reduces Labor Input and Increases Fruit Size. *HortTechnology*, 18(4), 660–670. <https://doi.org/10.21273/horttech.18.4.660>
- Sellier, D., Fourcaud, T., & Lac, P. (2006). A finite element model for investigating effects of aerial architecture on tree oscillations. *Tree Physiology*, 26(6), 799–806. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.6.799>
- Sessiz, A., & Özcan, M. (2006). Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical. *Journal of Food Engineering*, 76(2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.002>
- Sola-Guirado, R. R., Bernardi, B., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., Benalia, S., Fazari, A., Brescia, A., & Zimbalatti, G. (2018). Assessment of aerial and underground vibration transmission in mechanically trunk shaken olive trees. *Journal of Agricultural Engineering*, 49(3), 191–197. <https://doi.org/10.4081/jae.2018.788>
- Sola-Guirado, R. R., Blanco-Roldan, G. L., Castro-Garcia, S., Castillo-Ruiz, J. F., & A. Gil-Ribes, J. (2018). An innovative circular path harvester for mechanical harvesting of irregular, large-canopy olive trees. *International Journal of Agricultural and*

*Biological Engineering*, 11(3), 86–93.  
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3265>

- Sola-Guirado, R. R., Castro-García, S., Blanco-Roldán, G. L., Jiménez-Jiménez, F., Castillo-Ruiz, F. J., & Gil-Ribes, J. A. (2014). Traditional olive tree response to oil olive harvesting technologies. *Biosystems Engineering*, 118, 186–193.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.12.007>
- Sola-Guirado, R. R., Ceular-Ortiz, D., & Gil-Ribes, J. A. (2017). Automated system for real time tree canopy contact with canopy shakers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.011>
- Sola-Guirado, R. R., Jimenez-Jimenez, F., Blanco-Roldan, G. L., Castro-Garcia, S., Castillo-Ruiz, F. J., & Gil-Ribes, J. A. (2016). Vibration parameters assessment to develop a continuous lateral canopy shaker for mechanical harvesting of traditional olive trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(2), e0204.  
<https://doi.org/10.5424/sjar/2016142-7909>
- Spann, T. M., & Danyluk, M. D. (2010). Mechanical Harvesting Increases Leaf and Stem Debris in Loads of Mechanically Harvested Citrus Fruit. *HortScience*, 45(8), 1297–1300. <https://doi.org/10.21273/hortsci.45.8.1297>
- Spatz, H. C., Bruchert, F., & Pfisterer, J. (2007). Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations? *American Journal of Botany*, 94(10), 1603–1611. <https://doi.org/10.3732/ajb.94.10.1603>
- Spatz, H. C., & Theckes, B. (2013). Oscillation damping in trees. *Plant Science*, 207, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.02.015>
- Speck, O., & Spatz, H. C. (2004). Damped oscillations of the giant reed *Arundo donax* (Poaceae). *American Journal of Botany*, 91(6), 789–796.  
<https://doi.org/10.3732/ajb.91.6.789>
- Strik, B. C., & Cahn, H. K. (1999). Pruning and Training Affect Yield but Not Machine Harvest Efficiency of 'Meeker' Red Raspberry. *HortScience*, 34(4), 611–614. <https://doi.org/10.21273/hortsci.34.4.611>
- Sun, J., Wang, M., Lyu, M., Niklas, K. J., Zhong, Q., Li, M., & Cheng, D. (2019). Stem Diameter (and Not Length) Limits Twig Leaf Biomass. *Frontiers in Plant Science*, 10, 185. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00185>
- Takeda, F., Yang, W., Li, C., Freivalds, A., Sung, K., Xu, R., Hu, B., Williamson, J., & Sargent, S. (2017). Applying New Technologies to Transform Blueberry Harvesting. *Agronomy*, 7(2), 33. <https://doi.org/10.3390/agronomy7020033>
- Thirtle, C., Beyers, L., Lin, L., McKenzie-Hill, V., Irz, X., Wiggins, S., & Piesse, J. (2002). The impact of changes in agricultural productivity on the incidence of poverty in developing countries. *DFID Report No. 7946*, London.
- Théckès, B., Boutillon, X., & de Langre, E. (2015). On the efficiency and robustness of damping by branching. *Journal of Sound and Vibration*, 357, 35–50.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.018>

- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Todolivo. (2016, 27 enero). *Espectaculares imágenes de recolección en pendientes* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=djW4XfohBDU>
- Tognetti, R., d'Andria, R., Lavini, A., & Morelli, G. (2006). The effect of deficit irrigation on crop yield and vegetative development of *Olea europaea* L. (cvs. Frantoio and Leccino). *European Journal of Agronomy*, 25(4), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.07.003>
- Tognetti R, Giovanelli A, Lavini A, Morelli G, Fragnito F, d'Andria R (2009) Assessing environmental controls over conductances through the soil-plant-atmosphere continuum in an experimental olive tree plantation of southern Italy. *Agric For Meteorol* 149:1229–1243
- Tombesi, S., & Farinelli, D. (2014). Evaluation of canopy elasticity, light penetration and reciprocal shading for optimal canopy management in high density hedgerow olive orchards. *Acta Horticulturae*, 1057, 315–320. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1057.36>
- Tombesi, S., & Farinelli, D. (2017). Canopy management in super high-density olive orchards: relationship between canopy light penetration, canopy size and productivity. *Acta Horticulturae*, 1177, 87–92. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2017.1177.9>
- Tombesi, S., Poni, S., Palliotti, A., & Farinelli, D. (2017). Mechanical vibration transmission and harvesting effectiveness is affected by the presence of branch suckers in olive trees. *Biosystems Engineering*, 158, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.03.010>
- Torregrosa, A., Ortí, E., Martín, B., Gil, J., & Ortiz, C. (2009). Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain. *Biosystems Engineering*, 104(1), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.005>
- Torregrosa, A., Porras, I., & Martín, B. (2010) Mechanical Harvesting of Lemons (cv. Fino) in Spain Using Abscission Agents. *Transactions of the ASABE*, 53(3), 703–708. <https://doi.org/10.13031/2013.30062>
- Tous, J., Romero, A., & Hermoso, J., (2010). New trends in olive orchard design for continuous mechanical harvesting. *Advances in Horticultural Science*, 24, 43–52.
- Tous, J., Romero, A., Hermoso, J., Msallem, M., & Larbi, A. (2014). Olive orchard design and mechanization: present and future. *Acta Horticulturae*, 1057, 231–246. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2014.1057.27>
- Tous, J., Romero, A., Plana, J., & Hermoso, F.J. (2005). Ensayo de densidades altas de plantación en la variedad de olivo 'Arbequina'. *V Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas* 2:596–601.
- Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Batlles, J., López, G., & Bosch, J. L. (2006). On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in

- areas of complex topography. *Meteorological Applications*, 13(03), 279. <https://doi.org/10.1017/s1350482706002258>
- Trentacoste, E. R., Calderón, F. J., Puertas, C. M., Banco, A. P., Contreras-Zanessi, O., Galarza, W., & Connor, D. J. (2018). Vegetative structure and distribution of oil yield components and fruit characteristics within olive hedgerows (cv. Arbosana) mechanically pruned annually on alternating sides in San Juan, Argentina. *Scientia Horticulturae*, 240, 425–429. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.045>
- Trentacoste, E. R., Connor, D. J., & Gómez-del-Campo, M. (2015). Row orientation: Applications to productivity and design of hedgerows in horticultural and olive orchards. *Scientia Horticulturae*, 187, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.032>
- UE. (s. f.). *El Pacto Verde Europeo*. EUR-Lex. Recuperado 1 de abril de 2021, de [https://ec.europa.eu/info/files/communication-european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/files/communication-european-green-deal_en)
- Vallone, M., Alleri, M., Bono, F., & Catania, P. (2017). Acceleration assessment during mechanical harvest of grapes using a non-commercial instrumented sphere. *Chemical Engineering Transactions*, 58, 277–282. <https://doi.org/10.3303/CET1758047>
- Verreyne, J. S., Rabe, E., & Theron, K. I. (2004). Effect of bearing position on fruit quality of mandarin types. *South African Journal of Plant and Soil*, 21(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/02571862.2004.10635014>
- Vieri, M., & Sarri, D. (2010). Criteria for introducing mechanical harvesting of oil olives: results of a five-year project in Central Italy. *Advances in Horticultural Science*, 24(1), 78-90.
- Vivaldi, G., Strippoli, G., Pascuzzi, S., Stellacci, A., & Camposeo, S. (2015). Olive genotypes cultivated in an adult high-density orchard respond differently to canopy restraining by mechanical and manual pruning. *Scientia Horticulturae*, 192, 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.004>
- Whitney, J.D. (1999). Field test results with mechanical harvesting equipment in florida oranges. *Applied Engineering in Agriculture*, 15(3), 205–210. <https://doi.org/10.13031/2013.5766>
- Whitney, J.D., & Wheaton, T.A. (1984). Tree spacing affects citrus fruit distribution and yield. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 97, 44–47.
- Whitney, J. D., BenSalem, E. E., & Salyani, M. (2001). The effect of trunk shaker patterns on Florida orange removal. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(4), 461-464.
- Whitney, J. D., Hedden, S. L., & Sumner, H. R. (1974). Harvesting 'Valencia' oranges with a vertical foliage shaker. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 86, 41–48
- Wu, J. S., & Lin, T. L. (1990). Free vibration analysis of a uniform cantilever beam with point masses by an analytical-andnumerical-combined method. *Journal of Sound and Vibration*, 136(2), 201-213.

- Yang, L., Yang, M., & Yang, G. (2019). Modeling fractures and cracks on tree branches. *Computers & Graphics*, *80*, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2019.03.006>.
- Yu, P., Li, C., Takeda, F., Krewer, G., Rains, G., & Hamrita, T. (2014). Measurement of mechanical impacts created by rotary, slapper, and sway blueberry mechanical harvesters. *Computers and Electronics in Agriculture*, *101*, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.12.001>
- Yuan, R., Alferez, F., Kostenyuk, I., Singh, S., Syvertsen, J. P., & Burns, J. K. (2005). Partial Defoliation Can Decrease Average Leaf Size but Has Little Effect on Orange Tree Growth, Fruit Yield and Juice Quality. *HortScience*, *40*(7), 2011–2015. <https://doi.org/10.21273/hortsci.40.7.2011>
- Zhenzhen, W., Za, K., Wei, F., Chengsong, L., Xingliang, Z., & Lihong, W. (2016). The Design and Analysis of Canopy Shaker Device for Walnut. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, *08*.
- Zhou, J., He, L., Karkee, M., & Zhang, Q. (2016). Analysis of shaking-induced cherry fruit motion and damage. *Biosystems Engineering*, *144*, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.007>


# Anexos

# Anexo I. Vibration Monitoring of the Mechanical Harvesting of Citrus to Improve Fruit Detachment Efficiency



Article

## Vibration Monitoring of the Mechanical Harvesting of Citrus to Improve Fruit Detachment Efficiency

Sergio Castro-García <sup>1,\*</sup> , Fernando Aragon-Rodriguez <sup>1</sup>, Rafael R. Sola-Guirado <sup>1</sup>, Antonio J. Serrano <sup>2</sup>, Emilio Soria-Olivas <sup>2</sup> and Jesús A. Gil-Ribes <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Rural Engineering, Universidad de Cordoba, 14004 Cordoba, Spain; g92arrof@uco.es (F.A.-R.); ir2sogur@uco.es (R.R.S.-G.); gilribes@uco.es (J.A.G.-R.)

<sup>2</sup> IDAL, Intelligent Data Analysis Laboratory, Universidad de Valencia, 46100 Valencia, Spain; ajserran@uv.es (A.J.S.); emilio.soria@uv.es (E.S.-O.)

\* Correspondence: scastro@uco.es; Tel.: +34-957-218-548

Received: 13 March 2019; Accepted: 9 April 2019; Published: 12 April 2019



**Abstract:** The introduction of a mechanical harvesting process for oranges can contribute to enhancing farm profitability and reducing labour dependency. The objective of this work is to determine the spread of the vibration in citrus tree canopies to establish recommendations to reach high values of fruit detachment efficiency and eliminate the need for subsequent hand-harvesting processes. Field tests were carried out with a lateral tractor-drawn canopy shaker on four commercial plots of sweet oranges. Canopy vibration during the harvesting process was measured with a set of triaxial accelerometer sensors with a datalogger placed on 90 bearing branches. Monitoring of the vibration process, fruit production, and branch properties were analysed. The improvement of fruit detachment efficiency was possible if both the hedge tree and the machinery were mutually adjusted. The hedge should be trained to facilitate access of the rods and to encourage external fructification since the internal canopy branches showed 43% of the acceleration vibration level of the external branches. The machine should be adjusted to vibrate the branches at a vibration time of at least 5.8 s, after the interaction of the rod with the branch, together with a root mean square acceleration value of 23.9 m/s<sup>2</sup> to a complete process of fruit detachment.

**Keywords:** *Citrus sinensis* L. Osbeck; mechanical harvesting; acceleration sensor; vibration time; logistic regression

### 1. Introduction

Citrus fruits, whether for fresh consumption or industrial processing, are mainly harvested by hand. Worldwide, 147 million tonnes of citrus were produced in 2017, including orange, grapefruit, lemon, mandarin, and other citrus fruits [1]. Spain is the sixth largest producer of citrus fruit in the world, with an approximate production in 2017–2018 of more than seven million tonnes. In Spain, the predominant citrus orchards are trained for manual harvesting, with an orientation towards the fresh market. Manually harvested orchards experience problems due to the availability of labour and the high cost of operation.

Within the citrus production process, harvesting is a phase of enormous economic importance due to its high impact on the final cost of production. The manual harvesting in Southern Spain requires an average of 95 days' work per hectare and represents between 25% and 35% of the final cost of production [2]. Roka and Hyman [3] stated that, under Florida conditions, the application of mechanical harvesting for industrial processing could provide a 50% cost reduction, while increasing labour productivity by ten per cent. With the current approach to citrus production, the high costs of



manual harvesting could compromise the profitability of the activity and the future of plantations in the long term [4].

Since the 1970s, the development of mechanical citrus harvesting systems for the juice industry has mainly taken place in Florida. However, none of the mechanised systems have been able to match the flexibility and fruit selection capabilities of manual harvesting [5]. The foremost mechanical harvesting systems are the trunk and canopy shaker systems that were applied to and developed for citrus fruits, and which reach high values of harvesting efficiency ranging between 84–95% and 55–95%, respectively [6]. However, the detachment of immature fruitlets has been identified in both systems; this occurs particularly in the late varieties that are of special interest to the juice industry and, in addition to a reduction in the working capacity (ha/h), it could represent an obstacle to the adoption of these mechanical harvesting systems by farmers. Roka et al. [7] showed yield reduction values for the use of these machines compared to manual harvesting of 20–50% according to their use and regulation. In parallel, the development and testing of abscission agents have permitted an increase in the working capacity and an improvement in the detachment of mature fruit with these harvesting technologies [8]. It was shown that a moderate reduction in fruit detachment force, through the application of an abscission agent, was enough to significantly increase the harvesting efficiency [9]. Subsequently, it was demonstrated that the use of an abscission agent together with an adjustment of the vibration parameters, fundamentally time and frequency of vibration, allowed high percentages of mature fruit detachment to be achieved without significantly affecting the following season [10]. This result was confirmed based on the different frequency responses of mature fruit and immature fruitlets to mechanical harvesting [11].

Canopy shaker systems allow a continuous vibration of the tree row; the rods penetrate the canopy and achieve a high value of fruit detached in areas where there is direct contact of rods with branches. The use of a canopy shaker can generate a greater fall of leaves, shoots, and branches than manual harvesting. The fall of these organs is considered as tree damage, which could have negative implications in the yield, the productive life, and the cost of transport from the orchard to the industry [12]. For this reason, the improvement of these machines has been based on a dual objective; to increase the efficiency of mature fruit removal and to reduce the damage caused to trees. In order to improve the mechanical harvesting process, Savary et al. [13] developed a canopy shaker simulation based on finite element methods to predict and evaluate the interaction between the tree and the machine. Then, Savary et al. [14] evaluated the effect of vibration on the tree canopy according to the distribution of forces and accelerations in branches and fruits. Subsequently, machine improvement proposals were based on mathematical models and prototype tests with a combination of machine operating parameters such as frequency and amplitude of vibration [15,16], and the configuration and material of the rods [17]. The rods have been shown to play an essential role in the process of tree shaking, both in terms of fruit detachment and the possible generation of tree and fruit damage. Liu et al. [17] indicated that rod material affected the vibratory response of trees with respect to the acceleration peaks in branches. They recommended that the rods have high stiffness values, but that their surface should be smooth to reduce damage. The shape of the rods revealed that arc-shaped flexible rods had better performance with respect to fruit detachment efficiency and a lower rate of damage to trees than the free end rods [18]. In a further attempt to adapt the vibration process to tree requirements, Pu et al. [18] designed and tested a two-section independent shaker system in order to minimise tree damage and maximise harvesting efficiency. The adaptation of the machine to the variability of the tree canopy made it possible to reduce tree damage compared to other canopy shaker systems.

During the harvesting process, the machine rods penetrate the tree but do not usually reach all parts of the canopy, so vibration must be transmitted via the branches in order to detach the inner fruit. Whitney et al. [19] indicated that a greater fruit detachment efficiency value was obtained by harvesting smaller rather than larger canopy trees. Canopy shaker systems generally have a limited capacity to detach internal fruits from the tree and yet can remove almost all external fruits. The harvesting

process of fruit inside the canopy may cause damage to the outermost parts due to a reduction in machine ground speed or an increment in vibration frequency value and may also require additional manual harvesting.

This study works on the hypothesis that mechanised harvesting processes can be carried out with a high value of harvesting efficiency, where subsequent hand-harvesting is not necessary, and that the possible, but moderate tree damage does not affect the productive life of the orchard. The objective of this work is to analyse the interaction of the canopy shaker rods with the tree branches from the data collected continuously during the mechanical harvesting process of citrus trees. First, the fruit-bearing branches with and without direct contact with the machine rods were characterised in the position and production. Then, the canopy vibration process during mechanical harvesting was monitored. Finally, the vibration parameters necessary to detach the fruit were determined, and recommendations were given on the harvest parameters necessary to increase the fruit removal efficiency.

## 2. Materials and Methods

Mechanical harvest tests were carried out in Cordoba (Spain) in 2017 during the sweet orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck cv. Valencia) harvest season for juice production, during four weeks from the end of flowering to before the natural fall of immature fruitlets in June. Table 1 shows the main characteristics of the four, mechanically harvested citrus orchards. Trees had been planted in wide hedges over 0.4 m ridges and had wide row distances to allow machine manoeuvrability and the use of canopy shaker harvesters (Figure 1).

**Table 1.** Characteristics of citrus orchards mechanically harvested with the canopy shaker system.

	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4
Date planted	2006	2005	2007	2005
Plot area (ha)	54.7	38.0	33.1	57.3
Trees per ha	440	330	440	330
Tree distance (m)	7 × 3	7 × 4	7 × 3	7 × 4
Hedge height (m)	4.0	4.0	4.3	4.4
Hedge width (m)	3.9	4.1	4.5	4.6



**Figure 1.** Example of a tree row trained in width hedge for mechanised harvesting.

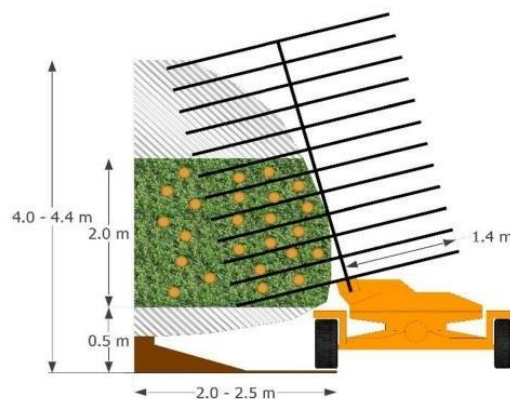
Mechanical harvesting was carried out with a lateral tractor-drawn continuous canopy shaker system (Oxbo 3210, Byron, New York, NY, USA), working under regular conditions, with a ground speed range between 1 and 1.5 km/h (0.28–0.42 m/s), and a vibration frequency close to 4.5 Hz, which caused the fruit to fall to the ground. Harvesting tests were carried out to ensure close contact of the shaker system with the tree canopy (Figure 2). The machine harvested both sides of the hedge in

independent passes, with an approximate working capacity of 0.4–0.5 ha/h. Subsequently, the fruit remaining in the canopy was hand-picked and collected together with the fruit from the ground and loaded into a container.



**Figure 2.** Lateral tractor-drawn continuous canopy shaker system (Oxbo, 3210) used in citrus harvesting tests. (a) front view before the harvesting process; (b) rear view after the harvesting process.

Interaction of the harvesting system with the tree canopy was studied for each side of the tree hedges (Figure 3). Because the tree hedges differed between orchards, a representative cross-section of the tree canopy was selected. The cross-section ranged from 4–5 m<sup>2</sup>, and was composed of a distance from the line of the trunks to the outside of the canopy of up to 2.0–2.5 m, and of a height ranging from 0.5–2.5 m. This cross-section was selected because it differentiated an external area of the canopy with direct contact of the machine rods with the branches, for a rod length of 1.4 m, and an internal area of the canopy without direct contact with the rods. Furthermore, the cross-section was representative of the tree canopy, with high yield, avoiding the effect of the lower pendulous branches and allowing analysis of the vibration process in a homogeneous canopy area between the tested plots. The cross-section was divided into 16–20 sectors according to the width of the hedge, at intervals of 0.5 m both horizontally and vertically. In each sector, the values of vibration, the properties of the branches, and the number of fruits were recorded. The canopy area that had direct contact with the rods was sampled with 10 sectors, while the canopy area without direct contact was sampled with 6 or 10 sectors.



**Figure 3.** Cross-section of the tree hedge and canopy areas with and without direct contact with the canopy shaker system rods.

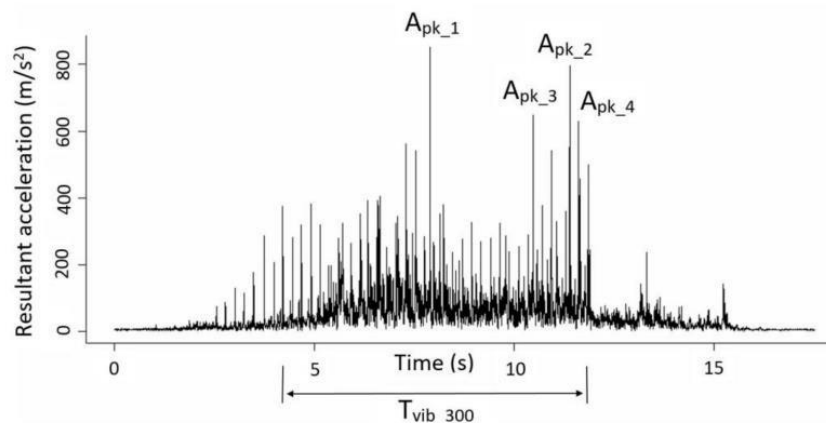
Before the mechanical harvesting process, a total of 90 fruit-bearing branches were selected that had mature fruit and were distributed in different sectors. The statistical design established a stratified random sampling, each cluster was a tested plot, and in each plot, 18–24 fruit-bearing branches were randomly selected. The sample guaranteed at least three measurements in each sector. Each branch was assigned a position value in the cross-section at a point close to the fruit that was able to support an acceleration sensor, but which had a diameter less than 10 mm. The fruit detachment ratio was determined by the number of fruits removed from each branch before and after the harvesting process.

Branch vibration measurements were recorded with a triaxial MEMS accelerometer sensor (Gulf Coast Data Concepts LLC X200-4, Waveland, MS, USA) with a measurement range of  $\pm 2000 \text{ m/s}^2$ , a 16-bit resolution, a sensitivity of  $0.06 \text{ m/s}^2$ , and a sampling frequency of 400 Hz. Figure 4 shows the placement of the sensor on the fruit-bearing branch.



**Figure 4.** Location of the acceleration sensor on a fruit-bearing branch on the outermost part of the canopy.

Analysis of the acceleration signals in the time domain and statistical analysis was performed using the R open software (R Core Team, 2016) and in the frequency domain using the NV Gate v8.0 software, with a fast Fourier transformation with 401 lines in a frequency range of 0–156.2 Hz. In the time domain, the resultant acceleration value ( $A_r$ ) was determined as the module of the vector sum of the three measurement axes in each sensor. Figure 5 shows a sample of  $A_r$  in a fruit-bearing branch.



**Figure 5.** Example of the resultant acceleration ( $A_r$ ) in the time domain measured in a fruit-bearing branch.  $T_{\text{vib}_300}$ —time elapsing between the first and the last event with an  $A_r$  value of  $300 \text{ m/s}^2$ ;  $A_{\text{pk}_n}$ — $n$  maximum peak value of  $A_r$ .

In the time domain, the vibration variables studied were:

- Vibration time ( $T_{\text{vib}}$ ): time (s) elapsing between the first and last value of  $A_r$  measured on the branch, ranging from  $A_r$  values of 20  $\text{m/s}^2$  up to 600  $\text{m/s}^2$ .
- Mean peak acceleration ( $A_{\text{pk}}$ ): the mean value of the 10 maximum peak values of  $A_r$  ( $\text{m/s}^2$ ) for  $T_{\text{vib}_20}$ .

In the frequency domain, the vibration variables studied were:

- Frequency: number of cycles per second (Hz) of rod movement in the canopy.
- RMS acceleration ( $A_{\text{RMS}}$ ): vector sum of the Root Mean Square values (RMS) of each accelerometer axis at the vibration frequency.

The statistical analysis focused on predicting the fruit detachment ratio according to the vibration variables and the branch measurements as the predicted parameters. Logistic regression was used with a K = 2-fold cross-validation method.

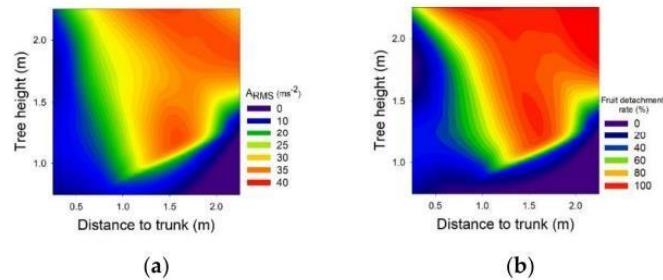
### 3. Results and Discussion

Most of the fruit (72.7%) was located in the canopy area that had direct contact with the rods, in the height range of 1–2 m from the ground, and in a range of 0.5–2 m from the trunk. Gupta et al. (2015) stated that the area with the highest fructification is in the primary branches of the intermediate zone of the canopy at a height of 1.14–2.29 m, and at a distance of 0.78–0.83 m from the canopy exterior. However, the distribution of fruit in the canopy also depends on planting distances and tree height. A reduced distance between trees can generate a greater percentage of fruit in the upper canopy parts but can reduce the number of fruits inside [19].

The diameter of the branch at the vibration measurement point was  $7.9 \pm 2.4$  mm (mean  $\pm$  sd), with a variation that ranged from 10.2 mm for the branches closest to the trunk and the ground to 5.53 mm for the outermost and tallest branches of the canopy. Each tested branch carried a mean value of  $3.7 \pm 1.8$  fruits. The results showed a high variability in the distribution of fruit in the canopy and in the morphology of the branches. This variability is important for the outcome of mechanical harvesting systems and was considered by Gupta et al. [15,16] for modelling the tree and simulating the harvesting process in order to improve the canopy shaker system. However, the current harvesting systems based on canopy shakers do not contemplate the variability of branches and fruit within the tree canopy. In an attempt to improve the machine adaptation to the tree, Pu et al. [18] designed and tested a canopy shaker system capable of applying different vibration parameters to the upper and lower parts of the tree. These authors showed the need to use different harvesting parameters and were able to achieve a high fruit detachment ratio (82.6%) with low tree damage.

Canopy shaker systems continuously harvest fruit as they move along the row of trees. Before the machine comes into contact with a branch, the branch may vibrate due to contact with other branches or due to the transmission of vibration from the trunk. Then, the branch vibrates due to contact with the machine rods, and finally, the branch vibrates freely when the machine has passed. Table 2 shows the results of this vibration process measured in branches, both in the canopy area with and without direct contact with the machine rods. In order to define the beginning and end of the vibration process, the acceleration values produced only by natural sources, mainly by wind and gravity, and without machine interaction were recorded. The vibration time where the branch was excited by the machine was defined as the time elapsing between resultant acceleration values greater than 18  $\text{m/s}^2$  ( $T_{\text{vib}_18}$ ). The average vibration time ( $T_{\text{vib}_18}$ ) of the branches was  $14.3 \pm 2.8$  s. No significant differences were found (Student's *t*,  $p > 0.05$ ) between the vibration time of the branches located in the canopy area with or without direct contact with rods. This indicated that all branches vibrated at the same time, but not all at the same level of acceleration. The length of the machine's shaking system, i.e., the length of the rods and drums, together with the machine ground speed, determined the vibration time during which

had very low acceleration values, whereas the acceleration values began to be noticeably higher from the first branch of the trunk region.



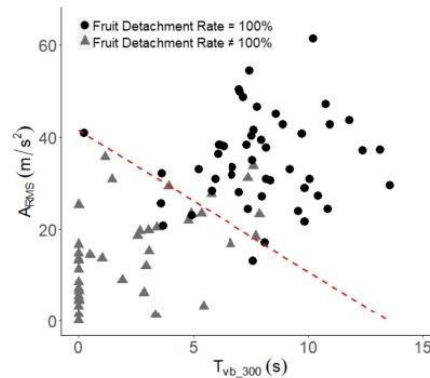
**Figure 6.** (a) Distribution of the  $A_{RMS}$  values ( $m/s^2$ ); and (b) fruit detachment rate (%) produced with a canopy shaker system and measured in fruit-bearing branches in the cross-section of the tree canopy.

The interaction of the rods with the branches was characterized by a succession of impacts with a high acceleration value in accordance with the vibration frequency of the machine. These impacts presented a mean  $A_{pk}$  value of  $495.1 \pm 270.9 m/s^2$ . Similarly to Figure 6, the  $A_{pk}$  values in branches with direct contact with rods ( $616.7 \pm 283.3 m/s^2$ ) were higher (Student's  $t$ ,  $p < 0.05$ ) than branches without direct contact ( $268.1 \pm 164.6 m/s^2$ ). The  $A_{pk}$  and  $A_{RMS}$  values showed a positive linear correlation (Pearson = 0.70,  $p < 0.05$ ) in the tree canopy. In both cases, the direct contact of the rod represented an increment of 2.3 times the acceleration values reached in the branch.

The canopy shaking system achieved a mean fruit detachment value of  $69.1 \pm 40.7\%$ . However, this variable presented high variability within the cross-section of the tree hedge (Figure 6). As expected, this variable reached its highest values in the branches with direct contact with rods. The fruit detachment ratio was reduced from an average value of  $84.7 \pm 30.5\%$  in branches with direct contact with rods to  $25.1 \pm 22.2\%$  for branches without direct contact. The fruit detachment value of 100% was reached in all branches located between 2 and 2.5 m in height. A similar result was reported by Whitney et al. [6] who found that working with small canopies that were accessible to rods achieved a fruit detachment of 96%, while wider canopies achieved reduced values of 55%. Savary et al. [14] reached a fruit detachment value of 88% on the outside of the canopy, while on the inside this figure was reduced to 57%. However, in order to improve the harvesting efficiency, it is not only necessary for the rod to penetrate the canopy, but also for it to interact with the branch. Liu et al. [17], analysing fruit detachment according to the point of contact of the rod with the branch, determined that the operation was more effective when the rod impacted at 30% of the distance to the free end of the branch.

The results obtained from the cross-section of the tree canopy have shown a high variability, both in vibration and in fruit values. Reducing this variability and improving the mechanised harvesting process requires knowledge of the requirements to detach fruit from the tree. The measurements in the canopy showed a high linear correlation between variables, which indicated that fruit detachment prediction could not have a single solution. Analysis of the data focused on the discretisation of quantitative variables that could discriminate whether there was a fruit detachment with a value of 100% and reasonable success. Due to its simplicity and efficiency, logistic regression was used.  $A_{RMS}$  and time elapsed between an acceleration greater than  $300 m/s^2$  ( $T_{vib_{300}}$ ) were significant variables to discriminate the events of 100% fruit detachment. The result was defined as a straight line that separates the conditions at which a fruit detachment of 100% was obtained with a precision measured as the area under the ROC curve of 0.95 in the validation set. Equation (1) shows the values obtained and Figure 7 is the graphical representation.

$$\ln\left(\frac{\text{Prob of complete fruit detachment}}{1 - \text{Prob of complete fruit detachment}}\right) = 7.13417 - 0.52754 T_{vib_{300}} - 0.17206 A_{RMS} \quad (1)$$



**Figure 7.** Distribution of the fruit detachment rate values according to  $A_{RMS}$  ( $m/s^2$ ) and  $T_{vib\_300}$  (s).

Currently, canopy shaker systems for citrus harvesting can employ various types of vibration systems, with variations in the frequency or amplitude of movement, different machine ground speeds or rods with different designs, or mechanical properties. In all cases, the machine produces a forced vibration of the branches with the aim of detaching fruit and avoiding major damage to the tree or fruit. Monitoring of the forced vibration process of the tree canopy showed that it was possible to achieve a 100% fruit detachment ratio based on a combination of acceleration levels and vibration times in branches (Figure 7). Under the conditions of the field tests performed, we propose a combination of a vibration time of at least 5.8 s, after the interaction of the rod with the branch ( $T_{vib\_300}$ ), together with an  $A_{RMS}$  value of  $23.9 m/s^2$ . With these harvest parameters, a complete process of fruit detachment was achieved in 88.9% of the branches tested. Although these values could be modified if another type of tree formation, citrus variety, or harvesting machine was considered, the fruit detachment process can be estimated by vibration time and branch acceleration. Both parameters are of great importance, not only for training trees to facilitate the rod penetration in the canopy but also for the design of new canopy shaker systems.

#### 4. Conclusions

The monitoring of the vibration process in the tree during mechanised harvesting with the canopy shaker showed a great variability in results depending on different parts of the canopy. Branches that had direct contact with the machine rods showed a higher mean value of fruit detachment ratio (84.7%) than non-contact branches (25.1%). Vibration transmission from the external branches to the internal branches in the canopy was not effective to remove internal canopy fruit. During the harvesting process, values of 100% fruit detachment ratio could be achieved with a combination of harvest parameters in the branch. Achieving a complete process of fruit detachment is possible if both the tree canopy and machinery are mutually adjusted to facilitate the contact of the shaking system and the necessary vibration time.

**Author Contributions:** All the authors made significant contributions to the manuscript. S.C.G., F.A.-R., and R.R.S.-G. designed the experiment and wrote the manuscript; S.C.G. and F.A.-R. performed the data acquisition; F.A.-R. and R.R.S.-G. performed the field component; E.S.-O. and A.J.S. performed the statistical analysis; J.A.G.-R. and A.J.S. scientifically supported and reviewed the paper; and S.C.G. and E.S.-O. managed the project.

**Funding:** This research was funded by National Institute for Agricultural and Food Research and Technology (INIA, Spain) financed by FEDER funds, from research projects RTA2014-00025-C05-03 and RTA2014-00025-C05-05.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study, in the collection, analyses, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

## References

1. FAOSTAT. Food and Agriculture Data. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed on 25 March 2019).
2. Junta de Andalucía. Average Production Costs. 2016–17 Season. Available online: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio> (accessed on 25 March 2019).
3. Roka, F.M.; Hyman, B.R. Mechanical harvesting of sweet oranges for juice processing. *Acta Hort.* **2012**, *965*, 241–244. [CrossRef]
4. Brotons-Martínez, J.M.; Martín-Gorrioz, B.; Torregrosa, A.; Porras, I. Economic evaluation of mechanical harvesting of lemons. *Outlook Agric.* **2018**, *47*, 44–50. [CrossRef]
5. Sanders, K.F. Orange harvesting systems review. *Biosyst. Eng.* **2005**, *90*, 115–125. [CrossRef]
6. Whitney, J.D. Field test results with mechanical harvesting equipment in Florida oranges. *Appl. Eng. Agric.* **1999**, *15*, 205–210. [CrossRef]
7. Roka, F.M.; Burns, J.K.; Buker, R.S. Mechanical harvesting without abscission agents—Yield impacts on late season ‘Valencia’ oranges. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* **2005**, *118*, 25–27.
8. Burns, J.K.; Buker, R.S.; Roka, F.M. Mechanical harvesting capacity in sweet orange is increased with an abscission agent. *HortTechnology* **2005**, *15*, 758–765. [CrossRef]
9. Hartmond, U.; Whitney, J.D.; Burns, J.K.; Kender, W.J. Seasonal variation in the response of ‘Valencia’ orange to two abscission compounds. *HortScience* **2000**, *35*, 226–229. [CrossRef]
10. Burns, J.K.; Roka, F.M.; Li, K.T.; Pozo, L.; Buker, R.S. Late-season ‘Valencia’ orange mechanical harvesting with an abscission agent and low-frequency harvesting. *HortScience* **2006**, *41*, 660–663. [CrossRef]
11. Castro-García, S.; Blanco-Roldán, G.L.; Ferguson, L.; González-Sánchez, E.J.; Gil-Ribes, J.A. Frequency response of late-season ‘Valencia’ orange to selective harvesting by vibration for juice industry. *Biosyst. Eng.* **2017**, *155*, 77–83. [CrossRef]
12. Spann, T.M.; Danyluk, M.D. Mechanical harvesting increases leaf and stem debris in loads of mechanically harvested citrus fruit. *HortScience* **2010**, *45*, 1297–1300. [CrossRef]
13. Savary, S.K.J.U.; Ehsani, R.; Schueller, J.K.; Rajaraman, B.P. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. *Trans. ASABE* **2010**, *53*, 1373–1381. [CrossRef]
14. Savary, S.K.J.U.; Ehsani, R.; Salyani, M.; Hebel, M.A.; Bora, G.C. Study of force distribution in the citrus tree canopy during harvest using a continuous canopy shaker. *Comput. Electron. Agric.* **2011**, *76*, 51–58. [CrossRef]
15. Gupta, S.K.; Ehsani, R.; Kim, N.H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Properties and modeling of tree limbs. *Trans. ASABE* **2015**, *58*, 971–985. [CrossRef]
16. Gupta, S.K.; Ehsani, R.; Kim, N.H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Mechanistic tree damage and fruit detachment models. *Trans. ASABE* **2016**, *59*, 761–776. [CrossRef]
17. Liu, T.H.; Luo, G.; Ehsani, R.; Toudeshki, A.; Zou, X.J.; Wang, H.J. Simulation study on the effects of tine-shaking frequency and penetrating depth on fruit detachment for citrus canopy-shaker harvesting. *Comput. Electron. Agric.* **2018**, *148*, 54–62. [CrossRef]
18. Pu, Y.; Toudeshki, A.; Ehsani, R.; Yang, F.; Abdulridha, J. Selection and experimental evaluation of shaking rods of canopy shaker to reduce tree damage for citrus mechanical harvesting. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* **2018**, *11*, 48–54. [CrossRef]
19. Whitney, J.D.; Wheaton, T.A. Tree spacing affects citrus fruit distribution and yield. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* **1984**, *97*, 44–47.
20. Castro-García, S.; Sola-Guirado, R.R.; Gil-Ribes, J.A. Vibration analysis of the fruit detachment process in late-season ‘Valencia’ orange with canopy shaker technology. *Biosyst. Eng.* **2018**, *170*, 130–137. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).