

Nueva máquina cosechadora para olivar tradicional: ingeniería agronómica e industrial



New harvester machine for traditional olive orchards: agronomic and industrial engineering



Rafael R. Sola-Guriado, Gregorio L. Blanco-Roldán y Jesús A. Gil-Ribes

Universidad de Córdoba. Dpto Ingeniería Rural. Campus de Rabanales, Ctra. N. IV Km 396 - Córdoba. Tfno: +34 957 218523. lr2sogur@uco.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8523> | Recibido: 12/05/2017 • Evaluado: 18/05/2017 • Aceptado: 05/10/2017

ABSTRACT

- The widespread traditional olive orchards have evolved without taking into count their mechanization, having serious problem in their profitability. It is necessary the technification of this sector due to the lack of innovation, particularly in machinery, so synergies between industrial and agronomic sector are required. The develop of a harvester may suppose a key factor in this process by using lateral canopy shakers. It is proposed to design a new prototype to harvest traditional trees with a new circular path around them to achieve the whole tree in a same path, by a collaborative procedure between engineers, researcher, farmers and manufactures. The tree geometries have been studied and a pruning method has been proposed to reduce canopy irregularities and enhance outer canopy production. It has been studied the iteration between canopy shakers and the traditional trees feasible to detach and catch fruit, but requiring a new design. Then, it has been developed a specific device for removing fruit for their integration in a new harvester. Field test shown the suitability for integral harvesting although it is required a long process of enhancing.
- **Keywords:** develop, prototypes, harvester, innovation, olive.

RESUMEN

Las mayoritarias y tradicionales plantaciones de olivar han evolucionado al margen de su mecanización, estando actualmente con serios problemas en su rentabilidad. Es necesario tecnificar este sector debido a la falta de innovación, particularmente en maquinaria, y para ello, se requieren sinergias entre el sector industrial y agronómico. El desarrollo de una cosechadora podría suponer un factor clave en este proceso que puede ser abordado mediante la tecnología que aportan los sacudidores de copa laterales. Se propone desarrollar de un prototipo que coseche los árboles con una novedosa trayectoria alrededor de los mismos para alcanzar todo el árbol en única pasada, en un proceso colaborativo entre ingenieros, investigadores, agricultores y fabricantes. Se ha caracterizado la morfología de los árboles, y propuesto un sistema de formación de su geometría que reduzca las irregularidades, así como favorezca la producción de fruto hacia las ramas exteriores. Se ha estudiado el comportamiento de los sacudidores en estas plantaciones con factibilidad en el derribo e interceptación de fruto, aunque con la necesidad de un diseño específico. Tras estas fases, se han desarrollado sistemas de derribo específicos para su integración en una nueva cosechadora. Las pruebas en campo demuestran la viabilidad de la recolección integral, aunque requieren de un proceso mayor de mejora y desarrollo.

Palabras Clave: desarrollo, prototipos, cosechadora, innovación, olivar.

1. INTRODUCCIÓN

El olivar es un cultivo que cuenta con una gran importancia económica y social en España. Generalmente, las plantaciones son muy heterogéneas y tienen diferentes particularidades [1], pudiéndose tipificar en olivar tradicional, intensivo y superintensivo, con un grado de mecanización bajo, medio y alto, respectivamente, en función de las soluciones existentes para su recolección (Fig. 1). El olivar tradicional es el más extendido y no está orientado para su mecanización por lo que su recolección comúnmente se realiza derribando el fruto sobre mallas y posteriormente, recogiendo y cargándolo sobre un remolque. La gran dependencia de procedimientos manuales condiciona su rentabilidad con respecto a otras nuevas plantaciones [2]. En el lado opuesto, el olivar superintensivo ha evolucionado para su mecanización gracias a la dualidad del uso de cosechadoras cabalgantes, procedentes de la viña, que permiten derribar y gestionar el fruto en una misma operación, junto con la creación de un modelo de plantación con árboles geoméricamente adaptados a estas máquinas [3].

Existen diversas dificultades económicas, técnicas y sociales que dificultan la conversión de las plantaciones tradicionales a otras con mayor grado de mecanización [4], y por ello, es necesario avanzar en su tecnificación. La introducción de soluciones innovadoras en un cultivo con cultura conservadora y bajo grado de desarrollo es difícil, pero la reciente situación globalizada obliga practicar un cambio para mantener su viabilidad. El desarrollo de una cosechadora puede ser un factor clave que ayude a aumentar su rentabilidad [5].

Existen cosechadoras con plataformas inclinadas y vibrador de troncos cuya su implantación es aún muy reducida por estar diseñadas para otros frutales. Las cosechadoras cabalgantes con sacudidores son las más extendidas permitiendo la recolección integral con largas jornadas de trabajo y reducido de personal, pero suponen una inversión importante y requieren de árboles perfectamente formados para su túnel de vareo. Todos estos sistemas trabajan con una trayectoria de avance en la línea de los árboles plantados aplicando la vibración/sacudida sobre todo el árbol y ninguno puede aplicarse al olivar tradicional.

Los sacudidores laterales utilizados en otros frutales pueden aplicarse para la recolección de los grandes, irregulares y espaciados árboles tradicionales, con un vareo mecánico alrededor del árbol, derribando el fruto localizado en una superficie para su in-



Fig. 1: Tipologías de olivar (arriba) y sistemas de recolección utilizados (abajo). De izquierda a derecha: vibrador de troncos con vareo, manejo de lienzos; vibrador de troncos con paraguas; cosechadora cabalgante con gestión de fruto

terceptación simultánea. Su principio de funcionamiento podría suponer una alternativa al problema planteado. La validación de esta suposición, requiere un proceso de investigación y desarrollo que pueda culminar en una nueva cosechadora adaptada a estos árboles, así como la adaptación de los mismos a esta tecnología. Es aquí donde surge una necesidad de sinergia entre la ingeniería industrial, en su campo de desarrollo de maquinaria y la ingeniería agronómica, en su campo de manejo del cultivo, en un proceso que debe ser llevado a cabo a través de investigadores, con la colaboración de fabricantes industriales y agricultores, tal y como se ha llevado a cabo en otro tipo de maquinaria como los vibradores de troncos desde hace varias décadas [6].

El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo un proceso de I+D+I secuenciado en varias fases, para conseguir una cosechadora con sacudidor de copa lateral para la recolección integral del olivar tradicional. Se propone que el sistema realice una novedosa trayectoria de recolección circular alrededor del árbol que podría permitir que el sacudidor acceda a todas las zonas del árbol en una única pasada. Con ello, se pretende avanzar en la mecanización y modernización de este sector, mediante alianzas de los sectores industrial y agronómico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se establecieron 6 fases de trabajo con actividades encaminadas a responder una serie de preguntas lógicas para el desarrollo de la cosechadora planteada (Fig. 2) y la trayectoria de recolección circular que ha de realizar (Fig. 3). Este proceso de 6 años se llevó a cabo intercalando actividades de investigación, desarrollo y validación con una estrecha colaboración entre investigadores (estudio de la iteración máquina-árbol), fabricantes e industriales (desarrollo de prototipos) y agricultores (formación de la morfología de los árboles).

Los principales parámetros para evaluar los prototipos tras los ensayos de recolección a lo largo de su desarrollo fueron:

1. Eficiencia de derribo: relación entre el fruto desprendido y la producción del árbol.
2. Eficiencia de cosecha: relación entre el fruto interceptado y la producción total del árbol. En ciertas ocasiones se introduce el parámetro "eficiencia de cosecha exterior" que sólo tiene en cuenta la producción exterior del árbol donde penetran las varas del sacudidor (Fig. 3) puesto que se pretende reducir al mínimo la producción interior con una poda adaptada, como se describirá más adelante, y sirve como concepto para evaluar una hipotética eficiencia en una futura adaptación.
3. Localización del fruto: ubicación del fruto en el árbol (interior y exterior,) y en el sistema de interceptación.
4. Daños: peso fresco de hojas, brotes y ramas rotas producidas.
5. Patrón de vibración: aceleración resultante de la vibración que aplica el sacudidor, usando acelerómetros piezoeléctricos triaxiales (PCB 356A02) anclados solidariamente a las ramas con presillas plásticas y cinta adhesiva (altura de 1,5-2,5 m) y procesada por un analizador de señales dinámicas (OROS 25 PC-Pack II). Se realizaron dos tipos de ensayos, colocando 3 acelerómetros por árbol en diferentes ramas en su parte exterior (0,25 -0,5 sobre su longitud desde su extremo) y en una misma rama en exterior-media-interior para determinar el grado de transmisión de la vibración.
6. Capacidad de trabajo: superficie de olivar recolectada por unidad de tiempo.

Para la determinación de 1, 2, 3 y 4, los frutos y daños interceptados por las estructuras de interceptación fueron separados y pesados, así como aquellos que cayeron fuera

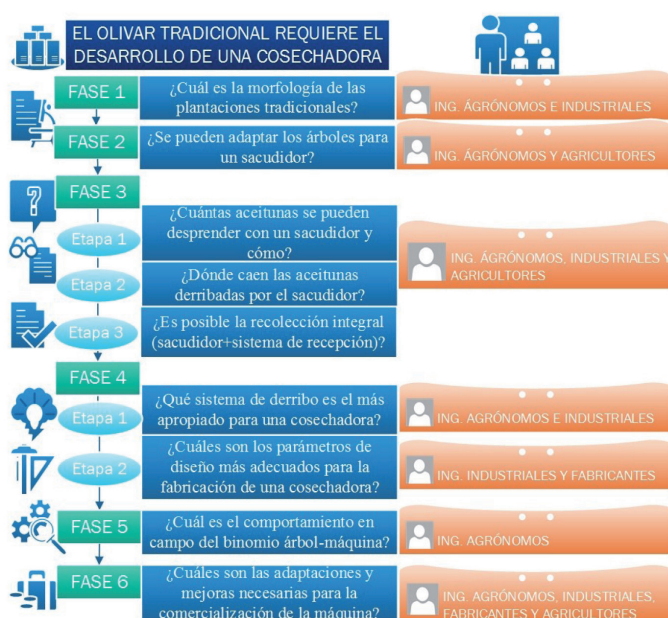


Fig. 2: Fases de trabajo para el desarrollo de una nueva cosechadora

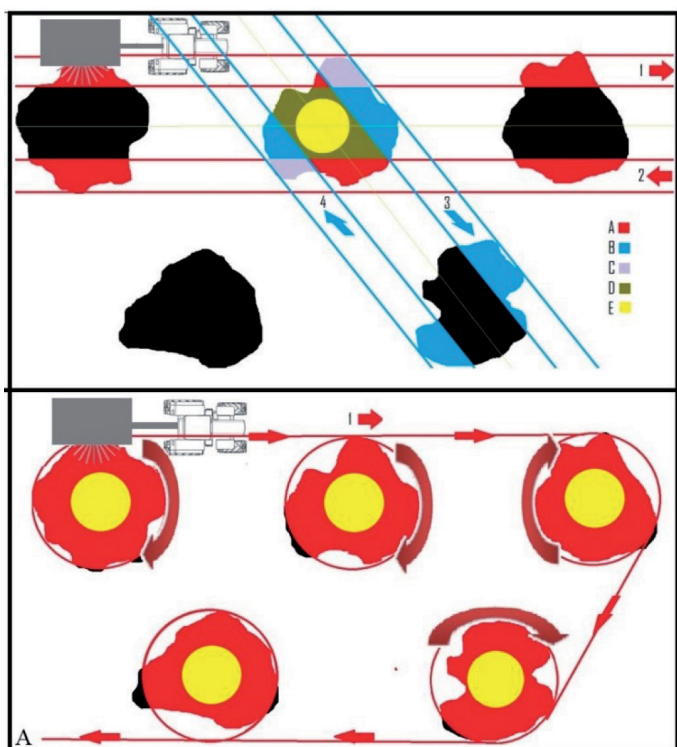


Fig. 3: Trayectorias de recolección lineal con 4 pases (arriba) y circular (abajo) con las partes tocadas durante los pases paralelos (A); durante pases cruzados (B); con solape durante ambas pasadas (C), no tocadas (D) e inaccesible para un sacudidor por la penetración limitada de las varas (E)

de las mismas. Posteriormente, el fruto restante en el árbol fue derribado manualmente separándolo entre la parte exterior e interior del árbol.

F1. Estudio de las características del olivar

Se realizó un estudio de los parámetros geométricos de 72 árboles tradicionales en tres fincas representativas en Córdoba y Jaén en condiciones de campiña con pendiente reducida, para obtener información de cara a su recolección con sacudidores laterales. Los parámetros fueron obtenidos mediante técnicas fotogramétricas a través de imágenes tomadas a nivel de suelo y aire con un dron (70 m de altura con solape entre pases de 65%). En ambos casos, las imágenes fueron procesadas y analizadas morfométricamente utilizando el análisis de partículas del software ImageJ (National Institute of Health) (Fig. 4) [7]. Con los perfiles laterales se determinó el patrón de contorno de los árboles orientado al diseño del sistema de sacudida, y con los aéreos se obtuvieron círculos ajustados con su misma área para dimensionar la superficie de interceptación y el radio de giro de la máquina alrededor del árbol.

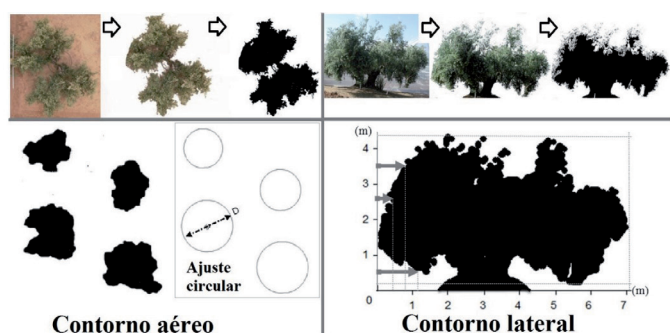


Fig. 4: Obtención y procesamiento de imágenes laterales y aéreas de árboles tradicionales para análisis de partículas

F2. Adaptación de los árboles al sacudidor y la trayectoria

Según el procedimiento (Fig. 3) e información obtenida sobre los sacudidores laterales en investigaciones previas, se llevó a cabo un nuevo método de poda y formación morfológica del árbol, con respecto al habitual, para mejorar la interacción máquina-árbol. Se eliminaron gran parte de las ramas interiores, donde las varas no tienen acceso, para facilitar la producción de fruto en la parte exterior del árbol. Las ramas exteriores con excesivos salientes fueron cortadas para conseguir un perfil de árbol más regular en la trayectoria circular. Las ramas bajas se elevaron para permitir que una superficie de interceptación pueda transitar bajo el árbol, y la altura del árbol se acotó en relación a la altura donde un sacudidor puede acceder. Este proceso fue llevado a cabo durante los primeros 4 años totales hasta la fabricación de la cosechadora.

F3E1. Estudio del derribo

Se utilizó un sacudidor lateral sin sistema de interceptación (Oxbo 3210) y arrastrado por un tractor (John Deere 6920), procedente de la recolección de cítricos en Florida debido a la inexistencia de uno para olivar. Se ensayaron diferentes parámetros de la máquina (frecuencia, inclinación de varas, velocidad de avance), con trayectorias lineales de varios pases y una circular alrededor del árbol (Fig. 3, 5.1) para determinar la mejor configuración para el desprendimiento de aceituna y que ocasionara daños comparables a otros procedimientos.

F3E2. Estudio de la interceptación

Tras el estudio del sacudidor, se colocó un sistema de interceptación modulable suspendido bajo la superficie del conjunto de varas (Fig. 5.2) para el estudio de la localización del fruto derribado en un nuevo ensayo de recolección. El área se dividió en zonas según el área de la proyección vertical de las varas (1), el área adyacente a la anterior en la dirección de avance a la máquina donde el fruto cae al principio y final de la pasada (2 y 3, respectivamente) y el área que existe entre las tres zonas anteriores y el árbol donde el fruto cae fuera (4).

F3E3. Estudio del comportamiento integral

Para mostrar la aptitud de derribo e interceptación de fruto simultánea, se fabricó un sistema de gestión diseñado acorde a la geometría del sacudidor de cítricos (Fig. 5.3). La plataforma fue acoplada al sacudidor bajo el área de ataque de las varas semi-suspendida sobre un eje trasero con capacidad de pivote lateral y dos ruedas auto giratorias. El sistema disponía de un conjunto bandas transportadoras que conducían el fruto hacia la parte trasera de la máquina donde se separaron las ramas derribadas y los frutos limpios que eran almacenados en una tolva. La parte de la máquina cercana al árbol (zona 4) estaba compuesta por varias superficies deformables, a modo de escama de pescado, que se plegaban al contactar con los troncos de los árboles y volvían



Fig. 5. Etapas de la fase 3 utilizando el sacudidor Oxbo 3210

a su punto inicial una vez finalizado el contacto, gracias a unos muelles de torsión. Se llevaron a cabo una serie de pruebas sobre árboles formados con poda de adaptación.

F4E1. Diseño de un sistema modular de derribo

Se inició un proceso de desarrollo (Fig. 7) en el que se diseñaron, fabricaron y analizaron varios prototipos de derribo que emularan un patrón de sacudida similar al de la máquina estudiada en la fase 3, que alcanzaran buenos resultados en el desprendimiento de fruto y presentaran la robustez bajo mantenimiento característico de una máquina agrícola, descartando aquellos mecanismos que no cumplieran estas premisas y mejorando aquellos que sí las tuvieran. En función del mecanismo ensayado se probaron diferentes configuraciones variando la amplitud de sacudida, velocidad de avance, grado de giro del tambor, material, sección, inclinación y distribución varas.

F4E2. Diseño de la cosechadora

El diseño conceptual de la cosechadora se realizó dividiéndolo en varios componentes principales (derribo, interceptación, y dirección) pero sin perder las relaciones y conexiones globales de su conjunto [8]. Las dimensiones principales de conjunto fueron ajustadas en base a los parámetros obtenidos de la fase 1, tomando como punto de partida la geometría del conjunto diseñado en la etapa 3 de la fase 3 (Fig. 6) y respondiendo a una serie de preguntas: ¿dónde se sitúa la vara más alta, la más baja (1, 2)?, ¿cuál es la longitud de vara y cuánto debe aproximarse (3, 4)?, ¿cuál es el ancho fijo y deformable de la superficie de interceptación (5,6), su largo (7) y su altura de (2)?, ¿cuál es la distancia se debe establecer entre ejes (8) y entre ruedas (9) en base al radio de giro que debe efectuar?

En base al conocimiento generado en las fases anteriores, se establecieron una serie de pautas a seguir en el diseño detallado del conjunto:

- Las dimensiones en altura y anchura totales que afectan al sistema de derribo e interceptación estarán acotadas para no superar las dimensiones legales de transporte por carretera con remolque (Anexo II del Reglamento General de Vehículos, DGT).
- El sistema de derribo estará formado por módulos, rediseñados de la etapa anterior, con una aproximación independiente tipo "bandera" desde una torre principal anclada al chasis. Debido a la cobertura del módulo rediseñado (0,3 m de vara superior a inferior) se incorporarán 4 módulos separados 0,3 m para cubrir la mayor parte de toda la superficie de copa para sacudir.

- El sistema de interceptación cubrirá las dimensiones proporcionales a los datos obtenidos de F3E2.
- El flujo de fruto y daños irá hacia la parte opuesta al árbol y posteriormente hacia la parte trasera de la máquina para optimizar la gestión y limpieza del mismo.
- El fruto limpio será almacenado en un bolsón de 800 kg de capacidad que permitirá dejarlo en campo, desvinculando la logística de descarga en un sistema auxiliar como una pala cargadora.
- La cosechadora será arrastrada por un tractor para reducir costes y la potencia hidráulica será obtenida de una central hidráulica accionada por la toma de fuerza del mismo.
- Se colocarán dos ejes para repartir el peso de la máquina que podrán pivotar lateralmente para adaptarse al terreno.
- El conjunto deberá ejecutar un radio de giro acorde a la geometría del árbol.

Los sistemas fueron diseñados con un software paramétrico (SolidWork®) y fabricado por el fabricante Moresil.

F5. Evaluación del comportamiento en campo de la cosechadora

La cosechadora fue ensayada en dos fincas en diferentes fechas de recolección con árboles adaptados y sin adaptar a las características del sacudidor. Paralelamente, se recolectó con un vibrador de troncos orbital (Noli 132 VBFHG) acoplado a un tractor (John Deere 6420) con operarios vareando y manejando las lonas.

F6. Mejora de la máquina y orientación al mercado

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

F1

Los árboles sin ninguna adaptación mostraron grandes irregularidades en sus morfologías, con grandes distancias de separación entre ellos $10,64 \pm 1,34$ m (media $\pm$ desviación estándar), una altura total de $3,89 \pm 0,38$ m con ramas bajas a de $0,55 \pm 0,12$ m del suelo. De los perfiles laterales se obtuvieron diámetros mayor y menor de $6,76 \pm 1,48$ m y $5,96 \pm 1,16$ m, respectivamente pero que variaron a lo largo de la altura del árbol con diferencias de hasta 2,8 m entre su parte media y alta. Los perfiles aéreos mostraron una circularidad de $0,66 \pm 0,06$ como factor de forma y su ajuste a un perfil circular dio circunferencias de $6,21 \pm 0,82$ m de diámetro. Los resultados indican que es necesario la adaptación de la máquina a la irregularidad del árbol y del árbol a las características de la máquina, es decir, se requiere el diseño específico de una

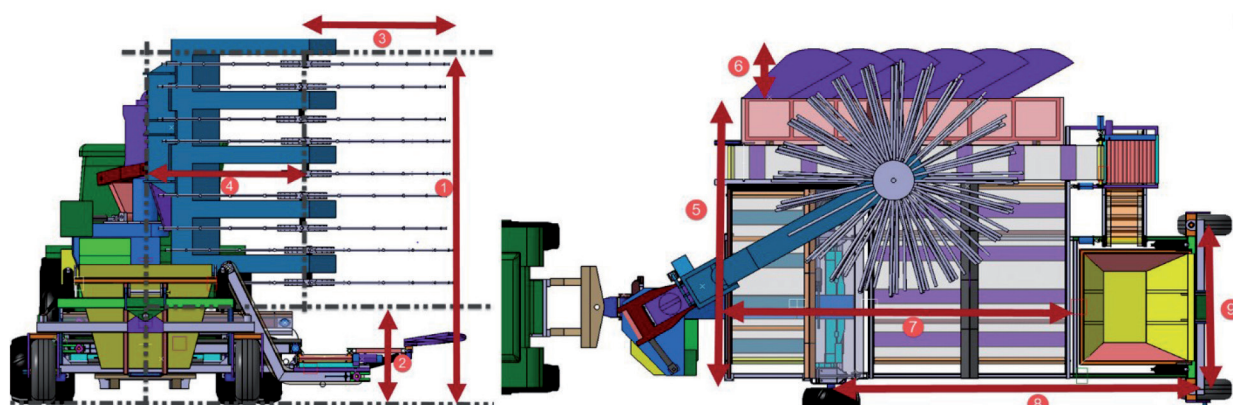


Fig. 6. Dimensiones principales para la nueva cosechadora apoyados en las del prototipo de la fase 3: altura de la cosechadora (1), altura del sistema de interceptación (2), longitud y penetración de varas (3), grado de aproximación de los módulos (4), anchura de la cosechadora (5), dimensiones de la estructura de plegado (6), distancia entre ejes (7) y distancia entre ruedas (8)

cosechadora tomando los parámetros geométricos estudiados y una poda de formación acorde a su funcionamiento.

F2

Fue posible llevar a cabo una poda de adaptación para la recolección con sacudidores que requirió favorecer la producción de fruto en el exterior y reducir las irregularidades del árbol para conseguir una trayectoria más homogénea con mejor derribo y mayor tiempo de contacto entre las varas y la copa. El primer año de poda se obtuvieron 20-35 kg de restos siendo inferior a los 40-49 kg de la poda tradicional, aunque a la finalización del cuarto año, el peso fresco acumulado fue mayor en la poda de adaptación (125-139 kg) con respecto a la tradicional (70-111 kg) puesto que la primera se realizó anualmente y la segunda cada dos años. Durante todo el período no hubo diferencias significativas en la producción del árbol entre la poda tradicional y la de formación ($p < 0,05$; t-student) con diferencias medias de 11 kg entre el primer y cuarto año teniendo en cuenta su vecería.

F3E1

Se demostró que los sacudidores de copa laterales permiten derribar el fruto con una combinación de derribo y daño aceptable en comparación con otros sistemas mecanizados [3, 8]. Ello fue conseguido con un mecanismo de sacudida (biela-manivela) girando su cigüeñal a 300 rev min^{-1} con 16 cm de carrera, con 24×12 varas inclinadas a 15° y la aplicación de una trayectoria circular a la velocidad del tractor de 1 km h^{-1} . Con esta configuración se consiguió una eficiencia de derribo de $78,8 \pm 5,6 \%$ y $2,5 \pm 1,3$ kg de daños, aunque un $7,2 \pm 2,5 \%$ no fue derribada donde no accedieron las varas (parte interior de la copa) y un $14,0 \pm 5,1 \%$ quedó en el resto del árbol. Las trayectorias circulares mejoraron el contacto con la copa un resultando un 23% más de eficiencia de derribo en todas las configuraciones probadas.

Se registraron aceleraciones eficaces de $110,2 \pm 51,0 \text{ m s}^{-2}$ y $4,6 \pm 0,2 \text{ Hz}$ en las ramas en los diferentes pases de la máquina (medido en la zona exterior de las ramas) y con un tiempo efectivo coincidente con el de contacto de las varas con la copa del árbol. Sin embargo, los valores pico-pico registrados fueron hasta 10 veces superiores a los eficaces denotando los impactos de las varas. Sin embargo, las ramas donde no tuvieron acceso directo las varas no tuvieron similares niveles de aceleración a los alcanzados y quedó fruto sin derribar (medido en la parte interior-media-exterior de las ramas), debido al alto amortiguamiento de la vibración. El patrón de vibración estuvo caracterizado por impactos a las ramas de baja frecuencia y gran amplitud, opuesto a los sistemas convencionales que aplican la vibración en la estructura principal del árbol [8]. Este comportamiento demuestra la importancia del contacto rama-vara para un derribo eficiente y debe de ser realizado por dos vías: formación del árbol y buena aproximación de las varas.

F3E2

El 80,7 % del fruto fue interceptado por la superficie diseñada ($65,5 \pm 6,8 \%$, zona 1; $10,3 \pm 3,7 \%$, zona 2; $4,9 \pm 2,4 \%$, zona 3), cuya longitud se extendió hasta el extremo de la vara en su posición de aproximación máxima al árbol. El gran porcentaje de fruto derribado en la zona de la proyección vertical de las varas denota las bajas proyecciones de fruto por el sistema estando localizado otro porcentaje importante en la zona de avance de la máquina y otro en la parte cercana al tronco, consecuencia del movimiento de aproximación de las varas. Este comportamiento puede ser explicado por el movimiento del mecanismo de sacudida

en el que cada módulo realiza un movimiento alternativo, estando desfasados entre ellos (120° de su cigüeñal) según una configuración con los 6 tambores en línea (L6). De esta manera, se produce un movimiento cruzado entre varas pero que no permite una aproximación independiente de cada módulo. Al poder girar cada tambor libremente, se adaptan a la trayectoria de avance de la máquina con el árbol sin causar daños graves. Para interceptar gran parte del fruto que se pierde en el espacio que existe entre los troncos del árbol y la máquina es necesario colocar un sistema que lo cubra y permita adaptarse a los troncos irregulares del árbol en su trayectoria.

F3E3

Con la incorporación del sistema de gestión de fruto, se puede afirmar que es viable la recolección integral del olivar tradicional, teniendo en cuenta la adaptación de los árboles ensayados y las condiciones de recolección tardía en la fecha practicada. El prototipo alcanzó una eficiencia de derribo y de cosecha total de $92,4 \pm 3,9 \%$ y $85,3 \pm 4,6 \%$, respectivamente, ocasionando $4,26 \pm 2,48$ kg de daños. La capacidad de trabajo fue alta con un tiempo medio de recolección de 110 s árbol^{-1} y un único operario para la conducción de la máquina. Sin embargo, existen otros factores que imponen la necesidad del diseño de una cosechadora específica: el gran peso de la máquina (más de 10 T) que puede ocasionar compactación y resbalamiento en condiciones húmedas; las grandes dimensiones del conjunto para su transitabilidad en campo y transporte por carretera; el elevado coste comercial del sacudidor empleado; la falta de adaptación al contorno del árbol al disponer de una única torre rígida de módulos; los requerimientos de un tractor elevada potencia y peso; y sobre todo, la inexistencia de ninguna solución en el mercado que permita el mismo fin del prototipo diseñado.

F4E1

El nuevo sistema de derribo fue diseñado con orientación modular para su aproximación independiente al árbol adaptándose a los estudios de fases anteriores que revelaron las diferencias del contorno de los árboles y la importancia de mantener el mayor contacto posible con la copa del árbol. El proceso de desarrollo llevado a cabo (Fig. 7) arrojó que el sistema y configuración que mejor se adapta al objetivo perseguido fue un mecanismo formado por dos masas gemelas con 8 cm de excentricidad, desfasadas 180° entre la inferior y superior, y movidas por un motor hidráulico orbital de 50 cc a 300 rev min^{-1} a través de una cadena que conecta con el eje central que une las masas. Sobre cada excéntrica se ubicaron tambores, con posibilidad de giro libre, formados por una aleación de duraluminio con alojamientos para 15 varas de sección circular y acero HSLA ("High-Strength Low-Alloy") colocadas paralelas a 30 cm. Con esta configuración las varas generaron un movimiento de vaivén cruzado entre las varas que producen en las ramas patrones de vibración similares a los obtenidos con el sacudidor de cítricos.

F4E2

Los parámetros de diseño de la cosechadora fueron adecuados a las funcionalidades descritas en apartados anteriores. La altura total fue de 3,7 m, relacionada con la altura del árbol. La altura del primer módulo sacudidor estuvo a 1 m respecto al suelo para incorporar una plataforma de interceptación y aprovechando la flexibilidad que las ramas bajas tienen para poder levantarse a su paso. La longitud de las varas fue de 1,5 m, calculada a través del diámetro medio del árbol, asumiendo contactar sólo el 70% de la copa en su exterior.

En este sentido, es posible efectuar una compresión de la copa del árbol debido a su estructura [10] mediante la aproximación de los módulos de derribo. La distancia que cada módulo pudo aproximar desde su posición de transporte fue de 1 m, asumiendo las diferencias existentes en el contorno del árbol desde su punto más extremo hasta el más interior. El ancho de la superficie de interceptación fue de 3

m debido a las restricciones legales de transporte por carretera y en relación al área cubierta por las varas. Además, tuvo una parte extra de 1 m de ancho compuesta por "escamas" deformables al contacto con el tronco. La distancia entre las ruedas y los ejes fue ajustada para que la máquina pudiera realizar un radio de giro mínimo de 3,1 m desde su rueda interna, en relación al cálculo de los perfiles

circulares aéreos de los árboles. Para ello, la distancia entre ruedas se fijó en 2,5 m para su transporte en remolque y la longitud entre ejes se fijó en 4,1 m. Las desviaciones de los contornos aéreos del perfil circular obligaron a colocar una barra de tiro excéntrica que permitió corregir la trayectoria circular 0,8 m radiales para corregirlas. Finalmente se probó el prototipo mostrado en Fig. 8 que fue protegido mediante la patente ES2560353.

La cosechadora fue diseñada en menos de 4 meses gracias a la ingeniería concurrente donde los diseñadores dispusieron de la información necesaria por parte de los investigadores. Paralelamente, el departamento de control diseñó la instalación hidráulica en contacto con el diseño electrónico mediante la incorporación de sensores (presión y caudal del sistema de sacudida, posición angular de los módulos de derribo, posición lineal cilindros de inclinación e dirección) para su control mediante un PLC industrial y válvulas. En una primera fase se fabricaron los módulos de derribo tras finalizar su diseño de detalle, permitiendo el diseño, fabricación y ensamblaje del resto de componentes de manera paralela. La configuración de la fábrica permitió una cadena enlazada eficiente el flujo de material que

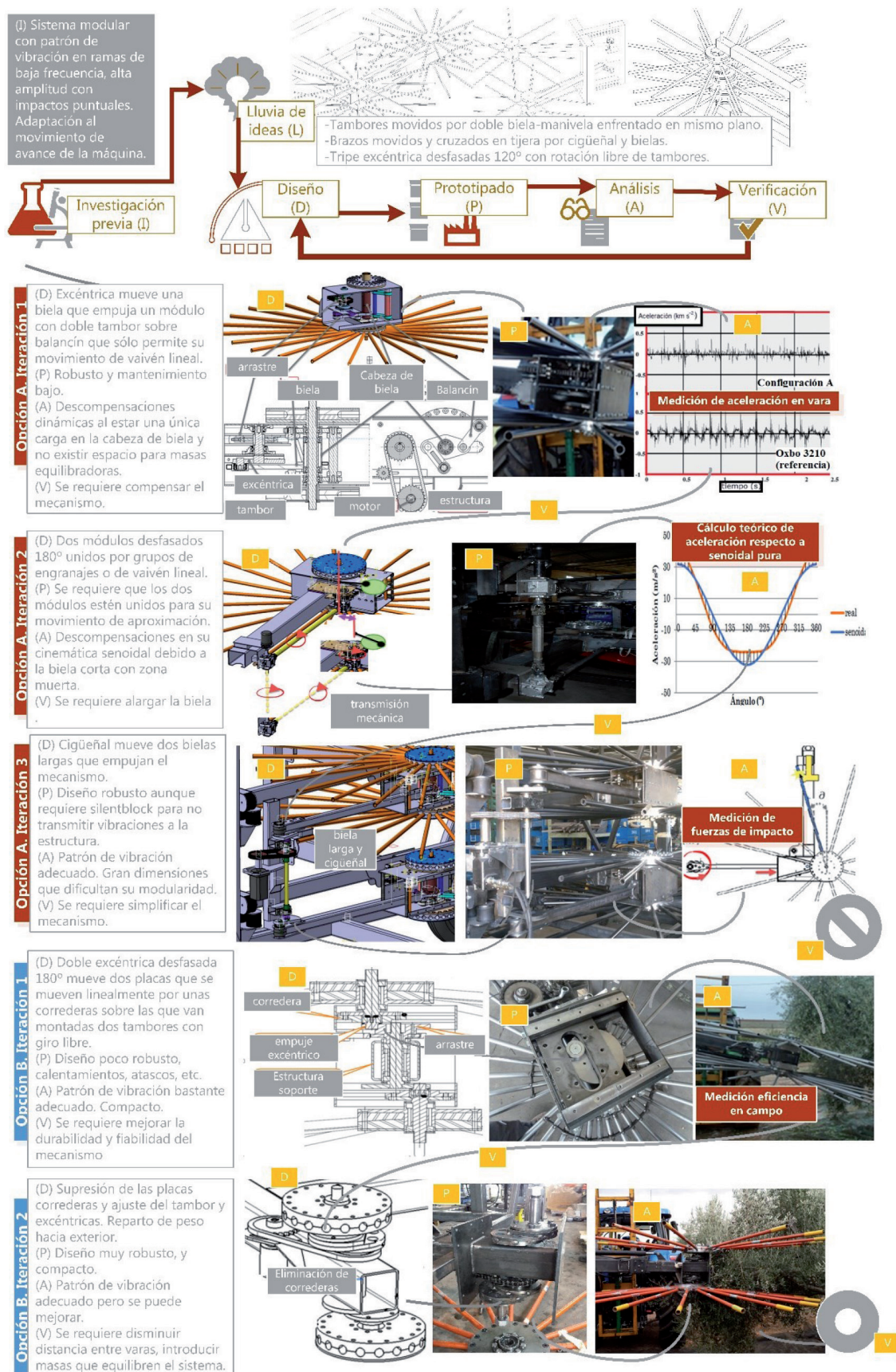


Fig. 7: Proceso realizado para el desarrollo de un sistema de derribo modular



Fig. 8: Prototipo cosechadora recolectando un olivo tradicional

partía de corte (sierra y laser), conformado (plegado, chapa, fresado y torneado), montaje (soldadura, acople de componentes) e instalación (mecánica, oleohidráulica, electrónica).

F5

Los primeros resultados en campo arrojaron resultados prometedores para la cosecha integral mecanizada de olivar tradicional, con una eficiencia de derribo exterior desde el 88 ± 8 % en recolección temprana en árboles no adaptados al 97 ± 2 % en recolección tardía en árboles con poda de adaptación. Los datos demuestran la validez del método de poda, necesario un mayor período de adaptación progresiva, como la desarrollada en otros sistemas de cultivo [11], y ajustada a las características finales de la cosechadora desarrollada. El sistema permitiría la recolección temprana de las plantaciones, en oposición a otros sistemas existentes [12] para mejorar la calidad y precio del aceite obtenido. La máquina alcanzó una eficiencia de cosecha exterior de 71-78 %, con una reducción de 8-10% de la eficiencia de cosecha total, teniendo en cuenta el interior del árbol, resultando bajos con respecto a otras cosechadoras comerciales que trabajan en línea [3], debido a las pérdidas de fruto detectadas por deficiencias en los trasvases entre las bandas transportadoras, y proyecciones en la parte delantera de la máquina como resultado de los primeros instantes del contacto de las varas con el árbol donde se produce la mayor cantidad de desprendimiento. Se produjeron daños leves de 4,0-7,9 kg con roturas de ramas grandes de 0,5-1,5 kg, en línea con los producidos con los sistemas habituales [9], y a consecuencia en gran parte de trayectoria de la máquina que no se producirán en años sucesivos. La capacidad de trabajo media fue de 0,22 ha h⁻¹ utilizando dos operarios para el control del tractor y el manejo de la cosechadora arrastrada. En general, los resultados son buenos en comparación con el sistema habitual utilizado, vibrador de troncos más el vareo complementario, que consiguieron una media de 96 ± 2 % de fruto derribado a lona, con $6,2 \pm 4,9$ kg medios de daños y capacidad de recolección de 0,24 ha h⁻¹ con 11 personas para realizar las mismas labores.

F6

En base a estos primeros datos, se hace necesaria la corrección y mejora de diferentes aspectos del prototipo para seguir avanzando en su desarrollo, con sucesivas pruebas de campo análisis y mejora. Las principales modificaciones técnicas deben ir orientadas a aumentar la superficie de interceptación de fruto, aumentar la densidad de varas y/o su inclinación. En una fase final, se deberá realizar un estudio de mercado y sondeo al consumidor

que defina las particularidades de la máquina para su adaptación a fines comerciales.

4. CONCLUSIONES

El proceso de desarrollo y colaboración entre investigadores, agricultores, agrónomos e industriales llevado a cabo ha conseguido introducir de la primera cosechadora para el olivar tradicional suponiendo una inyección de innovación y modernización sin precedentes en un cultivo con una cultura reticente al cambio. Las características de los árboles con morfología irregular en sus perfiles aéreos y laterales deben modificarse hacia formas más redondeadas que favorezcan la producción hacia el exterior. Es posible la recolección con un sacudidor lateral con trayectorias circulares. Es determinante aplicar una vibración de gran amplitud y baja frecuencia en las ramas con el mayor tiempo de contacto posible varas-árbol, y que permita interceptar el fruto en la zona de aplicación de la sacudida. No existe ningún sistema comercial para este fin. Se ha desarrollado un sistema de derribo basado en módulos con aproximación al árbol independiente formados por un mecanismo sencillo y robusto que aplique un patrón de vibración similar al comentado. Cuatro módulos de este tipo han sido incorporados a la nueva cosechadora cuyas dimensiones están acorde a las dimensiones del árbol. Los ensayos de campo muestran la viabilidad de la cosechadora en eficiencia de derribo, daños y capacidad de trabajo. No obstante, para abordar una solución comercial son imprescindibles un periodo de mayor duración que permita la adaptación completa de las plantaciones, la mejora de la máquina y optimización de sus costes de venta que deberá ser abordado para afrontar el problema de rentabilidad de este cultivo y tipología tradicional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rallo, L., Barranco, D., Castro-García, S., Connor, D. J., Gómez del Campo, M., Rallo, P., 2013. High-Density Olive Plantations. *Horticultural Reviews*. 41, 303-384.
- [2] AEMO, Asociación Española de Municipios del Olivo, 2012. Aproximación a los costes de los distintos sistemas de cultivo del olivo. http://www.aemo.es/get.php?pathext=descargas/Estudio_2012.pdf Acceso May 22, 2016
- [3] Ravetti, L., and Robb, S., 2010. Continuous mechanical harvesting in modern Australian olive growing systems. *Advances in Horticultural Science*. 24(1), 71-77.
- [4] Beltrán-Estevé M., 2013. Assessing technical efficiency in traditional olive grove systems: A directional metadistance function approach. *Economía agraria y recursos naturales*. 13(2), 53-76.
- [5] IOC, 2007. Técnicas en la producción en olivicultura. International Olive Council. <http://www.internationaloliveoil.org/store/index/487-technical-scientific-publications>. Accessed January 11, 2017.
- [6] Tous, J., 2011. Olive production systems and mechanization. *Acta Horticulturae*. 924, 169-184.
- [7] Igathinathane, C., Pordesimo, L.O., Columbus, E.P., Batchelor, W.D., and Methuku, S.R., 2008. Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ. *Computers and Electronics in Agriculture*. 63(2), 168-182.
- [8] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.H., 2007. *Engineering design: a systematic approach*. London: Springer-Verlag. 229 p.
- [9] Sola-Guriado, 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. *Biosystem Engineering*. 118, 186-193.
- [10] Dias, A., Peca, J., and Pinheiro, A., 2012. Long-Term Evaluation of the Influence of Mechanical Pruning on Olive Growing. *Agronomy Journal*. 104(1), 22-25.
- [11] Pastor, M., Humanes-Guillén, J., 2006. Poda del olivo moderna *Olivicultura* (5th ed.). Editorial agrícola española (Chapter 8).
- [12] Ferguson, L., Rosa, U. A., Castro-García, S., Lee, S. M., Guinard, J. X., Burns, J., 2010. Mechanical harvesting of California table and oil olives. *Advances in Horticultural Science*. 24(1), 53-63.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación obtenida del Ministerio de Economía y Competitividad (CPP-Mecaolivar), cofinanciado por fondos FEDER y de la Interprofesional del Aceite Español.